

Johannes Jaeschke

Bewertung der Lebensdauer von
Lotverbindungen unter Betrachtung des
Fehlermechanismus Elektromigration

Fraunhofer Institut
Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM

Bewertung der Lebensdauer von
Lotverbindungen unter Betrachtung des
Fehlermechanismus Elektromigration

von Johannes Jaeschke

FRAUNHOFER VERLAG

Kontaktadresse:

Fraunhofer Institut Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM
Gustav-Meyer-Allee 25
D-13355 Berlin
Telefon: 030 46403-100
Fax: 030 46403-111
www.izm.fraunhofer.de

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.

ISBN: 978-3-8396-0431-1

D 83

Zugl.: Berlin, TU, Diss., 2012

Druck: Mediendienstleistungen des
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2012

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Postfach 80 04 69, 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon 07 11 9 70-25 00
Telefax 07 11 9 70-25 08
E-Mail verlag@fraunhofer.de
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Bewertung der Lebensdauer von Lotverbindungen unter Betrachtung des Fehlermechanismus Elektromigration

von Diplom-Ingenieur
Johannes Jaeschke
aus Preetz

von der Fakultät IV - Elektrotechnik und Informatik
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Prof. Dr. rer. nat. G. Tränkle
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H. Reichl
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. habil. M. Nowottnick
Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. K.-D. Lang

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 26. Juni 2012

Berlin 2012
D 83

Danksagung

Diese Arbeit ist durch die hervorragende Zusammenarbeit des Forschungsschwerpunkts ‘Technologien der Mikroperipherik’ der Technischen Universität Berlin, des Fraunhofer Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM) und des integrierten Graduiertenprogramms *Human-Centric Communication Center* (IGP H-C3) entstanden.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Reichl danke ich überaus für die wissenschaftliche Betreuung, die ausgezeichneten Diskussionen und Anregungen, die zum Gelingen dieser Arbeit essentiell waren und für die Erstellung eines Gutachtens. Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. techn. Lang danke ich für die aufschlussreichen Diskussionen und die Erstellung eines Gutachtens. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Nowotnick für die Übernahme eines Gutachtens.

Herrn Dr.-Ing. Nissen und Herrn Dr.-Ing. Middendorf danke ich ausdrücklich für die Möglichkeit, die experimentellen Arbeiten im *Electronics Condition Monitoring*-Labor des Fraunhofer IZM durchführen zu können und für die bereichernden Diskussionen. Zudem danke ich allen Mitarbeitern der Abteilung *Environmental and Reliability Engineering* des IZM für die anhaltend gute Stimmung sowie ihre Unterstützung und Motivation für das Thema.

Den Mitarbeitern des IZM und des Forschungsschwerpunkts ‘Technologien der Mikroperipherik’ danke ich für die stets offenen Diskussionen zu den technologischen Aspekten der Arbeit, sowie für die Unterstützung und Bereitstellung der technischen Möglichkeiten zur Probenpräparation und Schadensanalyse. Insbesondere danke ich Frau Kleff für ihre Unterstützung beim Aufbau der Teststrukturen und die vielen anregenden Diskussionen. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Müller und Herrn Dr.-Ing. Oppermann danke ich für die interessanten Diskussionen.

Durch die Rahmenbedingungen des IGP H-C3 wurde die Entstehung dieser Arbeit stets vorangetrieben. Hier möchte ich besonders Frau Piens für die Unterstützung bei allen organisatorischen Fragen danken.

Allen Korrekturlesern des Manuskripts möchte ich für ihre Anregungen danken, insbesondere meiner Schwester, für ihr Durchhaltevermögen beim Erfassen, Korrigieren und Hinterfragen jedes Themenkomplexes.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Freundin und Familie für den nötigen Rückhalt und die Unterstützung während der nicht immer einfachen Zeit der Promotion.

Zusammenfassung

Die Zuverlässigkeit zunehmend miniaturisierter elektronischer Systeme wird unter anderem durch den Fehlermechanismus Elektromigration limitiert. Dieser strom- und temperaturinduzierte Mechanismus führt zu einem gerichteten Transport von Material und resultiert in Fehlstellen in elektrischen Leiterbahnen und Lotverbindungen. In der vorliegenden Arbeit werden die überlagerten Fehlermechanismen innerhalb von Lotwerkstoffen zur Bewertung der Zuverlässigkeit bei Elektromigration untersucht und modelliert. Das bestehende theoretische Verständnis wird durch eine isolierte Betrachtung der auftretenden Fehlermechanismen erweitert. Ein physikalisch begründetes Modell wird abgeleitet und die nicht ausreichend quantifizierten und qualifizierten Zusammenhänge werden aufgezeigt. Mit diesem Modell werden zuverlässigkeitsrelevante Parameter ermittelt, die bei stationärer Betrachtung die akkumulierte Schädigung materialabhängig beschreiben.

In einem aufgebauten numerischen Modell kann die Modellvorstellung bei variierenden Randbedingungen abgebildet werden. Zur Ermittlung von für Elektromigration anfälligen Lokalisationen werden die Grenzwerte für das Auftreten dieses Fehlermechanismus in Abhängigkeit der Randbedingungen Design, Belastung und Materialien bestimmt. Daraus kann idealerweise eine Bewertung der Lebensdauer abgeleitet werden. Mit Kenntnis der Grenzwerte kann zudem eine Schwachstellenanalyse im Entwicklungsprozess elektronischer Systeme durchgeführt und Designentscheidungen können unterstützt werden.

Eine Teststruktur wird entwickelt, die reproduzierbar hergestellt werden kann, zu einem Ausfall durch Elektromigration im Lotmaterial führt und somit einen Vergleich von Lotsystemen in Abhängigkeit der sich ändernden Randbedingungen Temperatur, Stromdichte, Material und Geometrie ermöglicht und das aufgestellte Modell verifiziert. Die Modellparameter werden für bleifreie $\text{Sn}_{95,5}\text{Ag}_4\text{Cu}_{0,5}$ -, $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_{3,5}$ -Lotverbindungen unterschiedlicher Geometrie experimentell bestimmt. Bei gezielter Reduzierung der sich überlagernden Einflussfaktoren sind für einen Ausfall durch Elektromigration lokale Stromdichten in der Größenordnung $7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ bei Temperaturen $> 150 \text{ °C}$ nötig. Der Exponent n zur Beschreibung der Stromdichteabhängigkeit für die Zuverlässigkeit ergibt sich zu 2,5. Bei Überlagerung der Effekte steigt n auf einen Wert von 4,7. Mit zunehmender Miniaturisierung der Lotkontakte zeigt sich, dass die Modellvorstellung erweitert werden muss um die Effekte der Kornrotation und die Ausbildung einer bambusartigen Kornstruktur. Diese beeinflussen die Diffusion und führen zu einer steigenden Aktivierungsenergie E_a von 1,18 eV um einen Faktor 1,4 bis 2. Eine Lebensdauer

der Lotverbindung kann im frühen Versuchsstadium vor einem Ausfall mit dem Modell sicher bestimmt werden. Ein Vergleich mit bestehenden Verfahren zur Bewertung der Lebensdauer von Lotverbindungen zeigt eine signifikante Verbesserung der Berechnungsmöglichkeiten.

Aufbauend auf der Arbeit können Monitorstrukturen zur Zustandsüberwachung für den Fehlermechanismus Elektromigration entwickelt werden. Die Auswirkungen der Elektromigration in Lotverbindungen in Abhängigkeit von der Aufbau- und Verbindungstechnik und der Werkstoffe können gezielt charakterisiert werden.

Abstract

Further miniaturization of electronic systems is approaching new limits due to the failure mechanism of electromigration. Electromigration is a diffusion-controlled process and, consequently, influenced by factors such as current density, time and temperature. The migration results in a transport of material and a formation of voids within solder joints and interconnections, which decrease the reliability. In this thesis, the effects of electromigration in solder joints are evaluated by assessing, quantifying and modeling the superimposed failure mechanisms. Recent theoretical approaches are improved by examining the occurring failure mechanisms separately.

A physically based model is derived and insufficiently quantified and qualified relations are discussed. The model is used to determine the main parameters relevant for reliability, which describe the material-dependent, accumulated damage within the framework of a static analysis.

A numerical model is developed to evaluate the theoretical model with varying boundary conditions. Thresholds for the occurrence of electromigration are examined to determine the regions prone to the failure mechanisms depending on the design, loading condition and materials used. As a result a lifetime estimation can ideally be derived. Based on the knowledge of thresholds, an analysis of weak spots can also be conducted in the development of electronic systems and design decisions can be supported.

In order to verify the model in common solder joints with reduced interfering influences, innovative test structures are developed with a local failure region, that is particularly sensitive to the failure mechanism of electromigration. The effects of the imposed failure mechanisms are reduced to the main factors of influence, namely current density, temperature, geometry and the solder material itself. Experiments using $\text{Sn}_{95,5}\text{Ag}_4\text{Cu}_{0,5}$ - and $\text{Sn}_{96,5}\text{Ag}_{3,5}$ - solder joints of different geometry are conducted to determine the model parameters. By minimizing the number of potential driving forces except for those intrinsically required for electromigration, local current densities in range of $7.7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ and temperatures $> 150 \text{ }^\circ\text{C}$ are necessary to generate a failure. The exponent n to describe the dependence of the current density on the reliability results in 2.5. When superimposing the effects, n increases to a value of 4.7. With increasing miniaturization of solder joints it is found that the model has to be improved further to consider the effects of grain rotation and the formation of a bamboo grain structure. These influence the diffusion and lead to an increasing activation energy E_a of 1.18 eV by a factor 1.4 to 2. The model can be used to determine the lifetime of solder joints in the early experimental stage

in advance of a failure. A comparison with existing models for evaluating the lifetime of solder joints indicates a significant improvement of the accuracy.

Based on the presented thesis structures for monitoring the condition regarding the failure mechanism of electromigration can be developed. The effects of electromigration in solder joints as it relates to assembly, packaging technology and materials can be characterized specifically.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	III
Zusammenfassung	IV
Abstract	VI
Symbolverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XVI
1 Einleitung	1
2 Elektromigration in Lotverbindungen	3
2.1 Bedeutung von Lotverbindungen für die Mikrosystemtechnik .	3
2.2 Physikalisches Verständnis der Elektromigration	6
2.2.1 Grundlagen der Thermodynamik	7
2.2.1.1 Diffusion	7
2.2.1.2 Materialflussdichte	11
2.2.2 Diskussion theoretischer Modelle der Elektromigration .	12
2.2.2.1 Impulsübertrag von Leitungselektronen: Bal-	
listisches Modell	13
2.2.2.2 Anisotropes Verhalten und Kornrotation . . .	16
2.2.3 Überlagerte Einflussgrößen	19
2.2.3.1 Materialgefüge, Materialübergänge, intermetal-	
lische Phasen	19
2.2.3.2 Entwurfsbedingt inhomogene Verteilungen der	
Belastungen	22
2.2.3.3 Fehlermechanismus Thermomigration	23
2.2.3.4 Fehlermechanismus Spannungs- bzw. Stressmi-	
gration	24
2.2.3.5 Kurzlängeneffekt (Blech-Effekt)	26
2.2.3.6 Gesamtbeschreibung der überlagerten Einfluss-	
größen	28
2.3 Methoden zur Bewertung der Lebensdauer	29
2.3.1 Analytische Ansätze zur Berechnung der Lebensdauer .	29
2.3.2 Numerische Modellierung der Einflussgrößen	34

2.3.3	Teststrukturen und Messverfahren zur Ausfalldetektion	39
3	Vereinfachtes Modell zur Bewertung der Schädigung durch Elektromigration	43
3.1	Beschreibung der Porengeometrie bei zunehmender Schädigung	43
3.2	Berechnung der Lebensdauer in Abhängigkeit der Porengeometrie und der Widerstandsänderung	47
3.3	Berücksichtigung der Eigenerwärmung bei zunehmender Migration	49
3.4	Randbedingungen zur Verwendung des Modells	52
4	Entwicklung von elektromigrationssensitiven Indikatorstrukturen	55
4.1	Separation überlagerter Einflussgrößen in <i>Flip-Chip</i> -Lotkontakten	56
4.2	Entwicklung unter Verwendung der Finite-Elemente-Analyse	57
4.2.1	Bestimmung der Lotausbildung im Umschmelzprozess	57
4.2.2	Aufbau der Lotverbindung als parametrisiertes Modell	58
4.2.3	Theoretische Betrachtung des elektrischen Widerstands und des kritischen Produkts der Lotverbindung	61
4.3	Prozessablauf zur Fertigung von Lotverbindungen mit konkaver Geometrie	63
4.4	Konzeptionierung und Aufbau der Messumgebung	65
4.5	Vorbetrachtung: <i>Flip-Chip</i> -Struktur zur Untersuchung überlagerter Einflussgrößen	67
4.5.1	Prozessschritte und numerische Verifikation der Randbedingungen	68
4.5.2	Versuchsplanung der Pilotversuche	71
4.5.3	Ausfallcharakteristik und Bestimmung der Lebensdauer	72
5	Aufbau einer optimierten Indikatorstruktur und Versuchsdurchführung	77
5.1	Teststruktur zur gezielten Untersuchung des Ausfallverhaltens unterschiedlicher Lotgeometrien bei minimierten Einflussgrößen	77
5.2	Verifizierung des Designs und Ableitung der Lebensdauerberechnung unterstützt durch die Finite-Elemente-Analyse	79
5.3	Prozessschritte zur Fertigung der Indikatorstruktur	85
5.4	Statistische Versuchsplanung	87
6	Auswertung und Diskussion der Ergebnisse	93
6.1	Verjüngte Lotgeometrie mit reduzierten Einflussgrößen	93
6.1.1	Gefügeveränderung und Ausfallcharakteristik	93

6.1.2	Bestimmung der Lebensdauer und Ableitung der Modellparameter	98
6.1.3	Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit den Modellen	102
6.2	Vergleichende Untersuchung: Indikatorstruktur mit konvexer Lotgeometrie	108
6.2.1	Prozessschritte und numerische Verifikation der Randbedingungen	108
6.2.2	Versuchsplanung der vergleichenden Untersuchungen . .	110
6.2.3	Ausfallcharakteristik und Bestimmung der Lebensdauer	111
6.2.4	Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit den Modellen	115
6.3	Zusammenfassung der Ergebnisse von Modell und Experiment .	119
6.4	Ausblick	121
A	Anhang	123
A.1	Auswertung der Messwerte zur Bestimmung der Modellparameter	123
	Verzeichnis der Publikationen im Rahmen der vorliegenden Dissertation	129
	Literaturverzeichnis	130

Symbolverzeichnis

A	Proportionalitätsfaktor, Gleichung nach Black
A_F	Von der Stromstärke I durchflossene Querschnittsfläche [m^2]
B	Proportionalitätsfaktor, Gleichung nach Shatzkes
B_x	Variable zur Lösung der Differentialgleichungen
C	Allgemeine Betrachtung der Konzentration [m^{-3}]
C_a	Konzentration der Atome [m^{-3}]
C_x	Variable zur Lösung der Differentialgleichungen
$C_{\nu,0}$	Konzentration der Leerstellen, Ausgangszustand [m^{-3}]
$C_{\nu,f}$	Kritische Konzentration an Leerstellen, bei der ein Ausfall auftritt [m^{-3}]
C_{ν}	Konzentration der Leerstellen [m^{-3}]
$C_{a,0}$	Konzentration der Atome, Ausgangszustand [m^{-3}]
$C_{a,f}$	Kritische Konzentration an Atomen, bei der ein Ausfall auftritt [m^{-3}]
C_d	Konzentration diffundierender Atome [m^{-3}]
D	Diffusionskoeffizient [$m^2 \cdot s^{-1}$]
D_0	Diffusionskonstante [$m^2 \cdot s^{-1}$]
D_a	Diffusionskoeffizient für Atomdiffusion [$m^2 \cdot s^{-1}$]
D_{ν}	Diffusionskoeffizient für Leerstellendiffusion [$m^2 \cdot s^{-1}$]
E	Elastizitätsmodul [Pa]
E_a	Aktivierungsenergie [eV]
E_{del}	Volumen der entfernten Elemente, Numerik
E_{ges}	Gesamtvolumen der Elemente, Numerik
$F(t)$	Weibull-Verteilungsfunktion
F_a	Parametrisierbare Funktion, Numerik

I	Elektrische Stromstärke [A]
M	Ionenbeweglichkeit [$m \cdot s^{-1} \cdot N^{-1}$]
N	Avogadro Konstante [mol^{-1}]
N_E	Anzahl an Volumina im Ausfallbereich, Numerik
P	Leistung [W]
Q	Wärme [J]
Q^*	Wärmetransport [eV]
R	Elektrischer Widerstand [Ω]
R_0	Elektrischer Ausgangswiderstand [Ω]
R_{mig}	Reaktionsrate, aus der sich die Elektromigration ergibt
R_{th}	Thermischer Widerstand [$K \cdot W^{-1}$]
T	Temperatur [K]
T_0	Ausgangstemperatur [K]
T_s	Schmelztemperatur [K]
T_{Op}	Temperatur, Betriebsbedingung [K]
T_{Str}	Temperatur, Stressbedingung [K]
T_{cr}	Kritische Temperatur [K]
U	Elektrische Spannung [V]
V	Volumen [m^3]
V_a	Volumen der Atome [m^3]
V_c	Kritisches Volumen, bei dem ein Ausfall auftritt [m^3]
V_ν	Volumen der Leerstellen [m^3]
W	Elektrische Arbeit [J]
W_{pot}	Potentielle Energie [J]
Z	Elektrische Ladungszahl
Z^*	Effektive Ladungszahl
Z_{el}^*	Nominelle Ladungszahl in Bezug auf die elektrostatische Kraft
Z_{wd}^*	Ladungszahl in Bezug auf die Kraftwirkung des Elektronenwinds
Δ	Delta
ΔG	Gibbssche freie Energie [J]
ΔG_f	Leerstellengenerationsenergie [J]
ΔG_m	Wanderungsenergie [J]
ΔH_{bd}	Bindungsenergie der Atome im ungestörten Gitter [J]
ΔH_f	Leerstellengenerationsenthalpie [J]
ΔH_m	Wanderungsenthalpie [J]

ΔS_f	Leerstellengenerationsentropie [$J \cdot K^{-1}$]
ΔS_m	Wanderungsentropie [$J \cdot K^{-1}$]
ΔW	Änderung der potentiellen Energie [J]
Δl	Länge eines Leiterabschnitts [m]
Δx_k	Kritische Länge [m]
Δz	Zunehmender Abstand von Chip und Substrat [m]
Ω	Atomvolumen [m^3]
Θ	Winkel zwischen der c_k -Achse und \vec{j} [$^\circ$]
α	Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands [K^{-1}]
α_A	Proportionalitätsfaktor
α_i	Winkel zwischen der Flächennormalen und der Stromdichte im homogenen Feld [$^\circ$]
α_l	Ausdehnungskoeffizient [$m \cdot K^{-1}$]
β	Weibull-Formfaktor
δ	Weite des Diffusionspfads [m]
ϵ	Dehnung
ϵ_k	Kritische Dehnung
λ	Spezifische Wärmeleitfähigkeit [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$]
μ	Chemisches Potential / Beweglichkeit [$J \cdot mol^{-1}$]
μ_d	Anteilige Beweglichkeit durch Streuung an diffundierenden Ionen [$J \cdot mol^{-1}$]
∇	Gradient
ν	Austauschfrequenz [s^{-1}]
ν^+	Austauschfrequenz in Richtung der Kraft [s^{-1}]
ν^-	Austauschfrequenz entgegen der Kraft [s^{-1}]
ν_D	Debye-Frequenz [s^{-1}]
ν_n	Differenzfrequenz [s^{-1}]
ν_{poi}	Poissonzahl / Querkontraktionszahl
\bar{j}	Mittelwert der Stromdichte [$A \cdot m^{-2}$]
ρ	Spezifischer elektrischer Widerstand, temperaturabhängig [$\Omega \cdot m$]
ρ_0	Spezifischer elektrischer Widerstand [$\Omega \cdot m$]
ρ_{Dens}	Dichte [$kg \cdot m^{-3}$]
ρ_d	Anteiliger spezifischer Widerstand aufgrund der Streuung an diffundierenden Ionen [$\Omega \cdot m$]
σ	Mechanische Spannung [$N \cdot m^{-2}$]
σ_k	Kritische mechanische Spannung [$N \cdot m^{-2}$]
σ_{sa}	Standardabweichung

τ_{col}	Relaxationszeit zwischen zwei Kollisionen mit diffundierenden Ionen [s]
φ	Winkel zwischen \vec{E} und \vec{j} [°]
\vec{A}_F	Flächennormale von A_F
\vec{E}	Elektrische Feldstärke [$V \cdot m^{-1}$]
\vec{E}_{a_k}	Elektrische Feldstärke entlang der a_k -Achse im Kristallgitter [$V \cdot m^{-1}$]
\vec{E}_{c_k}	Elektrische Feldstärke entlang der c_k -Achse im Kristallgitter [$V \cdot m^{-1}$]
\vec{F}	Kraftwirkung [N]
\vec{F}_D	Kraft aufgrund von Materialinhomogenitäten [N]
\vec{F}_{EM}	Kraftwirkung der Elektromigration [N]
\vec{F}_{SM}	Kraftwirkung der Spannungsmigration [N]
\vec{F}_{TM}	Kraftwirkung der Thermomigration [N]
\vec{F}_{el}	Elektrostatische Kraft [N]
\vec{F}_{wd}	Kraft aufgrund des Impulsübertrages des Elektronenwinds [N]
\vec{J}	Materialflussdichte [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{J}_{EM}	Materialflussdichte aufgrund von Elektromigration [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{J}_{SM}	Materialflussdichte aufgrund von Spannungsmigration [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{J}_{TM}	Materialflussdichte aufgrund von Thermomigration [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{J}_{ν, a_k}	Materialflussdichte der Leerstellen entlang der a_k -Achse im Kristallgitter [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{J}_{ν, c_k}	Materialflussdichte der Leerstellen entlang der c_k -Achse im Kristallgitter [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{J}_{ν}	Materialflussdichte der Leerstellen [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{J}_a	Materialflussdichte der Atome [$m^{-2} \cdot s^{-1}$]
\vec{j}	Stromdichte, richtungsabhängig [$A \cdot m^{-2}$]
\vec{j}_k	Kritische Stromdichte [$A \cdot m^{-2}$]
\vec{p}	Impuls [$N \cdot s$]
\vec{v}_d	Mittlere Driftgeschwindigkeit diffundierender Atome [$m \cdot s^{-1}$]
\vec{v}_e	Driftgeschwindigkeit des Elektrons [$m \cdot s^{-1}$]
a	Gesamtdurchmesser des Volumenelements [m]

a_k	Gitterkonstante [m] bzw. entsprechende Achse im Kristallgitter
a_0	Atomabstand [m]
$b(t)$	Breite der Pore [m]
b_k	Gitterkonstante [m] bzw. entsprechende Achse im Kristallgitter
c	Höhe der Pore [m]
c_k	Gitterkonstante [m] bzw. entsprechende Achse im Kristallgitter
c_s	Spezifische Wärmekapazität [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
c_x	Proportionalitätsfaktor zur Berücksichtigung lokaler Stromdichtezunahmen
e	Elementarladung [C]
e^-	Symbolisierung der Elektronen mit deren negativer Elementarladung
f	Korrelationsfaktor $\in [0..1]$
h	Breite des Diffusionspfads [m]
h_c	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$]
i	Laufvariable bzw. Laufindex
j	Stromdichte im homogenen elektrischen Feld [$A \cdot m^{-2}$]
j_{Op}	Stromdichte, Betriebsbedingung [$A \cdot m^{-2}$]
j_{Str}	Stromdichte, Stressbedingung [$A \cdot m^{-2}$]
k	Boltzmann-Konstante [$eV \cdot K^{-1}$]
l	Länge eines Volumenelements bzw. Leiters [m]
l_x	Länge der kompletten Lotverbindung [m]
m	Diskreter Zeitschritt, Numerik
m_0	Ruhemasse des Elektrons [kg]
m_{eff}	Effektive Masse des Elektrons [kg]
n	Exponent zur Beschreibung der Stromdichteabhängigkeit
n_E	Anzahl an Elementen im Ausfallbereich, Numerik
n_c	Anzahl der Nachbaratome im Kristallgitter
n_e	Anzahl der Elektronen pro Volumen [m^{-3}]
t	Zeit [s]
$x(t)$	Normierte Breite der Pore $\in [0..1]$
x_a	Abstand [m]

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
Ag	Silber, chemisches Element
AK	Ankontaktierung
Al	Aluminium, chemisches Element
Au	Gold, chemisches Element
BGA	<i>Flip-Chip</i> -Aufbau mit Kugelgitteranordnung (engl. <i>Ball Grid Array</i>)
Bi	Bismut, chemisches Element
C4	<i>Controlled Collapse Chip Connection</i> - Technologie
Cu	Kupfer, chemisches Element
EDX	Energiedispersive Röntgenmikrobereichsanalyse (engl. <i>Energy Dispersive X-ray</i>)
EM	Elektromigration
FCOB	engl. <i>Flip-Chip on Board</i>
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FR4	engl. <i>Flame Retardant 4</i> , Materialbezeichnung
Gl.	Gleichung
IMC	Intermetallische Phase (engl. <i>Intermetallic Compound</i>)
kfz	Kubisch-flächenzentriert
KG	Korngrenze als Diffusionspfad
Lot	Lotwerkstoff (engl. <i>Bump</i>)
MT	Messtechnik
MTTF	Mittlere Zeit bis zum Ausfall (engl. <i>Mean Time To Failure</i>)
N	Stickstoff, chemisches Element
Ni	Nickel, chemisches Element
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
O	Sauerstoff, chemisches Element
OF	Oberfläche als Diffusionspfad
P	Phosphor, chemisches Element
Pb	Blei, chemisches Element
PCB	Leiterplatte (engl. <i>Printed Circuit Board</i>)

REM	Raster-Elektronen-Mikroskop
rrz	Rhombisch-raumzentriert
Sb	Antimon, chemisches Element
Si	Silizium, chemisches Element
SM	Spannungs- bzw. Stressmigration
Sn	Zinn, chemisches Element
ST	Substrat
STIDF	Oberflächenspannungs-induzierte Kraftwirkung (engl. <i>Surface Tension Induced Driving Force</i>)
TCR	Temperaturabhängiger Widerstandskoeffizient (engl. <i>Temperature Coefficient of Resistance</i>)
Ti	Titan, chemisches Element
TM	Thermomigration
trz	Tetragonal-raumzentriert
TTF	Zeit bis zum Ausfall (engl. <i>Time To Failure</i>)
UBM	Unter- <i>Bump</i> Metallisierung (engl. <i>Under Bump Metallisation</i>)
UE	Übergangsbereich
Vol	Gitter, Volumen als Diffusionspfad
W	Wolfram, chemisches Element
Zn	Zink, chemisches Element

1 Einleitung

Die zunehmende Miniaturisierung von Mikrosystemen wird u. a. durch den Fehlermechanismus Elektromigration limitiert. Elektromigration (EM) führt zu einem Transport von Material in Werkstoffen, die einer hohen elektrischen Stromdichte ausgesetzt sind. Lotverbindungen stellen in mikroelektronischen Systemen bei hoher Packungsdichte die elektrische, mechanische und thermische Kontaktierung von Systemebenen und -komponenten dar. Sich in den Strukturen durch Elektromigration bildende Leerstellen akkumulieren zu Poren, die zu einer Kontaktunterbrechung führen können. Damit wird die Zuverlässigkeit des Gesamtsystems herabgesetzt. Stetig zunehmende Stromdichten bei gleichzeitiger Miniaturisierung der Strukturen verstärken diesen Prozess, dessen Auswirkung damit für die Mikrosystemtechnik an Bedeutung gewinnen wird. Im jährlich überarbeiteten „Internationalen Technologieplan für Halbleiter“ (engl. *International Technology Roadmap for Semiconductors*) werden aktuelle und zukünftige Trends der Halbleiterbranche diskutiert, [63]. In Bezug auf die Zuverlässigkeit von elektrischen Verbindungen wird die Berücksichtigung der Elektromigration dort im Abschnitt „Modellierung und Simulation“ (engl. *Modeling and Simulation*) als wichtig eingestuft.

„Interconnects continue to play an important role as a limiting factor for staying in pace with Moore’s law to double the transistor and interconnect densities every 2 years. [...] Concerning reliability, electromigration, stress voiding and extrusion are most important aspects.“[63]

Zudem wird im Abschnitt „Herausforderungen beim Aufbau und Verpacken“ (engl. *Assembly and Packaging Difficult Challenges*) darauf hingewiesen, dass die relevanten Mechanismen modelliert und zukünftig gegebenenfalls Materialien substituiert werden müssen.

„Electromigration will become a more limiting factor. It must be addressed through materials changes together with thermal/mechanical reliability modeling.“[63]

Diese allgemeinen Aussagen treffen sowohl auf Leiterbahnen als auch auf Lotverbindungen zu. Bei einer physikalischen Beschreibung des Mechanismus

müssen unterschiedliche Modelle berücksichtigt werden. Insbesondere die Abhängigkeit von äußeren Einflussfaktoren ist nicht befriedigend qualifiziert und quantifiziert, da deren analytische Modelle nicht ausreichend erarbeitet sind. In Lotverbindungen wird die Elektromigration insbesondere durch die Auswirkungen einer durch die Geometrie bedingten inhomogenen Verteilung der Stromdichte, durch Temperaturgradienten, thermo-mechanischen Stress und zeitabhängige Materialveränderungen der anfälligen Metallurgie beeinflusst. Bestehende Ansätze zur Bewertung von Systemen basieren überwiegend auf einer Gleichung aus dem Jahre 1967 [12] und berücksichtigen die aufgeführten weiteren Effekte meist nicht. Diese beeinflussen jedoch die Elektromigration in Lotverbindungen von Beginn an, sind deren Resultat oder treten nur unter bestimmten Randbedingungen auf. Grundlage für die Herleitung der zu Grunde liegenden Theorie sowie die Beurteilung der Zuverlässigkeit sind experimentelle Untersuchungen. Aufgrund der Komplexität von Lotkonfigurationen (Materialzusammensetzung, Geometrie, Metallurgie, etc.) sind Untersuchungsergebnisse zur Elektromigration von verschiedenen Arbeitsgruppen nur bedingt vergleichbar. Quantitative Bewertungen der Lebensdauer von Lotverbindungen unter Strombelastung sind daher derzeit oft stark fehlerbehaftet und können zudem nur für einfache Strukturen erhoben werden.

Das Verständnis der Elektromigration in Lotverbindungen muss derart erweitert werden, dass die Lebensdauer mit einem physikalischen Modell ermittelt werden kann. Die Modellvorstellung und der Fehlermechanismus müssen experimentell und numerisch für zunehmend miniaturisierte Verbindungen verifiziert werden. Entsprechende Teststrukturen sind abzuleiten und relevante Materialparameter zu bestimmen. Randbedingungen für das Auftreten der Mechanismen müssen beschrieben werden, um eine Signifikanzanalyse der Auswirkungen durchführen zu können. Um ein entsprechendes Fehlermodell aufstellen zu können, wird in der vorliegenden Arbeit ein Ansatz verfolgt, mit dem es möglich ist, die bei kombinierter Belastung von hohen Stromdichten und Temperaturen resultierenden Fehlermechanismen isoliert zu untersuchen.

2 Elektromigration in Lotverbindungen

2.1 Bedeutung von Lotverbindungen für die Mikrosystemtechnik

Die stoffschlüssige Verbindung von Systemebenen bei der Aufbau- und Verbindungstechnik in der Mikroelektronik wird typischerweise durch Drähte und Lote realisiert. Die *Flip-Chip*-Technologie mit Lotverbindungen wurde 1969 als C4 (engl. *Controlled Collapse Chip Connection*)-Technologie von IBM eingeführt, [112]. Halbleiterchips mit entsprechenden Lotverbindungen (engl. *Bumps*) werden direkt mit ihrer aktiven Kontaktierungsseite auf ein Substrat montiert, die *Bumps* aufgeschmolzen und über die Lotverbindungen wird der Kontakt hergestellt (engl. *Flip-Chip on Board*, FCOB). Diese Technologie bietet die Vorteile einer elektrischen, thermischen und mechanischen Ankontaktierung bei hoher Packungsdichte und kurzen elektrischen Verbindungen, [123]. Es werden keine zusätzlichen Draht- oder Kupferstrukturen zur Kontaktierung benötigt, sodass der Flächenbedarf dem der Schaltung entspricht, [54]. Abbildung 2.1 zeigt einen typischen *Flip-Chip*-Aufbau schematisch.

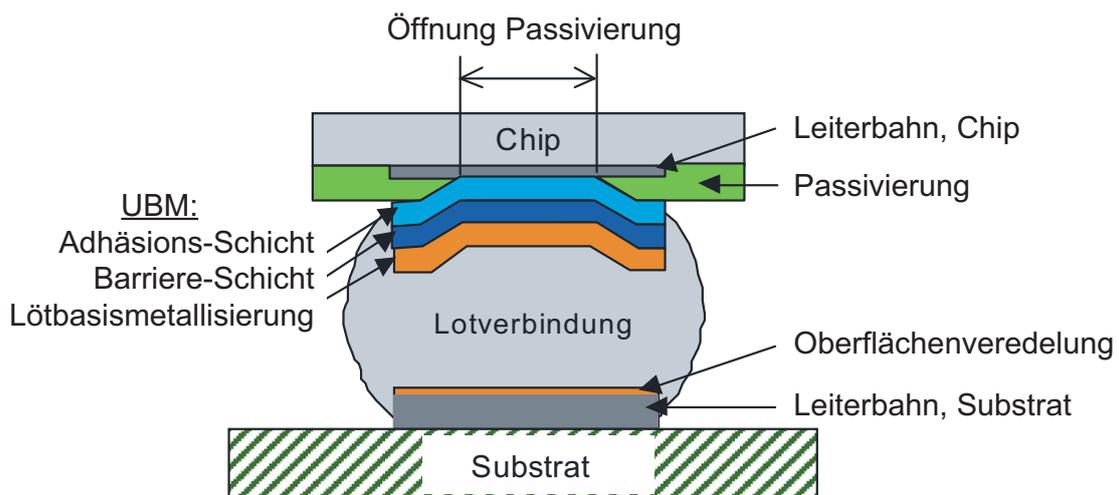


Abbildung 2.1: Schematischer Aufbau einer *Flip-Chip*-Struktur, nach [68]

Die Materialien und Geometrien der „Unter-Bump Metallisierung“ (engl. *Under Bump Metallisation*, UBM), Leiterbahnen, Lotverbindungen sowie des

Chips und Substrats werden je nach Aufbau angepasst.

Die einzelnen Prozessschritte des FCOB umfassen die Prozessierung einer Halbleiterscheibe (engl. *Wafer*), den Lotauftrag, die Vereinzelung, die Montage auf dem Substrat und den Lötprozess. Meist wird der kontaktierte Chip abschließend zur mechanischen Stabilisierung mit einem Epoxid unterfüllt. Bei der herkömmlichen *Flip-Chip*-Technologie wird ein Silizium-*Wafer* als Ausgangsmaterial genutzt. Auf diesem werden Haftvermittler und Barrieren, Leiterbahnen und Landeflächen für die Lotverbindung abgeschieden. Die Strukturierung erfolgt über den Einsatz von Fotolack und materialabtragenden Ätzprozessen. Eine nichtmetallische Passivierungsschicht schützt die abgeschiedenen Metalle vor Korrosion. Diese ist nur im Bereich der Landeflächen geöffnet. In diesen Öffnungen werden zur Vorbereitung des Lot-Auftrags weitere metallische Schichten wie Haftvermittler, eventuelle Diffusionsbarrieren und Oberflächenveredelungen abgeschieden. Dieser Schichtaufbau wird als UBM bezeichnet. Die Lotdeposition erfolgt auf dieser UBM. Seit dem gesetzlich geregelten Bleiverbot in elektronischen Produkten wird die Vielzahl an Materialkombinationen für bleifreie Lotverbindungen stetig weiterentwickelt und erweitert, [9]. Abbildung 2.2a gibt einen Überblick der qualitativen Verwendung unterschiedlicher bleifreier Lotsysteme. Demnach werden überwiegend Zinn(Sn)-Silber(Ag)-Kupfer(Cu)-Lotsysteme eingesetzt, deren Zusammensetzung Abbildung 2.2b entspricht.

Zu den bedeutensten Verfahren der Lotabscheidung zählen die galvanische

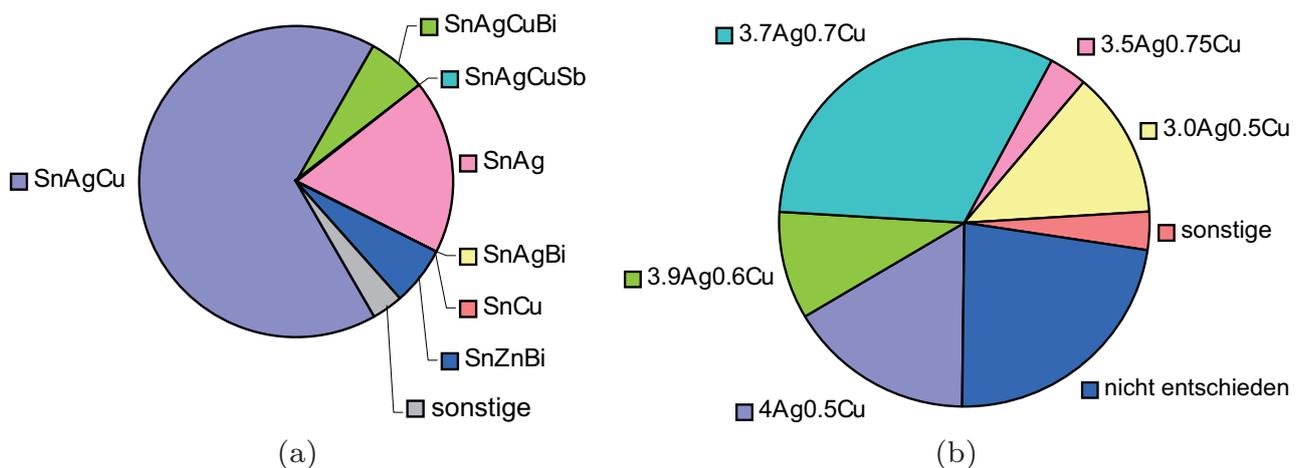


Abbildung 2.2: a) Verwendung von bleifreien Lotzusammensetzungen im qualitativen Überblick, nach [1],
 b) SnAgCu-Lotzusammensetzungen nach Häufigkeit; Bestandteile der jeweiligen Elemente neben Sn in Prozent, nach [1]

und stromlose Abscheidung, der Lotpasten-Druck, das Aufbringen vorgefertigter Lotkugeln sowie das mechanische Aufbringen von *Bumps* (engl. *ball, stud bumping*), [52] [123]. Mit der galvanischen Abscheidung können insbesondere *Bumps* mit Abmessungen und Abständen von wenigen Mikrometern hergestellt werden. Mit dem Lotpasten-Druckverfahren können Strukturen verschiedener Lotzusammensetzungen mit Abstandsmaßen bis zu $60\ \mu\text{m}$ hergestellt werden, [108]. Nachteilig sind die vergleichsweise hohen Schwankungen der gedruckten Lotvolumina, [57]. Bei Verwendung von vorgefertigten Lotkugeln werden diese im Schablonendruckverfahren auf die UBM aufgesetzt, [109]. Die Lotkugeln zeichnen sich bei Durchmessern bis minimal $100\ \mu\text{m}$ durch Volumina hoher Konstanz aus. Bei der stromlosen Abscheidung erfolgt die *Bump*-Erzeugung durch eine außenstromlose Metallabscheidung in chemischer Lösung. Beim *stud bumping* werden entsprechende Drahtmaterialien verwendet, die nach dem Kontaktieren des Drahts auf den Chip durchtrennt werden, sodass Kontakthöcker entstehen, [71]. Letzteres eignet sich speziell für Einzel-*Bumps*.

Im Anschluss an den Lotauftrag werden die aufgetragenen Lotdepots mit einem auf die Lotlegierung abgestimmten Temperaturprofil zu *Bumps* umgeschmolzen. Das Lot bildet sich aufgrund dem Bestreben einer Minimierung der Oberflächenenergie in der flüssigen Phase annähernd zu einer Kugel aus. Ein flüchtiges Flussmittel reduziert die Oxide auf den Oberflächen von Lot und UBM und entfernt Verunreinigungen.

Die genannten Prozessschritte sind in Abbildung 2.3 zusammengefasst für den Lotpastendruck dargestellt.

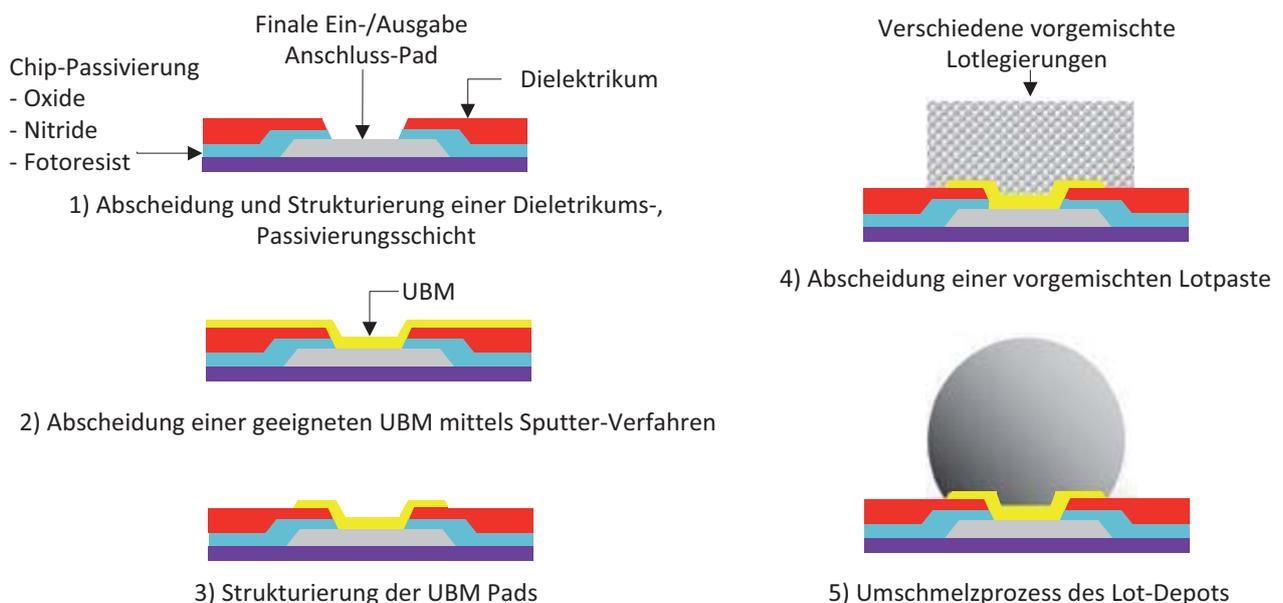


Abbildung 2.3: *Wafer*-Prozessierung und Lotdeposition am Beispiel des Lotpastendrucks, nach [50]

Anschließend wird der *Wafer* gereinigt und die vereinzelt *Flip-Chip*-Strukturen werden auf den Schaltungsträger aufgesetzt und mit diesem verlötet. Das Anschlussraster auf dem Schaltungsträger ist entsprechend zur Anordnung auf dem Chip gespiegelt. Ein Flussmittel zur Oberflächenaktivierung und Reinigung der Kontaktstellen wird verwendet. Das Lot bildet durch Interdiffusion und die Bildung intermetallischer Phasen eine feste metallurgische Verbindung mit den Anschlussmetallisierungen des Chips und Schaltungsträgers. Die Form der Lotverbindung wird durch das Bestreben der Minimierung der Oberflächenenergie im flüssigen Zustand bestimmt. Durch die relativ hohe Oberflächenenergie des Lots sinkt der Chip nicht auf den Schaltungsträger ab. Es stellt sich ein berechenbarer Abstand (engl. *Stand-Off*) ein. Die Oberflächenenergie aller *Bumps* eines Chips wird minimiert, sodass leicht versetzt montierte Chips in der Flüssigphase durch die Oberflächenspannung des Lots in eine zentrierte Position gezogen werden, [118].

Zu den Fehlerursachen in Lotverbindungen zählen insbesondere thermo-mechanische Kräfte durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten von Chip und Substrat. Zur Steigerung der Zuverlässigkeit werden *Flip-Chips* unterfüllt, d.h. der Zwischenraum zwischen Chip und Substrat wird mit einem Epoxid-Harz-Gemisch gefüllt. Insbesondere die thermo-mechanisch induzierten Kräfte werden auf diese Weise in den Lotverbindungen reduziert, [124]. Diese Fehlermechanismen wurden in den vergangenen Jahren weitreichend untersucht. Mit zunehmender Miniaturisierung steigen in den elektronischen Systemen die Stromdichten an, da diese nicht in gleicher Weise wie die Skalierung der Abmessungen abnehmen. Die Elektromigrationsanfälligkeit von Lotverbindungen könnte daher einen limitierenden Faktor für die zukünftige Miniaturisierung elektronischer Systeme darstellen. Der Fehlermechanismus wird an Bedeutung gewinnen und muss in der Produktentwicklung berücksichtigt werden.

2.2 Physikalisches Verständnis der Elektromigration

Die Auswirkungen der Elektromigration sind in Leiterbahnen seit den 70er Jahren bekannt und wurden weitreichend erforscht. Leiterbahnen werden als einphasige, lineare Systeme beschrieben und können zur Beschreibung des Effekts meist als zweidimensionaler Aufbau betrachtet werden. Unter der Einwirkung von Temperatur und Stromdichten im Bereich von 10^6 A/cm^2 wurden die Bildung von Poren und der Ausfall von Systemen beobachtet, [144]. Der Werkstoff Kupfer zeigte sich dabei als resistenter im Vergleich zu Aluminium-

Leiterbahnen und wird heute in den meisten Chips verwendet. 1998 wurde erstmals in elektrischen Lotverbindungen gezeigt, dass eine Elektromigration auch bei relativ niedrigen Stromdichten auftritt, [22] [144]. Der Effekt muss im Gegensatz zum Modell der Leiterbahnen aufgrund der Geometrien und wechselnden Materialien dreidimensional betrachtet werden. Die Literaturrecherche ergab, dass eine mittlere Stromdichte von $2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ in den zugrunde liegenden Experimenten zu Ausfällen durch EM führte. Eine Stromdichte von 10^4 A/cm^2 gilt als Grenzwert für das Auftreten von EM. Die Versuche werden typischerweise bei Temperaturen von $130 \text{ °C} \pm 45 \text{ °C}$ durchgeführt. Als Temperaturgrenze für das Auftreten von Elektromigration wird für Grundmaterialien eine kritische Temperatur von $T_{cr} < 3/4 T_s$ gegenüber der Schmelztemperatur T_s angegeben. Für polykristalline, dünne Schichten beträgt die kritische Temperatur $T_{cr} < 1/2 T_s$, [145].

Hauptwerkstoffe der untersuchten Lotverbindungen sind bleihaltige Lote und nur zu einem Drittel bleifreie Verbindungen. Durch den geringen Schmelzpunkt weisen Lotwerkstoffe ein hohes Diffusionsvermögen der Atome auf. Der zugrunde liegende physikalische Mechanismus der Elektromigration in Lotverbindungen und Leiterbahnen ist identisch.

2.2.1 Grundlagen der Thermodynamik

Bei der Elektromigration handelt es sich um einen diffusionsgesteuerten Prozess, dessen Mechanismen durch die Grundgleichungen der Thermodynamik beschrieben werden können. Werden die physikalischen Parameter im Folgenden ohne vektorielle Abhängigkeit beschrieben, so handelt es sich stets um deren richtungsabhängigen Betrag.

2.2.1.1 Diffusion

Diffusion beschreibt die Ausbreitung von Atomen unterschiedlicher Materialien bis zu einer vollständigen Durchmischung. Der zugrunde liegende Mechanismus der Diffusion ist die Sprungbewegung der Atome infolge einer thermischen Anregung. Voraussetzung dafür ist, dass der Festkörper Fehlstellen und Fremdatome aufweist. Die Diffusionsmechanismen werden in Leerstellen-, interstitielle Diffusion und Ringtausch von Atomen unterschieden, [10]. Bei Metallen überwiegt die Leerstellendiffusion, bei der es zu einem Austausch von Atomen und Leerstellen durch Überwindung der Potentialbarriere kommt. Bei isotropen Materialien ist die Wahrscheinlichkeit der Atombewegung in alle Richtungen gleich und damit auch die Austauschfrequenz ν der Atome, Gl. 2.1, [145].

$$\nu = \nu_D \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_m}{k \cdot T}\right) \quad (2.1)$$

ν_D ist definiert als Debye-Frequenz und beschreibt die Vibrationsfrequenz der Atome im Festkörper, ΔG_m ist definiert als Wanderungsenergie, k ist die Boltzmann-Konstante und T gibt die Temperatur an.

Den Verlauf der potentiellen Energie W_{pot} ohne Krafteinwirkung zeigt Abbildung 2.4a. Unter dem Einfluss einer gerichteten Kraftwirkung \vec{F} verschiebt sich der Verlauf der potentiellen Energie, Abb. 2.4b.

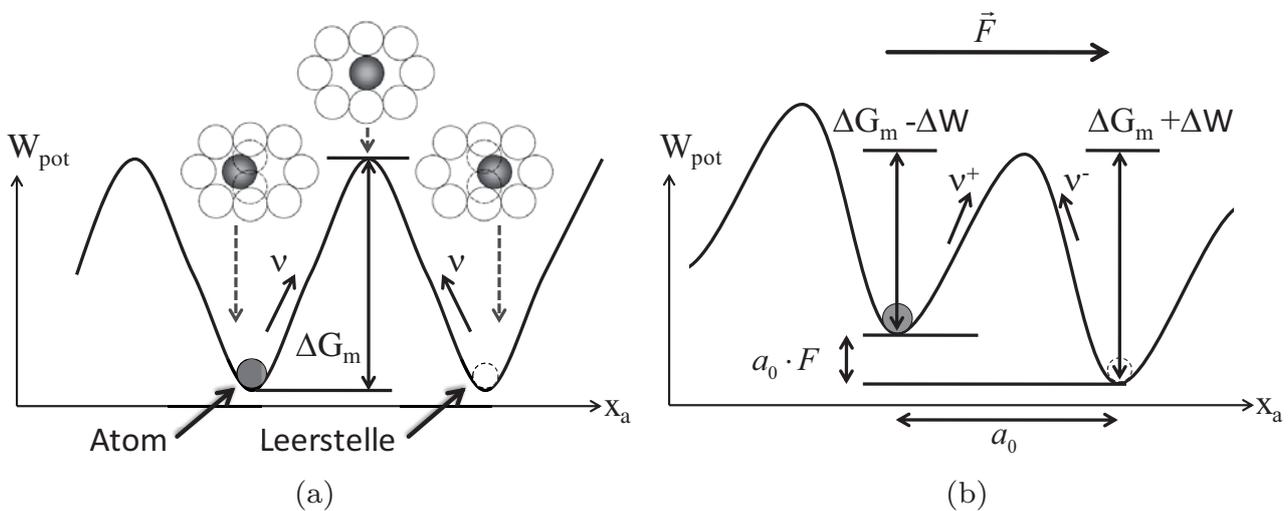


Abbildung 2.4: Potentielle Energieniveaus aufgetragen über dem Abstand x_a von Atomen: a) ohne Kraftwirkung, nach [139] [145], b) Verschiebung unter dem Einfluss einer externen Kraft \vec{F} , nach [139] [145]

ΔG_m erhöht bzw. verringert sich pro Atomabstand a_0 um den Wert ΔW , Gl. 2.2, [145].

$$\Delta W = F \cdot \frac{a_0}{2} \quad (2.2)$$

Für einen Platzwechsel mit der Krafrichtung ist die Potentialbarriere um den Wert ΔW reduziert, für einen Wechsel entgegen der Krafrichtung muss die Energie ΔW zusätzlich aufgebracht werden, Abb. 2.4b.

Die Austauschfrequenz ν des Platzwechsels ist somit richtungsabhängig und wird beschrieben durch die Gleichungen 2.3 und 2.4, [145].

$$\nu^+ = \nu \cdot \exp\left(+F \cdot \frac{a_0}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (2.3)$$

$$\nu^- = \nu \cdot \exp\left(-F \cdot \frac{a_0}{2 \cdot k \cdot T}\right) \quad (2.4)$$

ν^+ beschreibt die Austauschfrequenz in positiver x-Richtung, ν^- in die Gegenrichtung. Die Differenzfrequenz ν_n ergibt sich unter der Annahme einer linearen Diffusion, $\frac{F \cdot a_0}{2 \cdot k \cdot T} \ll 1$, zu Gleichung 2.5, [145].

$$\begin{aligned} \nu_n &= \nu^+ - \nu^- = 2 \cdot \nu \cdot \sinh\left(\frac{F \cdot a_0}{2 \cdot k \cdot T}\right) \\ &= \nu \cdot \frac{a_0 \cdot F}{k \cdot T}. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Die mittlere Driftgeschwindigkeit v_d läßt sich gemäß Gleichung 2.6 berechnen, [145].

$$\begin{aligned} v_d &= a_0 \cdot \nu_n = \nu \cdot \frac{a_0^2}{k \cdot T} \cdot F \\ &= M \cdot F \\ &= D \cdot \frac{F}{k \cdot T} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Der Faktor M beschreibt die Atombeweglichkeit. Die Gleichung für den Diffusionskoeffizienten $D = \nu \cdot a_0^2$ gilt für den Fall, dass das Atom die Position über eine Leerstelle in unmittelbarer Nachbarschaft ändert.

Unter Berücksichtigung der Wahrscheinlichkeit, dass ein Atom von einer Leerstelle umgeben ist, ergibt sich für den Diffusionskoeffizienten Gleichung 2.7 [145] mit dem Korrelationsfaktor f , der die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein diffundierendes Atom nicht seinen ursprünglichen Platz wieder einnimmt, ΔG_f als benötigte Energie, um ein Atom aus dem Kristallgitter zu entfernen und n_c als der Anzahl an Nachbaratomen.

$$\begin{aligned} D &= f \cdot \nu \cdot a_0^2 \cdot n_c \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_f}{k \cdot T}\right) \\ &= f \cdot \nu_D \cdot a_0^2 \cdot n_c \cdot \exp\left(-\frac{\Delta G_m + \Delta G_f}{k \cdot T}\right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Für das kubisch-flächenzentrierte Kristallgitter (kfz) gelten z.B. $n_c = 12$ und $f = 0,78$, d.h. 78 % der diffundierenden Atome wechseln nicht auf ihren Ausgangsgitterplatz zurück, [145] [129].

Die Gibbsche freie Energie ΔG entspricht immer der Differenz der Enthalpie ΔH und des Entropieterms $T \cdot \Delta S$, [145]. Damit ergibt sich der Diffusionskoeffizient D zu Gleichung 2.8 mit der Diffusionskonstanten D_0 nach Gleichung 2.9, [145]:

$$D = f \cdot a_0^2 \cdot \nu_D \cdot n_c \cdot \exp\left(\frac{\Delta S_m + \Delta S_f}{k}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_m + \Delta H_f}{k \cdot T}\right) \\ = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{\Delta H_m + \Delta H_f}{k \cdot T}\right), \quad (2.8)$$

mit

$$D_0 = f \cdot a_0^2 \cdot \nu_D \cdot n_c \cdot \exp\left(\frac{\Delta S_m + \Delta S_f}{k}\right). \quad (2.9)$$

ΔH_m beschreibt die Wanderungsenthalpie, ΔH_f die benötigte Generationsenthalpie, um eine Leerstelle zu bilden. Die Energien werden zusammengefasst zur Aktivierungsenergie $E_a = \Delta H_m + \Delta H_f = \Delta H$. Es ergibt sich im Ergebnis der Diffusionskoeffizient in vereinfachter Schreibweise zu Gleichung 2.10, [145]. Der Exponentialterm wird als Arrhenius-Term bezeichnet und beschreibt den Anteil der Atome, deren kinetische Energie größer als die Aktivierungsenergie ist.

$$D = D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \quad (2.10)$$

Die Aktivierungsenergie hängt vom Diffusionsmechanismus ab. In Metallen werden die drei Diffusionspfade Oberflächen- (OF), Korngrenzen- (KG) und Gitter- bzw. Volumendiffusion (Vol) unterschieden, Abb. 2.5.

Zusätzlich kann eine Diffusion von Leerstellen aus den Korngrenzen in die Gitter sowie eine Diffusion an Defekten und Verunreinigungen vorliegen, [129]. Beim kubisch-flächenzentrierten Gitter ergibt sich die Bindungsenergie ΔH_{bd}

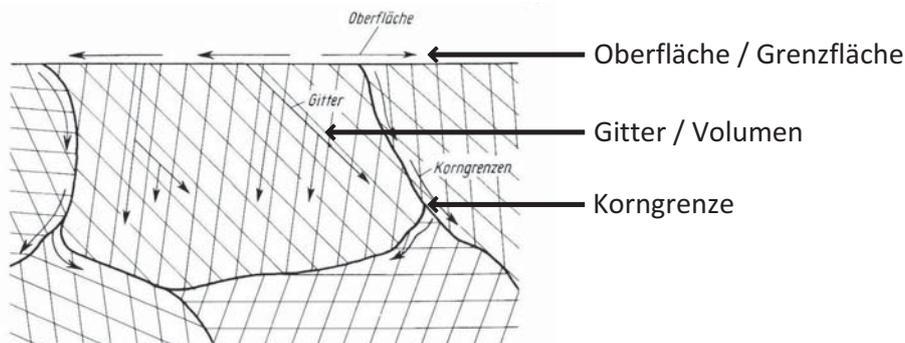


Abbildung 2.5: Unterscheidung der Diffusionspfade in Metallen, nach [10]

eines Atoms im ungestörten Gitter über die zwölf Nachbaratome. Für die Gitter- bzw. Volumendiffusion wird die Aktivierungsenergie über die Eigendiffusion der Atome beschrieben. Erfolgt die Diffusion über eine Leerstelle, entspricht $\Delta H_{f,Vol}$ der Energie, um die Leerstelle im Gitter zu bilden und $\Delta H_{m,Vol}$ annähernd der Bindungsenergie der elf verbliebenen Nachbaratome, [129]. Bei Korngrenzendiffusion wird $\Delta H_{f,KG}$ vernachlässigt, da genügend Leerstellen in der Umgebung des diffundierenden Atoms in der Korngrenze existieren. Die Bindungsenergie ist demnach in der Korngrenze geringer als im Gitter und für die Wanderungsenthalpie gilt $\Delta H_{m,KG} < \Delta H_{m,Vol}$. Bei der Oberflächendiffusion kann die Leerstellen-Generationsenthalpie ebenfalls aus obigem Grund vernachlässigt werden. Die zu berücksichtigende Bindungsenergie ergibt sich nur aus etwas fünf der zwölf Atome, sodass $\Delta H_{m,OF} \approx 5/12 \cdot \Delta H_{bd}$ gilt, [129]. Diffundieren die Leerstellen aus den Korngrenzen in das Gitter, so entspricht $\Delta H_{m,KG-Vol} \approx \Delta H_{m,Vol}$ und $\Delta H_{f,KG-Vol}$ wird nicht betrachtet.

Bei den typischerweise für Leiterbahnen verwendeten Werkstoffen Aluminium und Kupfer überwiegen die Korngrenzen- bzw. Oberflächendiffusion. Bei Lotmaterialien ist die Volumendiffusion der dominierende Diffusionsmechanismus, [144], so dass die Wanderungs- und Generationsenthalpie berücksichtigt werden müssen, [129].

2.2.1.2 Materialflussdichte

Durch den Einfluss einer Kraft liegt ein gerichteter Materialtransport von Atomen mit bzw. entgegen der Krafrichtung vor. Dieser Materialtransport folgt den Diffusionsgleichungen und wird über die Materialflussdichte \vec{J} beschrieben. Im ausgeglichenen Zustand wird der durch EM hervorgerufene Materialfluss durch einen in entgegengesetzte Richtung gleich großen Leerstellenfluss ausgeglichen. Der Gesamtmassenfluss ergibt sich aus der Summe aller Diffusionspfade. Für die Materialflussdichte \vec{J} gilt Gleichung 2.11, [145].

$$\vec{J} = C \cdot \vec{v}_d \quad (2.11)$$

Je nach Betrachtungsweise entspricht \vec{v}_d der beschriebenen mittleren Driftgeschwindigkeit der Ionen bzw. Leerstellen und C der entsprechenden Konzentration. Bei der Überlagerung von i Antriebskräften \vec{F}_i gilt somit Gleichung 2.12 [145] für die resultierende Materialflussdichte \vec{J}_{Summe} unter Berücksichtigung der mittleren Driftgeschwindigkeit nach Gleichung 2.6.

$$\begin{aligned}\vec{J}_{Summe} &= \sum_i C \cdot \vec{v}_{d,i} \\ &= \sum_i \frac{C \cdot D_i}{k \cdot T} \cdot \vec{F}_i\end{aligned}\quad (2.12)$$

Voraussetzung für aus Materialflüssen resultierende Fehlstellen ist, dass Quellen bzw. Senken vorliegen. Deren Divergenz gibt die örtliche Änderung der Materialflussdichte an. Ist die Divergenz der Materialflussdichten größer 0, so handelt es sich um Quellen, ist diese kleiner 0 liegen Senken vor. Bei Beschreibung der Leerstellendiffusion entspricht die Senke dem Ort des Materialabtrags, bei der Atomdiffusion entsprechend die Quelle. Die Kontinuitätsgleichung beschreibt dabei die zeitliche und örtliche Abhängigkeit des Materialflusses von der Konzentration, Gl. 2.13, [145].

$$\operatorname{div}(\vec{J}) = -\frac{\partial C}{\partial t}\quad (2.13)$$

Abbildung 2.6 veranschaulicht die Divergenz bei Betrachtung eines Volumenelements mit dem Volumen ΔV . Gilt für die Flüsse $\vec{J}_1 \neq \vec{J}_2$, ändert sich die Konzentration C im Volumenelement.

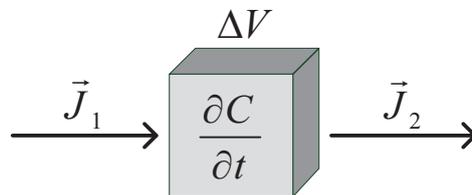


Abbildung 2.6: Volumenelement zur Veranschaulichung der Divergenz über die örtliche Änderung der Materialflussdichte \vec{J}

Es werden mikroskopische und makroskopische Flussdivergenzen unterschieden. Zu den mikroskopischen Einflüssen zählen Gefügeeinflüsse und Kornstrukturgradienten. Makroskopische Flussdivergenzen sind insbesondere Materialübergänge, Querschnittsänderungen und Temperaturgradienten, [145] [77] [119].

2.2.2 Diskussion theoretischer Modelle der Elektromigration

Es besteht eine andauernde Diskussionen über die physikalischen Hintergründe der Elektromigration, [86] [104] [146]. Das ballistische Modell aus dem Jahre 1959 [59] gilt als grundlegende Theorie. Allen weiter entwickelten Modellen ist gemein, dass diese auf dem ballistischen Modell aufbauen.

Bei der elektrischen Stromdichte \vec{j} handelt es sich um eine vektorielle Größe, die in die gleiche Richtung wie die elektrische Feldstärke \vec{E} weist. Die Stromstärke I wird beschrieben mit dem Oberflächenintegral der Stromdichte \vec{j} über der durchflossenen Fläche A_F mit der Flächennormalen \vec{A}_F , Gl. 2.14. Für ein homogenes Feld gilt Gleichung 2.15 mit dem Winkel α_i zwischen der Flächennormalen von A_F und der Stromdichte, [75].

$$I = \int_{A_F} \vec{j} \cdot d\vec{A}_F \quad (2.14)$$

$$I = j \cdot A_F \cdot \cos(\alpha_i) \quad (2.15)$$

Wird in dieser Arbeit die Stromdichte nicht vektoriell mit j bezeichnet, so handelt es sich stets um den Betrag und die Betrachtung im homogenen Feld mit einem Winkel $\alpha_i = 90^\circ$.

2.2.2.1 Impulsübertrag von Leitungselektronen: Ballistisches Modell

In einem elektrischen Leiter werden zwei treibende Kräfte \vec{F}_{el} und \vec{F}_{wd} beschrieben. Das angelegte elektrische Feld resultiert in einer direkten Feldkraft \vec{F}_{el} auf die Atome im Gitter, Gl. 2.16, [144].

$$\vec{F}_{el} = Z_{el}^* \cdot e \cdot \vec{E} \quad (2.16)$$

Z_{el}^* gibt die Ladungszahl in Bezug auf die elektrostatische Kraft an, e die Ladung eines Elektrons und \vec{E} das elektrische Feld.

Dem ballistischen Modell von Huntington, Grone und Fiks [59] nach kommt es zudem zu einem Impulsübertrag von beschleunigten Leitungselektronen e^- , dem so genannten Elektronenwind, auf Atome im Gitter, Abb. 2.7. Diese treibende Kraft der Impulse \vec{F}_{wd} resultiert in einem gerichteten Materialtransport thermisch aktivierter Atome, die zudem einen größeren Querschnitt für Streuungen gegenüber nicht aktivierten Atomen aufweisen, [12].

Unter der Annahme eines nicht elastischen Stoßes überträgt ein Elektron den Impuls $\vec{p} = m_0 \cdot \vec{v}_e$ auf ein einzelnes Ion, mit der Ruhemasse m_0 des Elektrons und dessen mittlerer Geschwindigkeit \vec{v}_e . Die Kraft \vec{F}_{wd} resultiert aus der Berücksichtigung aller n_e Elektronen, die einen Impuls übertragen und der Anzahl C_d an aktivierten Ionen, die diesen Impuls erfahren, Gl. 2.17, [59]. Es wird angenommen, dass alle Elektronen des Elektronenwinds in der mittleren Zeit τ_{col} auf diffundierende Atome treffen. Für die Stromdichte gilt $\vec{j} = -n_e \cdot e \cdot \vec{v}_e$, [144].

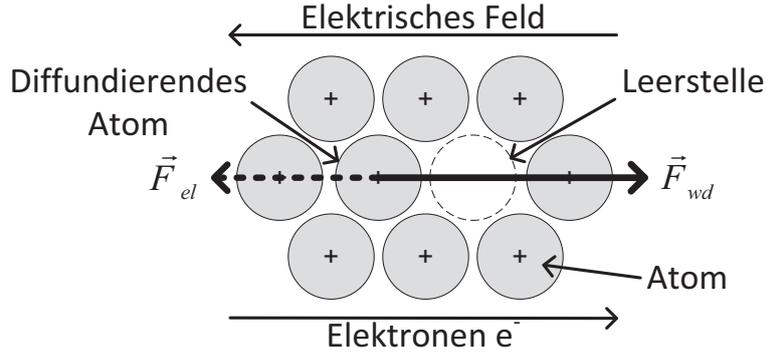


Abbildung 2.7: Krafteinwirkung auf diffundierende Atome in einem elektrisch bestromten Leiter, nach [59]

$$\begin{aligned}\vec{F}_{wd} &= \frac{d\vec{p}}{dt} \cdot \frac{n_e}{C_d} \\ &= \frac{m_0 \cdot \vec{v}_e}{\tau_{col}} \cdot \frac{n_e}{C_d} = -\frac{m_0}{e \cdot \tau_{col} \cdot C_d} \cdot \vec{j}\end{aligned}\quad (2.17)$$

Zur Berechnung von \vec{F}_{wd} wird Gleichung 2.17 mit dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ_d aufgrund der diffundierenden Atome $\rho_d = \frac{m_{eff}}{n_e \cdot e^2 \cdot \tau_{col}}$ erweitert, Gl. 2.18, [59], mit m_{eff} der effektiven Masse des Elektrons.

$$\vec{F}_{wd} = -\frac{\rho_d}{\rho} \cdot \frac{n_e}{C_d} \cdot \frac{m_0}{m_{eff}} \cdot e \cdot \rho \cdot \vec{j}\quad (2.18)$$

Unter Berücksichtigung des elektrischen Feldes $\vec{E} = \vec{j} \cdot \rho$ ergibt sich Gleichung 2.18 mit dem spezifischen elektrischen Widerstand des Gesamtleiters ρ zu Gleichung 2.19, [144]:

$$\vec{F}_{wd} = Z_{wd}^* \cdot e \cdot \vec{E},\quad (2.19)$$

mit

$$Z_{wd}^* = -\frac{\rho_d}{\rho} \cdot \frac{n_e}{C_d} \cdot \frac{m_0}{m_{eff}}.\quad (2.20)$$

Z_{wd}^* gibt die Ladungszahl in Bezug auf die Kraftwirkung durch die Impulsübertragung an. Es kann eine effektive Ladungszahl Z^* gebildet werden, für die $Z^* = Z_{el}^* + Z_{wd}^*$ gilt, [145]. Für viele Metalle kann angenommen werden, dass $Z_{el}^* \ll Z_{wd}^*$, d.h. der Haupteinfluss auf die Gesamtkraft ergibt sich aus dem Impulsübertrag, [145].

Wird die nominelle Ladungszahl Z_{el}^* gleich der elektrischen Ladungszahl Z gesetzt und die Gesamtzahl C_a an Atomen im Leiter mit $n_e = C_a \cdot Z$ berücksichtigt, so erhält man mit Gleichung 2.21 eine physikalisch begründete Gleichung zur Bestimmung von Z^* , [144]. Laut [144] muss ρ_d für Metalle mit

kubisch-flächenzentriertem Kristallgitter zusätzlich um den Faktor 1/2 korrigiert werden.

$$\begin{aligned} Z^* &= \left[Z_{el}^* - Z \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{\rho_d}{C_d}}{\frac{\rho}{C_a}} \cdot \frac{m_0}{m_{eff}} \right] \\ &= -Z \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{\rho_d}{C_d}}{\frac{\rho}{C_a}} \cdot \frac{m_0}{m_{eff}} - 1 \right] \end{aligned} \quad (2.21)$$

Als weitere Formel zur Bestimmung der effektiven Ladungszahl Z^* unter Berücksichtigung der Wanderungsenthalpie ΔH_m wird Gleichung 2.22 diskutiert, [144].

$$Z^* = -Z \left[\frac{\Delta H_m}{k \cdot T} \frac{m_0}{m_{eff}} - 1 \right] \quad (2.22)$$

Die auf die Atome bei Elektromigration wirkende Gesamtkraft \vec{F}_{EM} kann demnach mit Gleichung 2.23 beschrieben werden, [145].

$$\vec{F}_{EM} = \vec{F}_{el} + \vec{F}_{wd} = Z^* \cdot e \cdot \vec{E} \quad (2.23)$$

Die resultierende Materialflussdichte \vec{J}_{EM} nach Gleichung 2.24 [145] ergibt sich nach Substitution von Gleichung 2.23 in Gleichung 2.12.

$$\begin{aligned} \vec{J}_{EM} &= \frac{C \cdot D}{k \cdot T} \cdot \vec{F}_{EM} = \frac{C}{k \cdot T} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot \vec{j} \cdot D \\ &= \frac{C}{k \cdot T} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot \vec{j} \cdot D_0 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \end{aligned} \quad (2.24)$$

Für die durch EM bedingte Divergenz der Materialflussdichte $div(\vec{J}_{EM})$ gilt nach analytischer Lösung, [39], Gleichung 2.25. Für den stationären Fall ist die Divergenz der Stromdichte \vec{j} gleich 0, d.h. das Vektorfeld der Stromdichte ist quellfrei, [149].

$$div(\vec{J}_{EM}) = \left(\frac{E_a}{k \cdot T^2} - \frac{1}{T} + \frac{\rho_0 \cdot \alpha}{\rho} \right) \cdot \vec{J}_{EM} \cdot \nabla T \quad (2.25)$$

∇T ist der Temperaturgradient, α der Temperaturkoeffizient des spezifischen elektrischen Widerstands.

2.2.2.2 Anisotropes Verhalten und Kornrotation

Eine Rotation der Körner im zu untersuchenden Werkstoff unter dem Einfluss von Elektromigration konnte an Leiterbahnen gezeigt und diskutiert werden, [144]. In isotropen Materialien wie Aluminium und Kupfer ist der elektrische Widerstandswert unabhängig von der betrachteten Achse des kubisch-flächenzentrierten (kfz) Kristallgitters. Damit ist dieser in jeder Orientierung der Körner gleich. Das elektrische Feld \vec{E} liegt parallel zur Richtung des angelegten Stroms. In anisotropen Materialien wie den β -Zinn (Sn)- und Sn-basierten bleifreien Lotverbindungen mit tetragonal-raumzentriertem (trz) Kristallgitter existiert ein richtungsabhängiger elektrischer Widerstand, [155]. Beim trz Kristallgitter gilt für die Gitterkonstanten $a_k = b_k \neq c_k$. Der elektrische Widerstand entlang der a_k -, b_k -Achse ist 35 % geringer als der entlang der c_k -Achse. Entsprechend ist das elektrische Feld \vec{E}_{a_k} entlang der a_k -Achse geringer als \vec{E}_{c_k} . Innerhalb der Körner liegt demnach in Abhängigkeit der Kristallorientierung mit den Achsen a_k , b_k , c_k ein Winkel φ zwischen dem resultierenden elektrischen Feld \vec{E} und der Richtung der Stromdichte \vec{j} , Abb. 2.8a nach [144].

Der anisotrope Widerstand führt zu einer Divergenz des Leerstellenflusses innerhalb der Korngrenzen. Der durch EM hervorgerufene Leerstellenfluss unterscheidet sich deshalb bei Nachbarkörnern unterschiedlicher Orientierung.

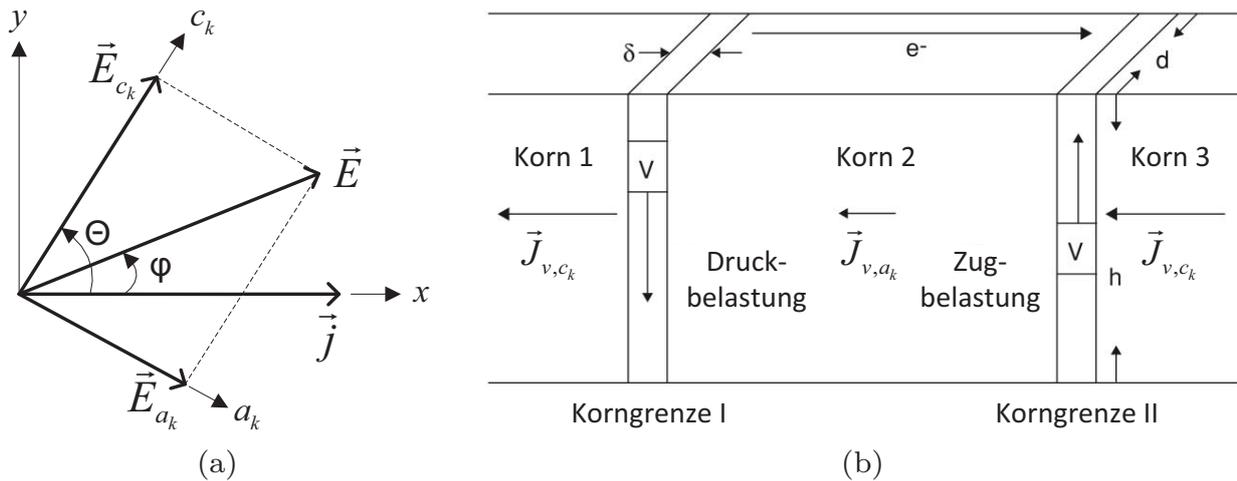


Abbildung 2.8: Schematische Beschreibung der Kornrotation: a) β -Sn-Korn im Querschnitt entlang der a_k - c_k -Achse: Elektrisches Feld \vec{E} und Stromdichte \vec{j} , nach [144], b) Bambusstruktur, bestehend aus drei Körnern mit \vec{J}_{v,c_k} parallel zur c_k -Achse (Korn 1,3) und \vec{J}_{v,a_k} parallel zur a_k -Achse (Korn 2), nach [154]

Durch Ausrichtung der a_k -, b_k -Kristallachse parallel zum Stromfluss kann der elektrische Widerstand minimiert werden.

Zur Beschreibung dieser Kornrotation wird eine idealisierte Bambus-Kornstruktur mit drei Körnern und einem gerichteten Elektronenwind von Korn 1 zu Korn 3 betrachtet, Abb. 2.8b nach [154]. Der Unterschied im Leerstellenfluss führt zu einer Übersättigung mit Leerstellen in der Korngrenze auf Anodenseite und Untersättigung in der Korngrenze auf Kathodenseite. Auf der Oberfläche des Sn-Korns wird eine ausgeglichene Leerstellenkonzentration angenommen. Es bilden sich ein Leerstellengradient und -fluss in vertikaler Richtung entlang der Korngrenze zur freien Oberfläche aus. Dieser steht in einer Richtung senkrecht zum Elektronenfluss und resultiert in transversalen Kräften in den Grenzen des betrachteten Kornes. Krafteinwirkungen parallel zur Korngrenze oder Grenzfläche können zu einer Rotation des Kornes führen. In isotropen Materialien führt der Leerstellenfluss zu einem Spannungsgradienten parallel zur Stromrichtung. Deshalb kommt es bei diesen nicht zu einer Kornrotation. In Abbildung 2.9 sind eine unbeschädigte Sn-Struktur zu Beginn eines Experiments und dessen Ende mit rotierten Körnern dargestellt.

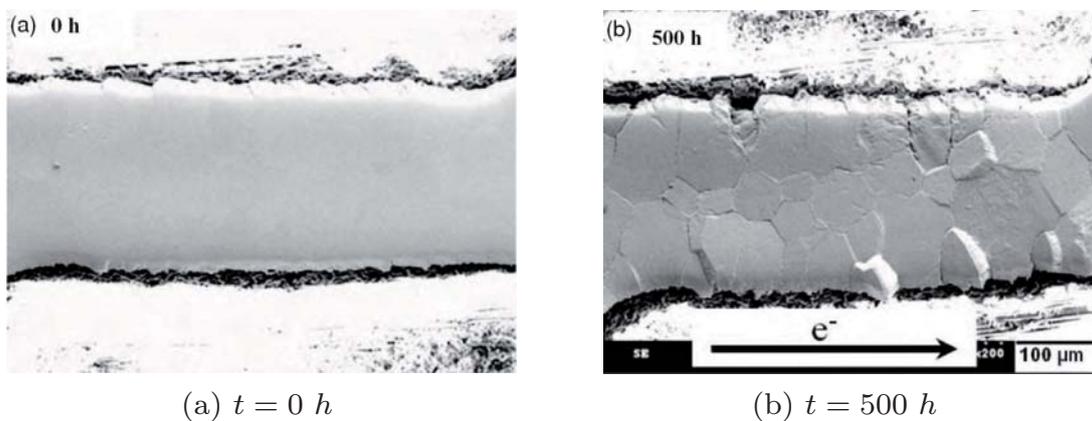


Abbildung 2.9: Kornrotation in einer β -Zinn-Metallisierung:

- a) vor einer Strombelastung, [144] [156],
- b) nach 500 h mit $j = 2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, $T=100 \text{ }^\circ\text{C}$, [144] [156]

Bei der möglichen Neuorientierung der Sn-Körner müssen die Nachbarkörner mit einbezogen werden. Es rotieren nie alle Körner, [156]. Durch die Neuorientierung sind Spannungsabfälle in der Struktur von ca. 10 % möglich, [103]. Eine Zunahme der Aktivierungsenergie bei der Migration wird beobachtet, sodass die Gitterdiffusion überwiegt, [156]. Innerhalb von Sn-Leiterbahnen wächst mit zunehmender Rotation unabhängig von einer Temperatur zudem die Korngröße. Bei steigender Versuchstemperatur nimmt die Anisotropie der Zinndiffusion

in Leiterbahnen ab und ist bei 150 °C nahezu ausgeglichen, [155]. Oberhalb einer Temperatur von 161 °C wechselt das β -Zinn mit trz Kristallgitter in ein γ -Zinn mit rhombisch-raumzentriertem (rrz) Kristallgitter und für die Gitterkonstanten gilt $a_k \neq b_k$.

In auf Zinn basierenden Lotverbindungen wird diese Rotation ebenso beobachtet. Es liegt die gleiche physikalische Antriebskraft zu Grunde. Sn-Körner in Lotverbindungen drehen sich jedoch trotz höherer Stromdichten langsamer als in Sn-Leiterbahnen. Ein Großteil der Körner im Lot rotiert zudem überhaupt nicht. Es werden hohe Stromdichten benötigt, um diese Rotation zu induzieren. In [30] wurde beobachtet, dass nur die Körner im Bereich der lokalen Stromdichtezunahme rotieren und den Widerstand reduzieren.

Für Standard-Lotgeometrien können zwei Fehler-Modi beschrieben werden, die zu einer Porenbildung im Bereich der UBM führen, [105] [90]. Diese hängen von der Kornorientierung der c_k -Achse zur Richtung des angelegten Stroms ab. Beim Fehlermodus 1 liegt ein großer Winkel Θ zwischen c_k -Achse und Stromrichtung vor. Es kommt zu einer Eigendiffusion des Zinns im Gitter, die in einer Auftrennung zwischen den intermetallischen Phasen (engl. *Intermetallic Compound*, IMC) und dem Lotwerkstoff durch Porenbildung resultiert. Fehlermodus 2 wird dominiert von den schnell diffundierenden Prozessen der Ni- und Cu-Diffusion durch das Sn. Die c_k -Achse ist parallel zur Stromrichtung ausgerichtet. Die interstitielle Diffusion von Cu und Ni durch die offene Struktur entlang der c_k -Achse ist etwa um den Faktor 500 stärker als entlang der a_k -, b_k -Achse, [106]. Die UBM und IMC werden aufgelöst und diffundieren durch die Kristallstruktur hindurch zur gegenüber liegenden Lotseite. Für die Eigendiffusion von Zinn wird eine effektive Ladungszahl Z^* von 10 bei paralleler Ausrichtung von \vec{j} diskutiert. Bei orthogonaler Orientierung wird für Z^* ein Wert von 18 angenommen, [70].

Der Modus 2 wird durch eine stabile Mikrostruktur der Ag_3Sn -IMC und sich wiederholende Zwillings-Kornstrukturen behindert. Insbesondere bei auf SnAg basierenden Lotverbindungen werden diese Strukturen beobachtet, [138], die zudem für eine zufällige Verteilung der Kornorientierungen im Lot sorgen. Entsprechende Lote sind daher verglichen mit reinen SnCu-Lotkonfigurationen widerstandsfähiger gegenüber einer Elektromigration. Ein Anteil von mindestens 1 % Ag im Lot ist nötig, damit sich Zwillingsstrukturen ausbilden können, [106]. Eine Ni-Diffusionsbarriere in der UMB-Konfiguration verlangsamt den Einfluss der Elektromigration durch Schutz des Cu. Eine weitere Verbesserung der Beständigkeit wird bei Zugabe von ca. 1 % Cu zum Lot erreicht, das zu verstärkter Bildung der Cu_6Sn_5 -IMC führt und das Ni der UBM schützt, [105].

Die Kornorientierung von Zinn spielt im Hinblick auf den Einfluss der Elek-

tromigration eine wichtige Rolle bei der Zuverlässigkeit von bleifreien Sn-Loten. Das Kornwachstum wird insbesondere durch die Temperatur verursacht. Stärkere Streuungen bei den Ausfallzeiten können auf den Fehlermodus 2 zurückgeführt werden. Dieser wird insbesondere bei Strukturen mit Frühausfällen beobachtet, [105]. Die Bildung von länglichen, feinen Zinn-Auswüchsen (engl. *whisker*) kann gleichermaßen durch eine lokale Stromdichtezunahme und die mechanischen Kräfte bei der Rotation der IMC ausgelöst werden, [117] [32].

2.2.3 Überlagerte Einflussgrößen

Die theoretischen Betrachtungen zur Elektromigration müssen bei der Untersuchung an Lotverbindungen durch die Auswirkungen überlagerter Effekte für ein genaues Modell und tieferes Verständnis erweitert werden. Es existiert eine Vielzahl an Kraftwirkungen, die zu zusätzlichen Materialtransporten führen, u.a. Konzentrations-, Spannungs-, Temperaturgradienten und Kristallstörungen. Vielfach beginnt die Porenbildung im Übergangsbereich der Leiterbahnen zur Lotverbindung aufgrund der wechselnden Materialien und Querschnitte, [144] [25] [31]. Diese Änderungen an der Geometrie resultieren in einer starken lokalen Zunahme der Stromdichte (engl. *current crowding*). Die Bildung von IMCs im Bereich der UBM sowie dessen Geometrie und Materialien führen lokal zu veränderten Materialeigenschaften. Beim Wachstum der IMC handelt es sich um einen temperaturabhängigen Diffusionsprozess, der von der UBM abhängt. Lote auf Zinn-Basis weisen bei einer Kupfer-UBM ein schnelleres IMC-Wachstum auf als bei einer Nickel-UBM, [3]. Weitere bisher nicht hinreichend beschriebene Wechselwirkungen beeinflussen den Ablauf zusätzlich, sodass die Test- und Randbedingungen nicht quantitativ definiert werden können. Die bei Untersuchungen der Elektromigration relevanten Einflüsse werden in diesem Kapitel diskutiert und eingeordnet.

2.2.3.1 Materialgefüge, Materialübergänge, intermetallische Phasen

Die Diffusion aufgrund von Materialinhomogenitäten wird durch das chemische Potential μ beschrieben. Zu den treibenden Kräften \vec{F}_D zählen Konzentrationsgradienten, Kristallstörungen und Verunreinigungen, Gl. 2.26, [145].

$$\vec{F}_D = -\nabla\mu = -\nabla(k \cdot T \cdot \ln(C)) = -\frac{k \cdot T}{C} \cdot \nabla C \quad (2.26)$$

Dem ersten Fick'schen Gesetz nach ist die Anzahl der Teilchen, die pro Zeiteinheit durch die Einheitsfläche mit der Diffusionsstromdichte fließen, dem

Konzentrationsgradienten ∇C proportional. Die Annahme gilt für den Fall einer örtlich konstanten Kraft oder einem konstanten Konzentrationsgradienten. Die resultierende Materialflussdichte ergibt sich nach Substitution von Gleichung 2.26 in Gleichung 2.12 zu Gleichung 2.27, [145]. Der Materialfluss ist von hoher zu niedriger Konzentration gerichtet.

$$\vec{J} = -D \cdot \nabla C \quad (2.27)$$

Für einen ortsabhängigen Fluss bzw. eine ortsabhängige Kraftwirkungen ist diese Betrachtung nicht gültig. Bei zeitlicher und örtlicher Abhängigkeit der Konzentration gilt das zweite Fick'sche Gesetz, Gl. 2.28, [145]. Diese Kontinuitätsgleichung beschreibt die Massenerhaltung im System. Die Konzentration kann sich nur dadurch ändern, dass Atome aus dem Gebiet heraus oder in dieses hinein fließen. Die mit dem ersten Fick'schen Gesetz abgeleitete Materialflussdichte wird in dieser eindimensionalen Betrachtung der Gleichung 2.13 berücksichtigt.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= -\frac{\partial J}{\partial x} \\ \frac{\partial C}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} D \cdot \left(\frac{\partial C}{\partial x} \right) = D \cdot \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \end{aligned} \quad (2.28)$$

Es entsteht ein Nettofluss an Atomen, bis sich das thermodynamische Gleichgewicht einstellt. Materialflussdichten aufgrund von Konzentrationsänderungen werden in Untersuchungen zur Elektromigration vielfach vernachlässigt, da diese ein Ergebnis der EM und nicht deren Ursache sind. Die benötigten Materialwerte wie die Änderung der Konzentration C kann zudem nur abgeschätzt und nicht messtechnisch bestimmt werden.

Die kleinste Einheit, die eine Massenflussdivergenz hervorrufen kann, ist ein Korngrenzen-Tripelpunkt, an dem drei Korngrenzen aufeinander stoßen, [10]. Weitere Einflüsse, die in Lotverbindungen zu Materialinhomogenitäten führen, sind Gradienten der Kornstruktur, Abb. 2.10a, und das Materialgefüge, Abb. 2.10b. Das Materialgefüge wird zum Beispiel durch Materialübergänge von UBM zu Lotmaterial und die Bildung intermetallischer Phasen verändert. Innerhalb der intermetallischen Phasen verändern sich zusätzlich das Kristallgefüge und die physikalischen Eigenschaften, [119].

Bei der Bambus-Struktur nimmt jedes Korn die komplette Breite der zu untersuchenden Struktur (z.B. Leiterbahn, Lotverbindung) ein. Die Korngrenzendiffusion wird stark vermindert und somit auch der Materialfluss durch EM entlang der Korngrenzen. Es findet nur eine Diffusion innerhalb der Kör-

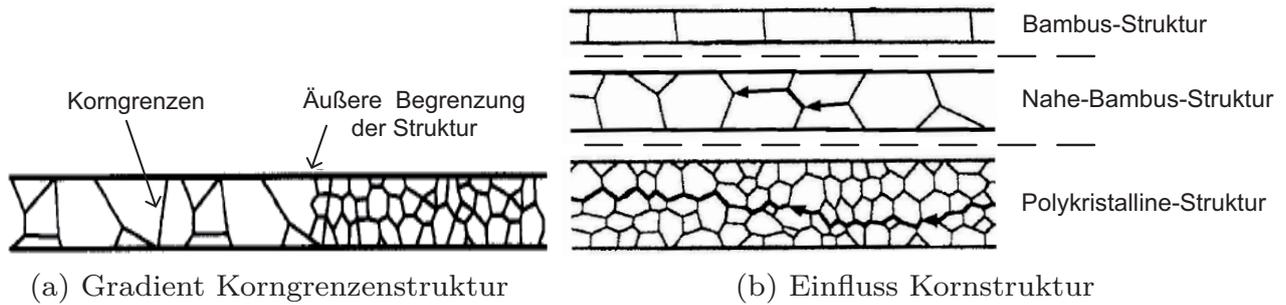


Abbildung 2.10: Einfluss der Gefügestruktur auf die Diffusion: a) Gradient der Korngrenzengröße innerhalb der Struktur, nach [77], b) Bambus-, Nahe-Bambus- und polykristalline Kornstruktur im Vergleich, nach [77]

ner und über deren Oberfläche statt, [77]. Entsprechend Kapitel 2.2.1.1 nimmt somit die Aktivierungsenergie E_a zu. Bei Aluminium-Leiterbahnen wird eine Abhängigkeit vom Materialgefüge, [73] und eine Zunahme der E_a von $0,5 \text{ eV}$ bei polykristallinem Materialgefüge auf $1,0 \text{ eV}$ bei Einzelkristallen beobachtet, [69].

Lotwerkstoffe beinhalten eine Komposition von verschiedenen Metallen, die unterschiedlich stark auf die externen Kräfte reagieren und damit unterschiedlich diffundieren. Insbesondere bei eutektischen Blei(Pb)-Zinn-Loten mit 62 % Sn-Anteil wird eine Phasentrennung beobachtet, Abb. 2.11. Diese wird als Polaritätseffekt bezeichnet und durch die zwei reaktiven Grenzflächen von Blei und Zinn ausgelöst.

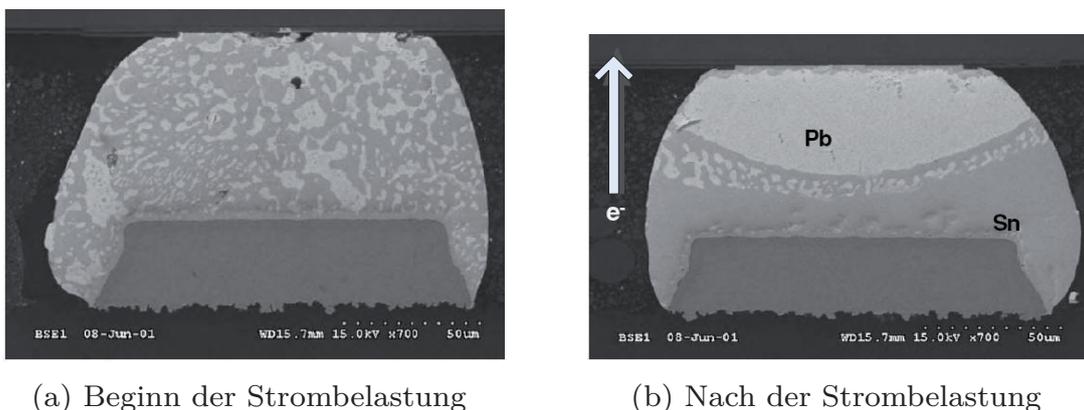


Abbildung 2.11: Phasentrennung der Materialzusammensetzung in bleihaltigen Lotverbindungen am Beispiel des eutektischen SnPb-Lotes: a) vor einer Strombelastung, [144], b) nach 82 h bei 160 °C bei einer Strombelastung von $j = 5 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$, [144]

Bei den meisten Zinn-basierten, bleifreien Lotverbindungen ist der Anteil von Zusätzen wie Silber oder Kupfer gering. Bei eutektischem $\text{SnAg}_{3,5}$ beträgt der Zinn-Anteil 96,5 %, bei $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0,5}$ beträgt die Zusammensetzung 95,5 % Zinn, 4 % Silber und 0,5 % Kupfer. Auch bei diesen Verbindungen wird eine reduzierte Ausscheidung von Silber-Phasen beobachtet, [7]. Die Zusatzstoffe bilden IMC wie Cu_3Sn , Cu_6Sn_5 und Ag_3Sn , welche sich in der Zinn-Matrix einlagern und mit der UBM reagieren, [119]. Neben dem Einfluss der Lotzusammensetzung müssen die Materialien der Ankontaktierung bei einer Bewertung der Diffusion berücksichtigt werden. Materialien der UBM sind meist Zusammensetzungen aus Kupfer, Silber, Gold und Nickel. Diese gelten als Materialien mit schneller Diffusionseigenschaft (engl. *fast diffusors*), [119]. Die Diffusion erfolgt interstitiell, d.h. die Atome diffundieren direkt über Zwischengitterplätze und benötigen keine Leerstellen im Kristallgitter des Lotes. Insbesondere Nickel hat eine sehr hohe Löslichkeitsrate in Zinn. Diese resultiert in einer geringen Aktivierungsenergie und kann zu einer schnellen Auflösung der UBM führen, [119] [162]. Diese *fast diffusors* bilden zudem eine IMC mit dem Lot. Die Zugabe von Kupfer reduziert die Diffusion von Kupferatomen aus der UBM durch die Zinn-Matrix, [58] und erhöht die Beständigkeit der Lotverbindung gegen Elektromigration, [81].

Bei der Elektromigration müssen die Materialparameter abhängig vom diffundierenden Material gewählt werden. Erfolgt die Porenbildung in der Zinn-Matrix, so ist die Eigendiffusion des Zinns zu berücksichtigen. Wird die Porenbildung durch ein Auflösen von der IMC oder UBM hervorgerufen, so sind die entsprechenden Werte für eine Diffusion durch die Zinn-Matrix zu ermitteln.

2.2.3.2 Entwurfsbedingt inhomogene Verteilungen der Belastungen

Durch das Design der Anbindung der Lotverbindung an die Leiterbahnen, der so genannten *line-to-bump*-Geometrie, ist die Verteilung der Stromdichte und Temperatur nicht, wie in den Annahmen vereinfacht betrachtet, homogen. Lokale Zunahmen der Stromdichte werden als *current crowding* bezeichnet, [144]. Diese Nicht-Uniformitäten können auftreten, wenn im Design der Stromzuführung Richtungsänderungen oder Querschnittsänderungen auftreten und wenn bei Materialübergängen Werkstoffe mit unterschiedlichen elektrischen Widerständen verbunden werden, [92]. Inhomogene Belastungen und damit auch wechselnde Testbedingungen sind die Folge. In den Bereichen des *current crowding* erhöht sich durch die lokal höhere Verlustleistung die Temperatur, [82] [96].

Neben einer starken Erhöhung der Stromdichte existiert zudem ein Strom-

dichtegradient. Insbesondere an Leiterbahnen konnte gezeigt werden, dass dieser eine Kraftwirkung auf die diffundierenden Leerstellen ausübt, [144] [134]. Es wird angenommen, dass Leerstellen in Bereichen hoher Stromdichte eine höhere potentielle Energie besitzen als in denen mit geringer Stromdichte. Der Gradient des Potentials in der *current crowding*-Region übt somit eine Kraft auf die Leerstellen aus, welche diese in den Bereich geringerer Stromdichte treibt. An diesen Stellen kommt es bevorzugt zur Porenbildung. Die Kraftwirkung wirkt dabei senkrecht zur Richtung des Stromflusses. Bedingt durch die komplexere Geometrie von Lotverbindungen im Vergleich zu Leiterbahnen wurde dieser Effekt bisher nur theoretisch und in Ansätzen für Lotverbindungen diskutiert, [143].

2.2.3.3 Fehlermechanismus Thermomigration

Die Joule'sche Erwärmung beschreibt die Umwandlung von elektrischer Arbeit W in Wärme Q . Neben dem beschriebenen lokalen Temperaturanstieg ΔT führt diese zu einem Temperaturgradienten ∇T . Dabei besteht eine exponentielle Abhängigkeit der Materialflussdichte von der Temperatur. Der Materialtransport aufgrund eines ∇T wird als Thermomigration (TM) bezeichnet. Diese Migration ist bei Temperaturen T [K] kleiner 0,5mal der Schmelztemperatur T_S [K] gering im Vergleich zur EM. Bei höheren Temperaturen können die TM und EM in der gleichen Größenordnung liegen, [141] [2]. Für ein bleifreies Lot wie SnAg_{3,5}, mit $T_S = 221$ °C, muss der Effekt demnach bereits ab einer Temperatur von -26 °C berücksichtigt werden.

Aus Untersuchungen zur Thermomigration lässt sich ein Schwellwert des Temperaturgradienten von 1000 K/cm für das Auftreten des Effekts in Löt ableiten, [144]. Ursache ist die insbesondere über die Leiterbahnen auf der Chip-Seite eingebrachte Wärme, [159]. Diese Leiterbahnen weisen aufgrund ihres geringen Querschnitts hohe thermische Widerstände auf. Bei hoher Strombelastung kommt es daher in diesen Bereichen zu einer starken Joule'schen Erwärmung. Die resultierende Kraft durch den Temperaturgradienten wird beschrieben über Gleichung 2.29 mit dem Wärmetransport Q^* , [144]. Q^* beschreibt die Wärmeenergie, die ein diffundierendes Atom im Vergleich zum Ausgangszustand transportiert.

$$\vec{F}_{TM} = -\nabla T \cdot \frac{Q^*}{T}, \quad (2.29)$$

Diffundiert ein Atom mit dem ∇T , so ist dessen Q^* negativ, da Energie abgegeben wird, für die entgegengesetzte Richtung ist Q^* positiv. Für den Materialfluss aufgrund von Thermomigration gilt somit Gleichung 2.30, [144].

$$\vec{J}_{TM} = -\frac{C \cdot Q^* \cdot D_0}{k \cdot T^2} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \cdot \nabla T \quad (2.30)$$

Die analytische Berechnung der Divergenz der Materialflussdichten hinsichtlich TM kann über Gleichung 2.31 erfolgen, [39]. Für den stationären Fall des thermischen Gleichgewichts ergibt sich die Divergenz des Temperaturgradienten zu Null, [149].

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(\vec{J}_{TM}) &= \left(\frac{E_a}{k \cdot T^2} - \frac{3}{T} + \frac{\rho_0 \cdot \alpha}{\rho} \right) \cdot \vec{J}_{TM} \cdot \nabla T \\ &+ \frac{C \cdot Q^* \cdot D_0}{3 \cdot k^3 \cdot T^3} \cdot e^2 \cdot \rho^2 \cdot j^2 \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \end{aligned} \quad (2.31)$$

Die fortschreitende Schädigung einer Verbindung führt durch den Anstieg der lokalen Stromdichte darüber hinaus unabhängig von der TM zu einer stärkeren Joule'schen Erwärmung. Durch die höhere Temperatur wird der Prozess der Elektromigration somit zunehmend beschleunigt. Zudem steigt der Temperaturgradient innerhalb der Verbindung lokal an und kann gegebenenfalls den Grenzwert der Thermomigration überschreiten. Abbildung 2.12 beschreibt diesen Kreislauf, der in allen Untersuchungen berücksichtigt werden muss.

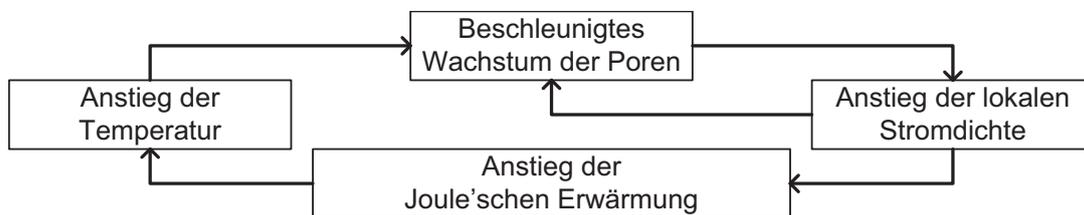


Abbildung 2.12: Temperaturanstieg bei zunehmender Schädigung durch Elektromigration, Kreislauf nach [34]

Dieser sich selbst potenzierende Kreislauf führt zu einer steten Temperaturzunahme, die immer in einem zeitabhängigen Aufschmelzen der untersuchten Struktur resultiert.

2.2.3.4 Fehlermechanismus Spannungs- bzw. Stressmigration

Durch den durch Elektromigration induzierten Materialfluss bilden sich Bereiche mit Materialverarmung und -anhäufung, Abb. 2.13, bzw. Leerstellenansammlung und –verarmung. Es baut sich ein mechanischer Spannungsgradient $\nabla\sigma$ auf, der zu einer zusätzlichen, gerichteten Kraft \vec{F}_{SM} führt, Gl. 2.32, [144].

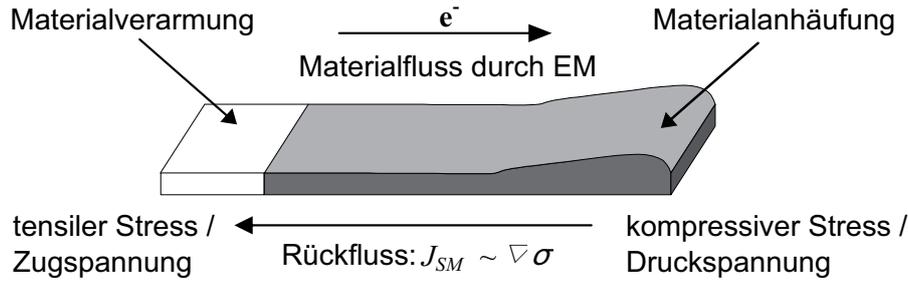


Abbildung 2.13: Aufbau eines Spannungsgradienten durch Materialverarmung und -anhäufung am vereinfachten Beispiel einer Leiterbahn, nach [51]

$$\vec{F}_{SM} = -\nabla\sigma \cdot \Omega \quad (2.32)$$

Ω beschreibt das Atomvolumen. Diese Kraft resultiert in einem Materialrückfluss \vec{J}_{SM} , Gl. 2.33, der der Migration durch EM entgegen wirkt, [144]. Dieser Fluss wird als Spannungs- bzw. Stressmigration (SM) bezeichnet.

$$\vec{J}_{SM} = -\frac{C \cdot D_0}{k \cdot T} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \cdot \nabla\sigma \cdot \Omega \quad (2.33)$$

Die Bestimmung der Divergenz der Materialflussdichte kann analytisch mit Gleichung 2.34 erfolgen, [38] [39], mit α_l dem Ausdehnungskoeffizienten, ν_{poi} der Querkontraktionszahl und E dem Elastizitätsmodul.

$$\begin{aligned} \text{div}(\vec{J}_{SM}) = & \left(\frac{E_a}{k \cdot T^2} - \frac{1}{T}\right) \cdot \vec{J}_{SM} \cdot \nabla T \\ & - \frac{2 \cdot E \cdot C \cdot \Omega \cdot D_0 \cdot \alpha_l}{3 \cdot (1 - \nu_{poi}) \cdot k \cdot T} \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \cdot \left[\left(\frac{e^2 \cdot \rho^2 \cdot j^2}{3 \cdot k^2 \cdot T}\right) \right. \\ & \left. + \left(\frac{1}{T} - \frac{\alpha \cdot \rho_0}{\rho}\right) \cdot \nabla^2 T\right] \end{aligned} \quad (2.34)$$

Neben einer Spannungsmigration bildet sich mit fortschreitender Migration auch eine Oberflächenspannung (engl. *Surface Tension Induced Driving Force*, STIDF) aus, die eine zusätzliche Kraftwirkung bedingt, [141]. Drei wesentliche Ursachen sind dabei grundlegend. Einerseits existieren mikroskopische Strukturveränderungen in den Grenzflächenschichten der unterschiedlichen Werkstoffe. Eine weitere Quelle für STIDF bilden die Oberflächen der Korngrenzen und eine dritte die Oberflächen der Leerstellen im Material.

Der Einfluss dieser Oberflächenspannung ist zu Beginn einer Elektromigrationsuntersuchung mindestens eine Größenordnung geringer als die durch den Elektronenwind resultierende Kraft, [142] und damit am Anfang zu ver-

nachlässigen. Mit zunehmender Leerstellenansammlung durch EM gewinnt die Oberflächenspannung an Bedeutung, [4] [76]. Die Ausbildung der Poren wird signifikant beeinflusst und führt zu einer asymmetrischen Geometrie. In [148] werden sich unterschiedlich ausbildende Porengeometrien durch EM diskutiert und mit der STIDF als Antriebskraft verglichen. STIDF kann durch Veränderung der Porengeometrie die Wachstumszeit der Pore und damit den Widerstandsverlauf der Teststruktur und dessen Ausfallzeit beeinflussen, [141]. Die Antriebskraft wirkt sich nur auf die Ausbildung der Poren aus, nicht aber deren Ansammlung.

2.2.3.5 Kurzlängeneffekt (Blech-Effekt)

Bei Betrachtung der Überlagerung der Materialflüsse durch Elektro- und Spannungsmigration ergibt sich Gleichung 2.35, [144].

$$\vec{J}_{EM} + \vec{J}_{SM} = \frac{C \cdot D}{k \cdot T} \left(Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot \vec{j} - \nabla \sigma \cdot \Omega \right) \quad (2.35)$$

Unter der Randbedingung, dass sich beide Materialflüsse ausgleichen, d.h., dass der Material-Rückfluss den Elektromigrations-Materialfluss ausgleicht, $\vec{J}_{EM,k} = -\vec{J}_{SM,k}$, gilt allgemein Gleichung 2.36, [16] [17].

$$Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot \vec{j}_k = \nabla \sigma_k \cdot \Omega \quad (2.36)$$

Für die 2-dimensionale Betrachtung in x-Richtung kann diese Gleichung umgestellt werden, Gl. 2.37 und das kritische Produkt aus Blech-Länge Δx_k und kritischer Stromdichte j_k berechnet werden, [144]. Für den Spannungsunterschied $\Delta \sigma$ gilt $\Delta \sigma = E \cdot \Delta \epsilon$ mit dem Elastizitätsmodul E und der Dehnungsdifferenz $\Delta \epsilon$, Gl. 2.38. Für die kritische Dehnung ϵ_k kann die Elastizitätsgrenze eingesetzt werden, [144].

$$Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot j_k = \frac{\Delta \sigma_k}{\Delta x_k} \cdot \Omega \quad (2.37)$$

$$j_k \cdot \Delta x_k = \frac{\Delta \sigma_k \cdot \Omega}{Z^* \cdot e \cdot \rho} = \frac{E \cdot \Delta \epsilon_k \cdot \Omega}{Z^* \cdot e \cdot \rho} \quad (2.38)$$

Dieser Effekt wurde erstmals an Leiterbahnen mit verschiedenen Längen gezeigt und wird nach seinem Entdecker als Blech-Effekt bezeichnet, [16] [17]. Ist die Länge des Leiters kürzer als die kritische Länge, kommt es zu keiner Schädigung durch EM, Abb. 2.14a,b. Auch in der Blech-Struktur muss der Effekt der inhomogenen Stromdichteverteilung im Bereich des Materialüber-

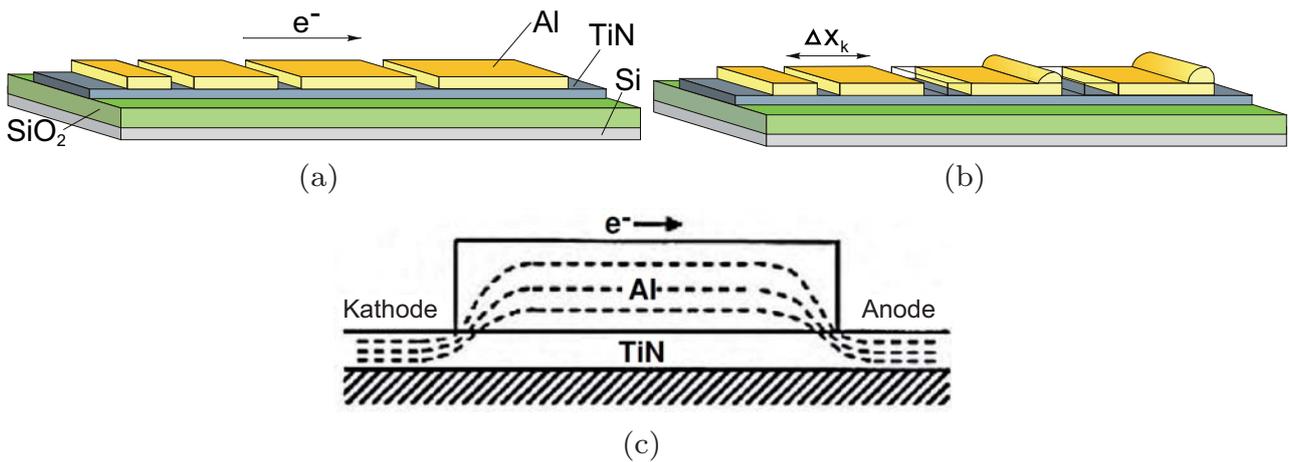


Abbildung 2.14: Teststruktur nach Blech zur Ermittlung des Kurzlängeneffekts an Leiterbahnen: a) Aluminium-Leiterbahnen vor einer Strombelastung, [11] und b) nach einer Strombelastung, [11], c) Seitenansicht mit Details der inhomogenen Stromdichteverteilung innerhalb der Blech-Teststruktur [144]

gangs berücksichtigt werden, Abb. 2.14c.

Der Kurzlängeneffekt kann bei dem Design von Lotverbindungen über eine Verringerung der Lothöhe erreicht werden. *Bumps* mit einem Kupfersockel nutzen diesen Ansatz, Abb. 2.15. Bei dieser Art der Verbindung wird die Kontaktierung über ein geringes Lotdepot zwischen Chip und Substrat realisiert,

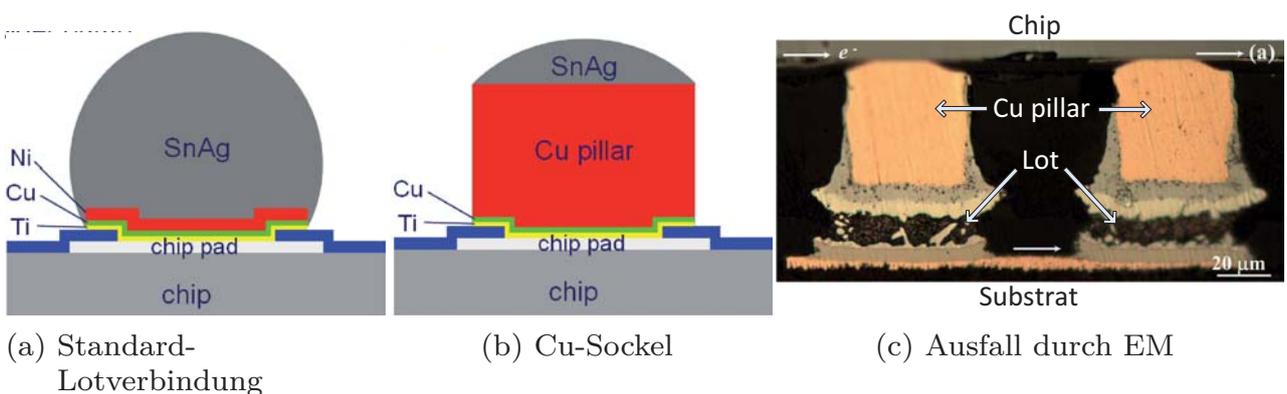


Abbildung 2.15: Teststrukturen zur Untersuchung des Einflusses von Elektromigration auf Lotwerkstoffe: a)-b) Schematisch: Standard-Lotdesign und Design mit einem Cu-Sockel im Vergleich, [48], c) Ausgefällene Struktur nach 720 h bei 100 °C, $j_{max} = 6,75 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, [113]

das auf einem Cu-Sockel (engl. *column, pillar*) abgeschieden wird.

Kupfer ist im Vergleich zu Lotwerkstoffen gegenüber Elektromigration um etwa zwei Größenordnungen der Stromdichte resistenter, [144]. Im SnAg-Lotmaterial ist die Stromdichteverteilung nahezu homogen und der geringe Abstand zwischen dem Kupfersockel und der Leiterbahn liegt zudem in dem Bereich der Blech-Länge. Demzufolge sollte der Kontakt theoretisch resistenter gegenüber Elektromigration sein. In Untersuchungen wird eine um bis zu zwei Größenordnungen längere Lebensdauer beobachtet, [48] [113]. Bei diesem Design wird außerdem die lokale Zunahme der Stromdichte im Bereich des Lotwerkstoffs reduziert.

2.2.3.6 Gesamtbeschreibung der überlagerten Einflussgrößen

Porenbildung durch Elektromigration beginnt typischerweise im Übergangsbereich von Lot und Ankontaktierung, [163]. Zur Veranschaulichung der dargestellten Einflüsse bei Elektromigrationsuntersuchungen sind diese in Abbildung 2.16 zusammengefasst dargestellt. Randbedingungen sind die extern zu-

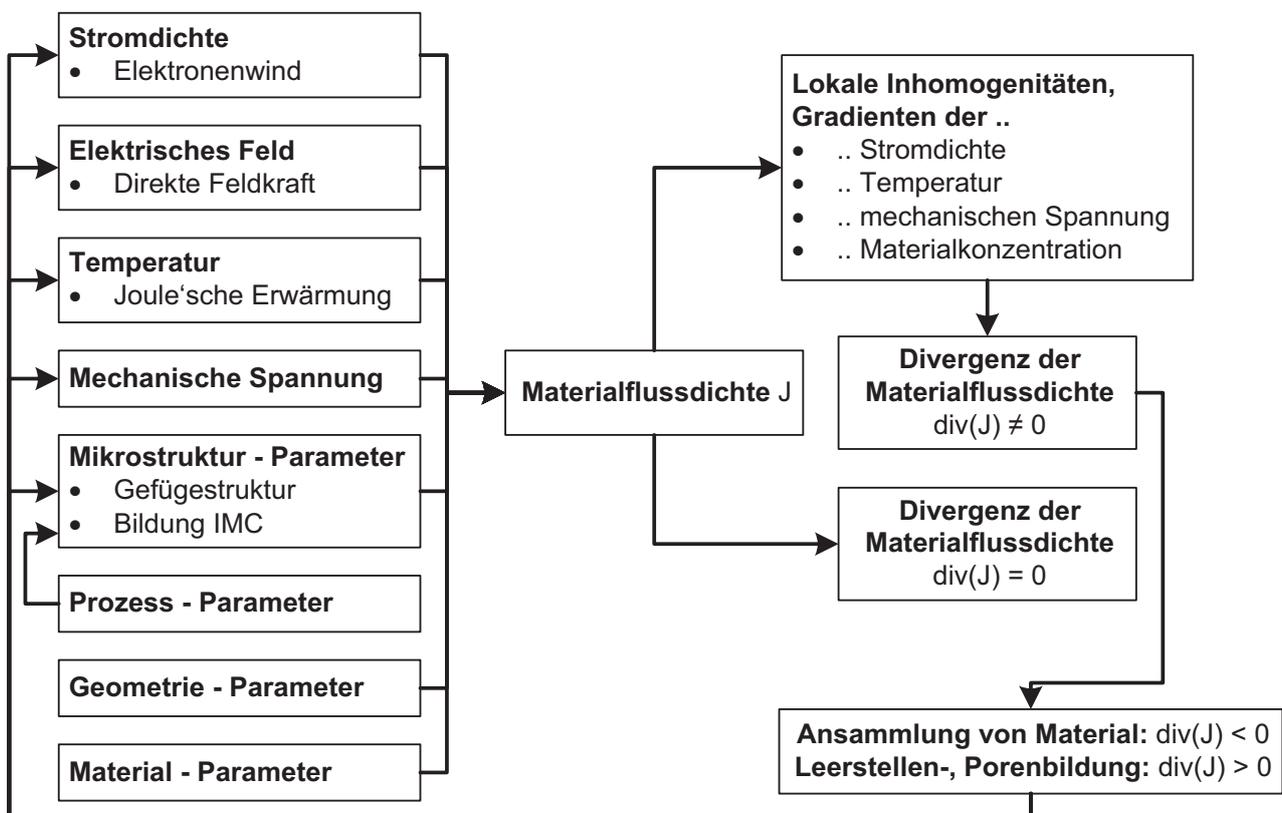


Abbildung 2.16: Fehlerprozess zur Beschreibung der fortschreitenden Schädigung durch Elektromigration mit Berücksichtigung der sich überlagernden, möglichen Effekte

geführte Testtemperatur und die Stromdichte.

Mit zunehmender Schädigung verändern sich Einflüsse und es liegen keine definierten Randbedingungen mehr vor. Sollen die dargelegten Einflüsse bei den Untersuchungen ganzheitlich in einem Modell berücksichtigt werden, so ergeben sich die beschriebenen, temperaturabhängigen Materialparameter und Variablen. Die theoretische Betrachtung des ballistischen Modells setzt konstante Belastungen voraus und geht vom Ausgangszustand der nicht geschädigten Struktur aus.

Um bei zunehmender Miniaturisierung weitere Einflüsse besser zu verstehen, wurden über die Jahre weitere Modelle entwickelt. In [19], [136] wird ein Ansatz zur Berücksichtigung des Einflusses von Störstellen und Fremdatomen sowie ein Modell der Polarisationsladung diskutiert. Die Berücksichtigung von Feld-Inhomogenitäten wird zudem in [87] eingeführt. Weiterführend wird die Entstehung von Dipol-Feldern an Störstellen beschrieben, [84] und die Änderung der Elektronendichte an Störstellen wird als Einflussfaktor diskutiert, [85]. Modelle zur Beschreibung der sich aufbauenden mechanischen Spannungen werden in [74], [127] beschrieben. Aufgrund der Komplexität der weiteren Methoden finden diese bei aktuellen Herangehensweisen zur Bewertung der Zuverlässigkeit bisher keine Anwendung.

2.3 Methoden zur Bewertung der Lebensdauer

2.3.1 Analytische Ansätze zur Berechnung der Lebensdauer

Die mittlere Lebensdauer (engl. *Mean Time To Failure, MTTF*) beschreibt die Zeit, bei der eine festgelegte Prozentzahl aller Proben ein definiertes Fehlerkriterium erreicht hat. Gängige Prozentzahlen ausgefallener Proben in der Auswertung liegen bei 10 %, 50 % und 63,2 %, [6] [65] [67]. Bei der Berücksichtigung der Ausfallzeit einer einzelnen Probe wird die Bezeichnung *TTF* (engl. *Time To Failure*) verwendet.

Zur Berechnung der Lebensdauer einer Struktur bei Strombelastung wird die Black' sche Gleichung diskutiert. Diese wird in den Standards JEDEC JESD63 [65] für Leiterbahnen und JEDEC JEP154 [67] für Lotverbindungen vorgeschlagen. Die Black' sche Gleichung wurde aus experimentellen Ergebnissen abgeleitet, [12]. Eine Reaktionsrate R_{mig} , aus der sich die Elektromigration ergibt, wird über den Impulsübertrag zwischen thermisch aktivierten Ionen und den Leitungselektronen definiert. Vier Grundannahmen für die resultierende Reaktionsrate R_{mig} wurden von Black angenommen, [12] [13] [14] [15] [115].

$$(1) R_{mig} \propto \frac{1}{MTTF} \quad (2.39)$$

$$(2) R_{mig} \propto C_d \propto \exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \quad (2.40)$$

$$(3) R_{mig} \propto p \propto j \quad (2.41)$$

$$(4) R_{mig} \propto n_e \propto j \quad (2.42)$$

Der Annahme nach besteht ein reziproker Zusammenhang zwischen der Reaktionsrate R_{mig} und der $MTTF$, Gl. 2.39. Die Reaktionsrate wird durch die Anzahl thermisch aktivierter Ionen C_d erhöht, welche mit der Temperatur T zunimmt und über den Arrhenius-Term mit der Aktivierungsenergie E_a und der Boltzmann-Konstante k berücksichtigt wird, Gl. 2.40. Entsprechend der Theorie ist die treibende Kraft der Elektromigration ein Impulsübertrag p der Leitungselektronen, der proportional mit der Stromdichte j zunimmt, Gl. 2.41. Je höher die Anzahl an Elektronen n_e ist, die den Leiter passieren, desto größer ist die Stromdichte und dementsprechend die Reaktionsrate R_{mig} , Gl. 2.42.

Zusammengefasst ergibt sich die resultierende Gleichung 2.43, mit der Konstanten A , die die physikalischen Eigenschaften und Geometrien der Materialien einbezieht und dem Exponenten n , der die Abhängigkeit von der Stromdichte berücksichtigt.

$$MTTF = A \cdot j^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k \cdot T}\right) \quad (2.43)$$

In der ursprünglichen Veröffentlichung zur Berechnung der $MTTF$ entsprach n für das Material Aluminium einem Wert von 2, [12]. Der Parameter n wurde eingeführt, da Experimente nicht mit der ursprünglichen Formel beschrieben werden konnten. Abhängig vom Einfluss einer Eigenerwärmung wurde bei Leiterbahnen ein Wert von $n = 1$ für eine geringe und $n = 3$ für eine starke Erwärmung beobachtet, [15]. Insbesondere bei Untersuchungen an Lotverbindungen werden deutlich höhere Werte für n ermittelt, z.B. 4,6 nach [89] oder 10,1 bei starker Joule'scher Erwärmung, [122].

Zur Berechnung der Parameter n , E_a und A werden für eine Teststruktur die $MTTF$ bei unterschiedlichen Temperaturen und Stromdichten bestimmt, [65]. Unter der Randbedingung, dass die Proportionalitätskonstante A und die Temperatur T konstant sind, kann der Exponenten n aus der Auftragung von $\log(MTTF)$ über $\log(j)$ aus der Steigung der Geradengleichung gemäß Gleichung 2.44 berechnet werden.

$$\log(MTTF) = \log\left(A \cdot e^{\frac{E_a}{k \cdot T}}\right) + (-n) \cdot \log(j) \quad (2.44)$$

Zur Berechnung der Aktivierungsenergie wird die Stromdichte j konstant gehalten. E_a kann aus der Steigung der Auftragung von $\ln(MTTF)$ über $1/T$ bestimmt werden, Gl. 2.45, [65]. Der Proportionalitätsfaktor A wird je Teststruktur aus den Versuchszeiten $MTTF$ berechnet.

$$\ln(MTTF) = \ln(A \cdot j^{-n}) + \frac{E_a}{k} \cdot \frac{1}{T} \quad (2.45)$$

Für Lotverbindungen erwies sich die Black'sche Gleichung als nicht praxisnah, da die lokal auftretenden Temperaturen und Stromdichten nicht entsprechend berücksichtigt werden können. Eine Erweiterung der Gleichung um die beiden Parameter c_x , zur Berücksichtigung des *current crowding* und ΔT , das die Joule'sche Eigenerwärmung berücksichtigt, wird in [33] diskutiert, Gl. 2.46. In [46] wird die $MTTF$ zusätzlich um Geometrieparameter erweitert, welche den Einfluss der UBM und Passivierung berücksichtigen sollen. Diese Gleichungen finden jedoch kaum Verwendung, da zusätzliche Modellparameter bestimmt werden müssen.

$$MTTF = A \cdot (c_x \cdot j)^{-n} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k \cdot (T + \Delta T)}\right) \quad (2.46)$$

In Tabelle 2.1 sind beispielhaft Werte für Parameter der Black'schen Gleichung aus verschiedenen Untersuchungen zusammengefasst. Es zeigen sich Unterschiede für gleiche Lotwerkstoffe bei unterschiedlicher Lotgeometrie. Der

Tabelle 2.1: Experimentell ermittelte Werte für Parameter der Black'schen Gleichung für unterschiedliche bleifreie Lotmaterialien im Vergleich

Referenz	Lotmaterial	UBM	Exponent n	E_a [eV]	Vorfaktor A
[89]	SnAg _{3,5}	Cu	4,60	1,63	$5,58 \cdot 10^5$ *
[24]	SnAg _{3,5}	Cu	3,75	1,11	$4,94 \cdot 10^6$ *
[24]	SnAg _{3,5}	Ni	2,10	0,86	$4,63 \cdot 10^1$ *
[47]	SnAg _{3,5}	Ni	1,70	1,07	$6,10 \cdot 10^{-3}$
[45]	SnAg ₃	Cu	2,00	0,70	$8,85 \cdot 10^2$ *
[45]	SnAg ₃	Ni	2,00	1,10	$6,18 \cdot 10^{-3}$ *
[80]	SnAg ₃ Cu _{1,5}	Cu	3,10	0,79	$6,55 \cdot 10^{-5}$

* nachträgliche Berechnung im Rahmen dieser Arbeit über Gleichung 2.43

Vorfaktor A wurde für die gekennzeichneten Versuche nachträglich im Rahmen dieser Arbeit auf Basis von Gleichung 2.43 berechnet.

Vorteil der Berechnung mittels der Black'schen Gleichung ist die einfache Anwendbarkeit, wenn die Modellparameter bekannt sind. Zur Bestimmung der Werte sind jedoch für jede Teststruktur Initialversuche bis zum Ausfall der Probe notwendig. Insbesondere durch die sich lokal ändernden Testbedingungen und die damit verbundene Anpassung des Exponenten n ist die Gleichung nicht mehr vollständig physikalisch begründet, sondern wird anhand der Experimente abgeleitet. Sind die Parameter der Black'schen Gleichung ermittelt, so kann die Lebensdauer der Lotverbindung für unterschiedliche Einsatzbedingungen berechnet werden, um die Technologie zu qualifizieren. Dafür wird die Lebensdauer der Teststruktur bei beschleunigten Tests auf die Betriebsbedingungen des Produkts extrapoliert, Abb. 2.17. Die statistische Auswertung der experimentell ermittelten einzelnen Ausfallzeiten TTF jeder Probe zur Bestimmung der mittleren Ausfallzeit $MTTF$ aller Proben kann über die Weibull-Verteilungsfunktion erfolgen, vgl. Kapitel A.1.

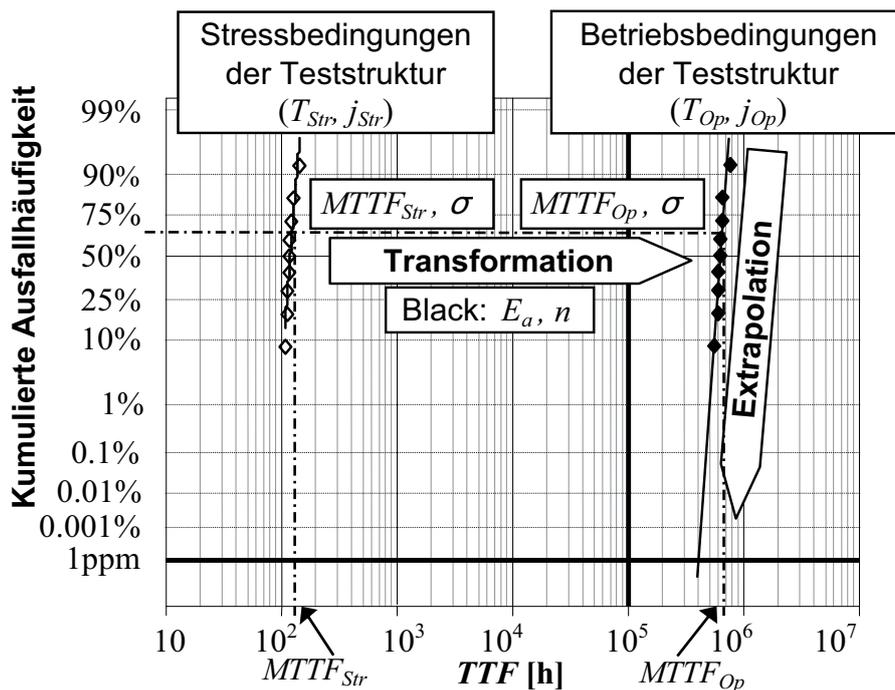


Abbildung 2.17: Lebensdauerextrapolation der Messwerte (T_{Str}, j_{Str}) auf reale Einsatzbedingungen (T_{Op}, j_{Op}) mittels Black'schem Modell und Ableitung der Ausfallzeit $MTTF$, nach [51]

Ausgehend vom allgemeinen Ansatz der Materialflussdichte nach Gleichung 2.12 entwickelte Shatzkes eine weitere physikalisch begründete, analytische Gleichung zur Berechnung der TTF , [133] [36]. Es wird eine impermeable

Grenzfläche am Ort $x = 0$ angenommen, die diffundierende Leerstellen nicht passieren können. Dieser Fall entspricht dem einer Bambus-Struktur (vgl. Abb. 2.10b). Ferner muss an diesem Ort eine Divergenz der Materialflussdichte der Leerstellen \vec{J}_ν existieren. Es wird in der Herleitung die Konzentration der Leerstellen C_ν betrachtet. Die Lösung der Kontinuitätsgleichung erfolgt für den 2-dimensionalen Fall unter Berücksichtigung der Randbedingungen, dass sich die Leerstellenkonzentration für $x = -\infty$ nicht ändert, d.h. ein kontinuierlicher Leerstellenstrom vorliegt, $C_\nu(x = -\infty, t) = C_{\nu,0}$, und dass keine Leerstellen den Ort $x = 0$ passieren, $J_\nu(x = 0, t) = 0$. Im Ausgangszustand gilt die Anfangsbedingung einer konstanten Verteilung der Leerstellen über die gesamte Struktur, $C_\nu(x, t = 0) = C_{\nu,0}$. Die resultierende Differentialgleichung wird mittels der Laplace-Transformation gelöst. Für den betrachteten Ort $x = 0$ wird eine kritische Leerstellendichte $C_{\nu,f}$ definiert, ab der eine Pore entsteht. Im letzten Schritt wird die Theorie der EM substituiert nach Kapitel 2.2.2.1 und es ergibt sich als Lösung der *TTF* Gleichung 2.47, [133]:

$$\begin{aligned} TTF &= \frac{2 \cdot C_{\nu,f}}{C_{\nu,0} \cdot j^2 \cdot D} \cdot \left(\frac{k \cdot T}{Z^* \cdot e \cdot \rho} \right)^2 \\ TTF &= B \cdot T^2 \cdot j^{-2} \cdot \exp\left(\frac{E_a}{k \cdot T}\right), \end{aligned} \quad (2.47)$$

mit

$$B = \frac{2 \cdot C_{\nu,f}}{C_{\nu,0} \cdot D_0} \cdot \left(\frac{k}{Z^* \cdot e \cdot \rho} \right)^2. \quad (2.48)$$

Im Unterschied zur Black'schen Gleichung ist die Abhängigkeit von der Stromdichte j quadratisch, der Proportionalitätsfaktor B physikalisch begründet und es besteht eine zusätzliche Temperaturabhängigkeit.

In [34], [141] wird als weiterer analytischer Ansatz ein Zusammenhang zwischen der Divergenz der Materialflussdichte $div(\vec{J})$ und der *TTF* hergeleitet. Über die Betrachtung eines Leiterabschnitts der Länge Δl , in dem sich Atome in einer Zeitperiode ∂t ansammeln oder abbauen, kann die resultierende Volumenänderung ∂V abgeleitet werden, Gl. 2.49. Die Diffusion erfolgt über einen Diffusionspfad der Weite δ und Breite h . Durch Integration von Gleichung 2.49 erhält man Gleichung 2.50 mit dem kritischen Volumen V_c an Massenabbau bzw. -ansammlung, bei dem ein Ausfall zum Zeitpunkt *TTF* auftritt, [34].

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \delta \cdot h \cdot \Omega \cdot \Delta l \cdot \operatorname{div}(\vec{J}) \quad (2.49)$$

$$\int_0^{V_c} \partial V = \Omega \cdot \Delta l \int_0^{TTF} \delta \cdot h \cdot \operatorname{div}(\vec{J}) \partial t \quad (2.50)$$

Aufgrund der Zeitabhängigkeit des Materialflusses und der zunehmenden Inhomogenität des Leiters bei Elektromigration wird Gleichung 2.50 in erster Näherung über eine Mittelwertbildung gelöst, Gl. 2.51, [141].

$$TTF = \frac{V_c}{\Omega \cdot \Delta l \cdot \delta \cdot h \cdot \operatorname{div}(\vec{J})} \quad (2.51)$$

Es ergibt sich ein antiproportionaler Zusammenhang zwischen der TTF und der Divergenz der Materialflussdichte. Bei Korngrenzendiffusion entsprechen δ , h der Korngrenzenweite und -breite, bei Volumendiffusion ergeben sich diese aus dem Querschnitt des gesamten Leiters in Diffusionsrichtung.

2.3.2 Numerische Modellierung der Einflussgrößen

Zur Berücksichtigung der genauen Geometrie und der überlagerten Effekte bei der Bewertung von Strukturen wurde die technologieabhängige, computergestützte Simulation in den letzten Jahren stark vorangetrieben, [115]. Randbedingungen der numerischen Modellierung sind neben der Geometrie die Materialdaten und die Belastungen durch Strom und Temperatur. Können die Materialdaten nicht vor der Simulation bestimmt werden, so werden Literaturwerte herangezogen. In Abbildung 2.18 ist der Ablauf zur Bewertung der Effekte mit der numerischen Berechnung skizziert. Es können die Abschnitte I und II unterschieden werden. Zunächst wird das globale Modell der Teststruktur mit den Randbedingungen aufgebaut. Bei der Betrachtung diffundierender Atome wird die Atomkonzentration C_a verwendet, bei Leerstellen die Leerstellenkonzentration C_v .

Ausgehend von der Ausgangskonzentration $C_{a,0}$ der Atome bzw. $C_{v,0}$ der Leerstellen wird die Struktur in Abschnitt I zur Bestimmung der Stromdichte- und Temperaturverteilung numerisch berechnet. Die ermittelten Werte, insbesondere das Temperaturfeld, können für eine weitere Simulation der Struktur dynamik verwendet werden. Mit den Ergebnissen der struktur dynamischen Simulation lässt sich die Stressmigration berechnen. Zusätzlich können in diesem Punkt des Simulationsprozesses weitere Einflussgrößen berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt kann aus den berechneten Werten die Materialflussdich-

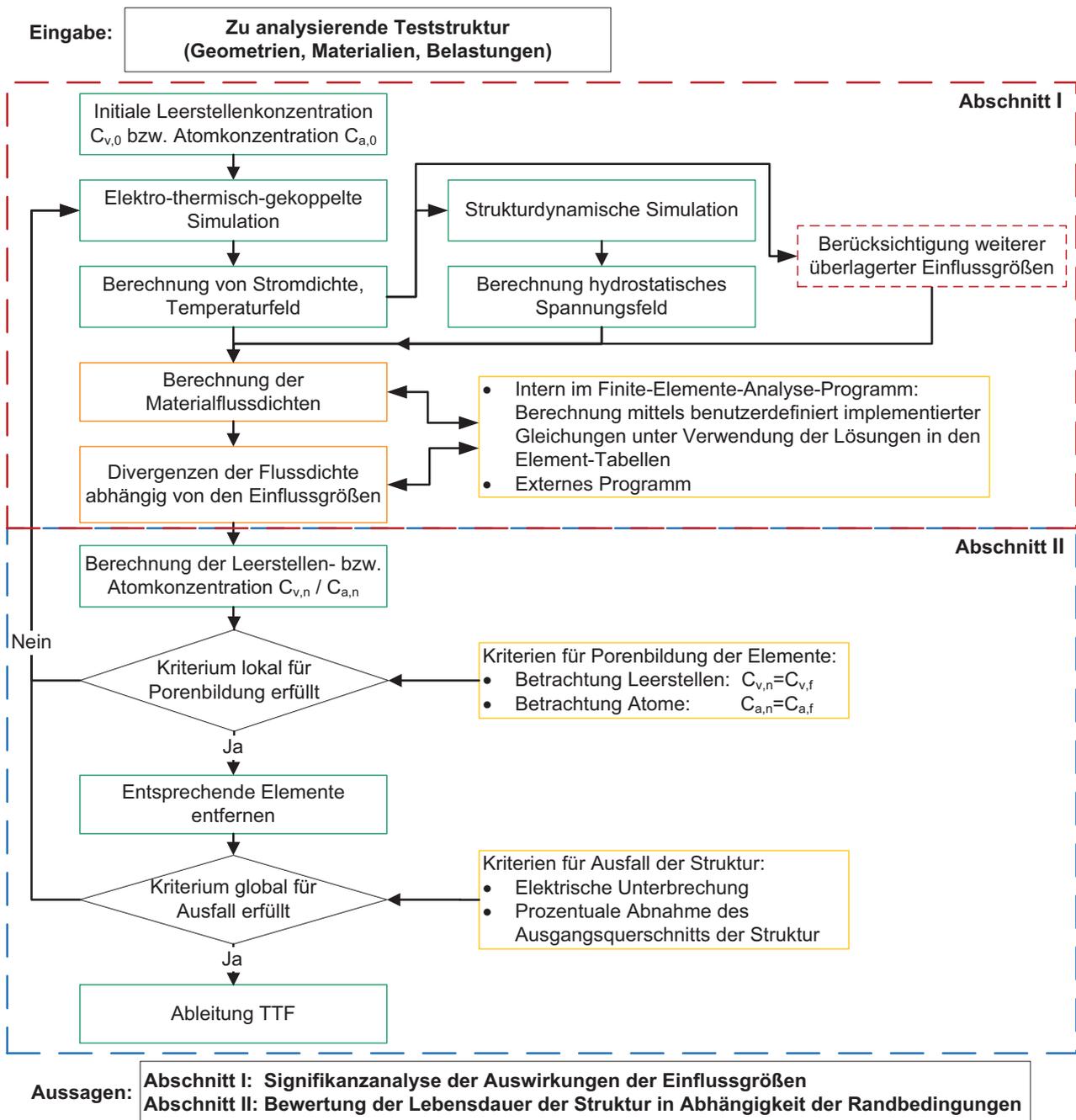


Abbildung 2.18: Simulation der Schädigung von stromdurchflossenen Strukturen, Erweiterung der indirekten Kopplung nach [126] [150] [101] [102] [147]

te bestimmt werden. Im Finite-Elemente-Analyse (FEA)-Programm *ANSYS® Multiphysics*, das in dieser Arbeit zur numerischen Berechnung verwendet wurde, ist diese Berechnung derzeit (2011) nicht direkt implementiert. Zur Einbindung von benutzerdefinierten, analytischen Gleichungen können die Element-Tabellen verwendet werden. Diese speichern für jedes Element des Modells die berechneten Werte. Auf diese Werte kann zugegriffen und Standard-Rechen-

operationen können angewandt werden. Beliebige analytische Gleichungen können darüber direkt in *ANSYS[®] Multiphysics* berechnet werden. Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung von nicht implementierten Gleichungen kann über externe Programme realisiert werden. Die entsprechenden Werte werden zunächst aus dem FEA-Programm ausgelesen und extern weiterverarbeitet, [94]. Zur Veranschaulichung der Ergebnisse können die so berechneten Werte nach *ANSYS[®] Multiphysics* importiert werden. Nach der Berechnung der Materialflussdichte und der Divergenzbildung wird der Ausfallort bestimmt. Schließlich können Aussagen zur Signifikanz der betrachteten Fehlermechanismen getroffen werden.

In Abschnitt II der numerischen Berechnung wird aufbauend auf den Ergebnissen von Abschnitt I eine Ausfallzeit *TTF* berechnet. Es wird der reziproke Zusammenhang $TTF \propto 1/\text{div}(J)$ angenommen. Die Konzentration C_a bzw. C_v wird für den Bereich der höchsten Divergenz angepasst und die entsprechenden Finiten-Elemente im Modell entfernt, wenn das definierte Kriterium zur Porenbildung erreicht ist. Für die Atomdiffusion wird die kritische Konzentration mit $C_{a,f}$ beschrieben, für die Leerstellendiffusion mit $C_{v,f}$.

Es wird ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Divergenz der Materialflussdichte und einer allgemeinen Ansatz-Funktion F_a angenommen, Gl. 2.52, [38]. In der parametrisierbaren Funktion F_a werden alle Randbedingungen der Belastungen und Materialdaten der zu betrachtenden Effekte abgebildet.

$$\text{div}(J_a(t)) = C_a(t) \cdot F_a \quad (2.52)$$

Gleichung 2.52 wird substituiert in die Gleichung 2.13 zur Beschreibung der zeitlichen Änderung der Konzentration, Gl. 2.53. Durch Integration von Gleichung 2.53 über einen Zeitbereich t erhält man Gleichung 2.54, [38].

$$C_a(t) \cdot F_a + \frac{\partial C_a(t)}{\partial t} = 0 \quad (2.53)$$

$$\int_{C_{a,0}}^{C_a(t)} \frac{dC_a(t)}{C_a(t)} = \int_{t=0}^t -F_a dt \quad (2.54)$$

Die Lösung des Integrals erfolgt mit dem expliziten Euler-Formalismus, [38] [147]. Bei Betrachtung der Atomkonzentration kann diese zeitabhängig für die Fehlerregion mit Gleichung 2.55 beschrieben werden.

$$C_a(t) = C_{a,0} \cdot \exp(-F_a \cdot t) \quad (2.55)$$

Es wird definiert, dass zum Ausfallzeitpunkt *TTF* die Konzentration an

Atomen $C_a(TTF)$ auf 10 % der Anfangskonzentration $C_{a,0}$ abgenommen hat, Gl. 2.56, [38]. Nach Substitution von F_a kann die TTF direkt über die Divergenz der Materialflussdichte bestimmt werden, Gl. 2.57, [38].

$$C_a(TTF) = C_{a,0} \cdot \exp(-F_a \cdot TTF) = 0,1 \cdot C_{a,0} \quad (2.56)$$

$$TTF = \ln(10) \cdot \frac{1}{F_a} = \ln(10) \cdot \frac{C_{a,0}}{\text{div}(J_a)} \quad (2.57)$$

Bei der numerischen Simulation wird das Gesamtvolumen in Finite-Elemente aufgeteilt. Die Betrachtung der Atomkonzentration wird auf diese Elemente bezogen. Diese zeitabhängige, lokale Konzentrationsänderung kann numerisch für die Anzahl n_E der Elemente betrachtet werden, die den Ausfallort mit $n_E \geq i$ abbilden, Gl. 2.58. Die Ausfallzeit TTF lässt sich aus der Summe aller TTF_i der Einzel-Elemente ableiten, Gl. 2.59, [38]. Eine konstante Elementgröße innerhalb der Ausfallregion ist Voraussetzung dieser Rechnung.

$$C_{a,i}(TTF_i) = C_{a,0} \cdot \exp(-F_{a,i} \cdot TTF_i) = 0,1 \cdot C_{a,0} \quad (2.58)$$

$$TTF = \sum_{i=1}^{n_E} (TTF_i) = \ln(10) \cdot C_{a,0} \cdot \frac{1}{n_E} \cdot \sum_{i=1}^{n_E} \frac{1}{\text{div}(J_{a,i})} \quad (2.59)$$

Über den im Rahmen der vorliegenden Arbeit eingefügten Faktor $\frac{E_{del,i}}{E_{ges}}$, der das Volumen E_{del} der in jedem Schritt entfernten Elemente ins Verhältnis zum Gesamtvolumen E_{ges} der Elemente setzt, kann die Geometrie der Struktur und der Elemente berücksichtigt werden, Gl. 2.60. Die Ausfallregion wird in Abhängigkeit der Divergenz der Materialflussdichte in N_E beliebige Volumina eingeteilt. In der Berechnung werden die einzelnen TTF dieser Volumina aufsummiert. Für die Divergenz wird der Mittelwert angesetzt, der sich für das Volumen unter Berücksichtigung der zunehmenden Schädigung einstellt.

$$TTF = \ln(10) \cdot C_{a,0} \cdot \sum_{i=1}^{N_E} \frac{1}{\text{div}(J_{a,i})} \cdot \frac{E_{del,i}}{E_{ges}} \quad (2.60)$$

Entsprechend dem Vorgehen zur Ableitung der TTF aus der Numerik nach Gleichung 2.60 wird ein weiterer Ansatz zur Berücksichtigung der analytischen Lösung nach Gleichung 2.51 betrachtet. Diese in Kapitel 2.3.1 hergeleitete Gleichung wird um die Berücksichtigung diskreter Volumina E_{del} erweitert, um die TTF entsprechend der mit numerischen Verfahren zu bestimmenden Divergenzen berechnen zu können, Gl. 2.61.

$$TTF = \frac{V_c}{\Omega \cdot \Delta l \cdot \delta \cdot h} \cdot \sum_{i=1}^{N_E} \frac{1}{\text{div}(J_{a,i})} \cdot \frac{E_{del,i}}{E_{ges}} \quad (2.61)$$

Vorteil dieser Betrachtung ist eine Berücksichtigung spezifischer Material- und Diffusionsparameter. Im Vergleich zu Gleichung 2.60 ist der Faktor vor der Summe in Gleichung 2.61 physikalisch begründet.

Zudem erfolgt die Simulation in diskreten Zeitschritten m . Die Berechnung der Konzentration $C_{a,m+1}$ im Zeitschritt $m+1$ unter Berücksichtigung des vorhergehenden Zeitschritts m erfolgt nach Gleichung 2.62, [101]. Eine definierte Anzahl an Elementen wird je Zeitschritt der transienten Berechnung bei Erreichen des Ausfallkriteriums entfernt, bis die Struktur an einer Stelle elektrisch unterbrochen ist. Durch Summierung der Zeitschritte bis zum Ausfall kann die TTF berechnet werden.

$$C_{a,m+1} = C_{a,m} \cdot \exp(-F_{a,m} \cdot \Delta t_m) \quad (2.62)$$

Die Simulationsschritte bilden keine direkte Zeitkorrelation mit der Versuchsdauer. Diese Schritte müssen über geeignete Methoden in eine Zeit umgerechnet werden. Für die Betrachtung der Diffusion der Atome zeigt sich, dass eine direkte Bestimmung der TTF mit der numerischen Modellierung nur fehlerbehaftet möglich ist, [140]. Die Herausforderung bei der Ableitung der TTF aus der numerischen Berechnung ist es daher, diesen Zusammenhang zu ermitteln. Die Kalibrierung des Modells erfolgt praxisnah mittels experimenteller Untersuchungen an realen Testaufbauten. Die numerisch ermittelten Zeiten bis zum Ausfall dieser Teststrukturen werden mit den Messwerten abgeglichen. Proportionalitätsfaktoren der Lebensdauerabschätzungen zwischen Experiment und Simulation liegen in einem Bereich von 400 bis 9000, [38]. Insbesondere kann die numerische Berechnung genutzt werden, um Schwachstellen im Design zu analysieren und eine Signifikanzanalyse der Fehlermechanismen durchzuführen. Es kann zudem gezeigt werden, dass bleifreies Lot wie eutektisches SnAgCu widerstandsfähiger gegenüber Elektromigration ist als PbSn-Lot, [101].

Zur Beschreibung von Körnern und deren Einfluss kann die Monte-Carlo-Simulation genutzt werden. Mit dieser können stochastisch verteilte Korngrößen im Modell erzeugt werden, [95]. Weitere Herausforderungen in Bezug auf die numerische Simulation der Elektromigration sind die Modellierung der Material-Anhäufungen, die Berücksichtigung des IMC-Wachstums und dessen Auflösung, sowie die messtechnische Ermittlung aller relevanten Parameter für die Modellbildung, [100]. Für die Berücksichtigung zeitabhängiger Materialver-

änderungen wie die Bildung intermetallischer Phasen stehen die Materialdaten vielfach nicht zur Verfügung.

2.3.3 Teststrukturen und Messverfahren zur Ausfalldetektion

Zur Untersuchung von Strukturen hinsichtlich der Zuverlässigkeit bei hohen Stromdichten gibt es für Leiterbahnen und auf *Wafer*-Level-Ebene Teststrukturen, die vom *National Institute of Standards and Technology* (NIST) standardisiert sind, [5]. Aufbauend auf dieser Standard-Struktur wurden verschiedene Variationen diskutiert, um Effekte von Materialübergängen zu reduzieren und das *current crowding* zu minimieren, [110] [141] [130] [66]. Bei der Untersuchung an normalen *Flip-Chip*-Verbindungen sind prinzipiell alle dargelegten Effekte überlagert. Bei der so genannten *Daisy-Chain*-Struktur sind alle Lotverbindungen elektrisch miteinander in einer Kette verschaltet und werden gemeinsam überwacht, Abb. 2.19a. Fällt eine Lotverbindung aus, so fließt in der gesamten Kette kein Strom mehr und es kann keine Aussage über die ausgefallene Verbindung erfolgen.

Für Lotverbindungen werden in der Literatur verschiedene Teststrukturen beschrieben, die die Einflüsse bei den Untersuchungen minimieren sollen. Aufgrund des schmalen Querschnitts der Leiterbahnen auf der Chipseite herkömmlicher *Flip-Chip*-Strukturen werden mehr als eine stromtragende Leiterbahn vorgeschlagen, die in einem zu testenden *Bump* münden. Zudem können zur Bewertung der Effekte in einem definierten *Bump* drei oder mehr *Bumps* als Stromzuführung eingesetzt werden, Abb. 2.19b. Die Stromdichte ist in diesen *Bumps* um den Faktor drei bzw. höher reduziert.

Strukturen mit einer definierten Kerben-Geometrie in V-Ausführung (engl. *V-groove*) ermöglichen die Analyse der Interaktion der elektrischen und che-

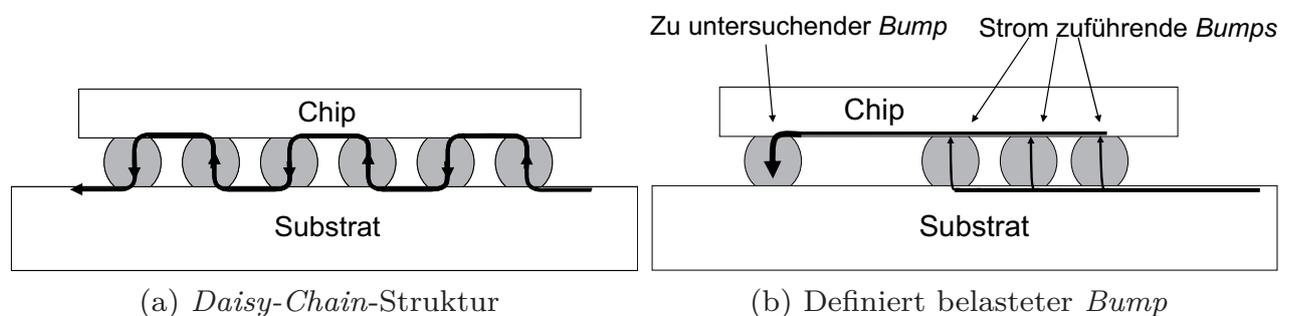


Abbildung 2.19: Designs zur Kontaktierung von Lotverbindungen zur Untersuchung des Einflusses von Elektromigration: a) *Daisy-Chain*-Struktur, [67], b) Definiert belasteter *Bump*, nach [67]

mischen Kräfte unter homogener Stromdichteverteilung, Abb. 2.20. Diese Art der Verbindung bietet den Vorteil, dass durch den planaren Aufbau die lokale Zunahme der Stromdichte, sowie die Spannungs- und Thermomigration minimiert werden. Letzterer Effekt ist Ergebnis der direkten thermischen Anbindung an das aus Silizium bestehende Substrat. Nachteilig sind die starke metallurgische Reaktion des Lots mit den Materialien in der Kerbe und der vorhandene Einfluss der Materialübergänge. Mit der Struktur sollen Lotmaterialien und die Bildung intermetallischer Phasen untersucht werden. Zudem kann die Rückflussspannung nachgewiesen werden.

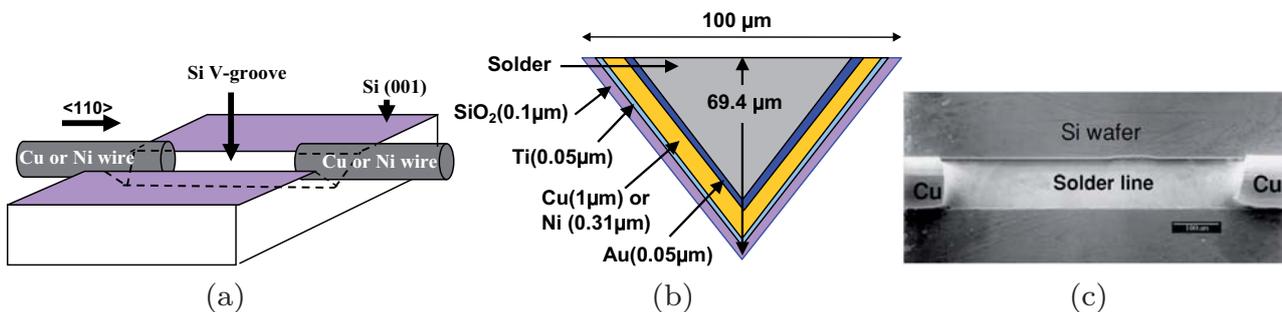
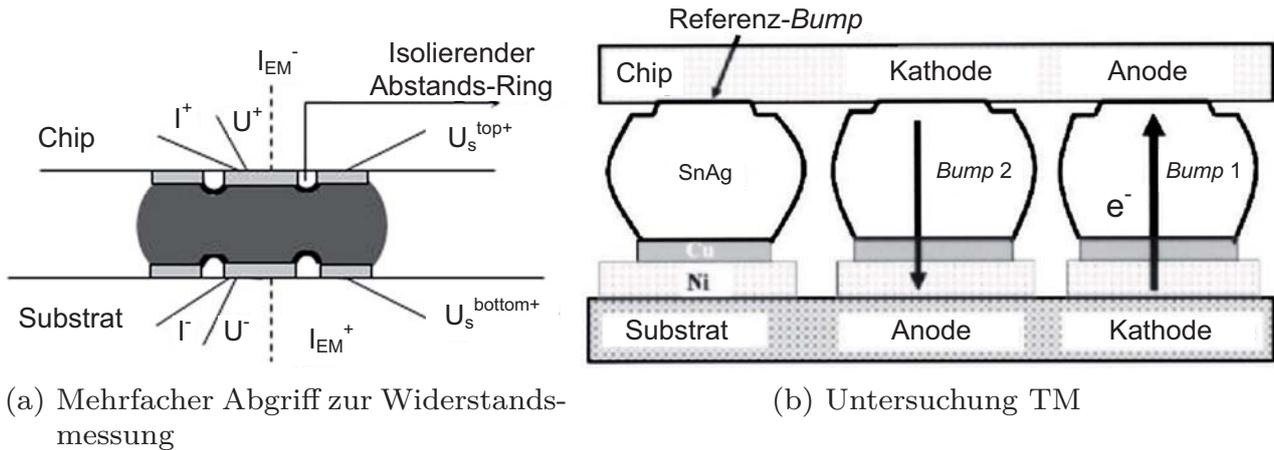


Abbildung 2.20: V-groove Teststruktur zur Untersuchung des Einflusses von Elektromigration auf Lotwerkstoffe a) Skizze der Ankontaktierung, [116], b) Querschnitt durch den V-Graben mit Details der Kontaktierungsmaterialien, [116], c) Aufgebaute Teststruktur, [144]

Um die Einflüsse von mechanischen Spannungen zu reduzieren, werden Materialien mit gleichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten für Chip und Substrat verwendet, wie z.B. Silizium. Um auch den Blech-Effekt an Lotmaterialien zu untersuchen und die Grenz-Stromdichte zu ermitteln, werden Lotstreifen eingesetzt, [56].

Zur Analyse des von der Strombelastung richtungs- und ortsabhängigen Ausfallverhaltens innerhalb von Lotverbindungen wird in [78] eine neue Teststruktur diskutiert. Diese hat je drei Ankontaktierungsbereiche an Anode und Kathode, um den Ort der Porenbildung über den Widerstand ermitteln zu können. Kathode und Anode können separat messtechnisch ankontaktiert werden, Abb. 2.21a. Weitere Strukturen mit reduzierten lokalen Stromdichtezunahmen im Bereich der Übergänge von Substrat zu Lotverbindungen werden durch angepasstes Design der UBM und Ankontaktierung der Leiterbahn erreicht, [125] [29] [164] [44]. Diese haben das Ziel, Lotverbindungen elektromigrationsresistenter auslegen zu können und werden weniger in Untersuchungen verwendet.



(a) Mehrfacher Abgriff zur Widerstandsmessung

(b) Untersuchung TM

Abbildung 2.21: a) Lotverbindung mit mehrfachem elektrischem Abgriff zur Untersuchung des Gebiets der Porenbildung über eine Widerstandsmessung, nach [78], b) Untersuchung des Einflusses von Thermomigration auf einen elektrisch nicht kontaktierten Referenz-Bump, [132]

Um den Einfluss des Temperaturgradienten und damit der Thermomigration separat untersuchen zu können, kann ein nicht strombelasteter *Bump* in die unmittelbare Nähe des bei der Elektromigrationsuntersuchung zu analysierenden *Bumps* gesetzt werden. Durch das Design der Teststruktur, das eine thermische Leitfähigkeit der verwendeten Materialien vorgibt, muss sichergestellt werden, dass die Temperaturverhältnisse in diesem dem des bestromten *Bumps* entsprechen. Bei einem *Flip-Chip*-Aufbau mit Kugelgitteranordnung (engl. *Ball Grid Array*, BGA) werden z.B. nicht alle *Bumps* verschaltet. Dieses ist in Abbildung 2.21b schematisch angedeutet.

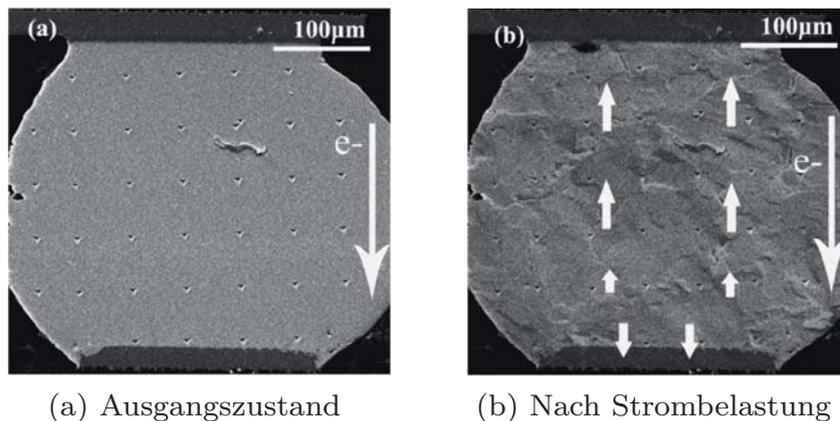
Die messtechnische Überwachung und Ausfalldetektion der Teststruktur erfolgt über die elektrische Widerstandsmessung. Als Ausfallkriterium wird ein Widerstandsanstieg in Prozent, Ohm oder ein offener Kontakt definiert, [67]. Nach [119] gilt Gleichung 2.63 zur Beschreibung der Widerstandsänderung bei Elektromigration mit R_0 dem Ausgangswiderstand, t der Versuchsdauer und α_A einem Proportionalitätsfaktor.

$$dR(t) = R_0 \cdot \left(\exp(\alpha_A \cdot \sqrt{t}) - 1 \right) \quad (2.63)$$

Aufgrund der zu messenden Widerstandsänderung im $m\Omega$ -Bereich werden Vierleiter-Messungen und Brückenschaltungen wie die Thomson- und die Wheatstone-Brücke empfohlen. Die Vierleiter-Messung wird verwendet, um die Widerstände der Zuleitungen zum Messobjekt vernachlässigen zu können,

die bei einer Zweileiter-Messung mitberücksichtigt werden müssen. Über zwei Leitungen fließt der in die Struktur eingepreßte Strom und über zwei weitere Leitungen, die sich möglichst dicht am Messobjekt befinden, wird die über der Struktur abfallende Spannung hochohmig gemessen. Brückenschaltungen zeichnen sich durch eine genaue Bestimmung der Widerstandswerte durch Verwendung eines Spannungsteilers aus, [93]. Die Wheatstone-Brücke kann für Widerstandsänderungen im $m\Omega$ -Bereich, die Thomson-Brücke für einen Bereich weniger $\mu\Omega$ eingesetzt werden. Nachteilig ist die im Vergleich zum Vierleiter-Messverfahren zusätzlich benötigte abgegliche Messumgebung.

Eine optische *in-situ* Untersuchung der Elektromigration in der Struktur ist mit dem sogenannten Nano-Intendations-Verfahren möglich. Bei diesem werden vor dem Experiment Querschliffe der Lotverbindungen angefertigt und die angeschliffenen Teststrukturen mit einer nm -abmessenden Prüfspitze intendiert, Abb. 2.22.



(a) Ausgangszustand

(b) Nach Strombelastung

Abbildung 2.22: Messtechnische Ermittlung des diffundierenden Materials mittels Nano-Intendation: a) Ausgangszustand, [157], b) Nach einer Strombelastung, $t=360$ h, $T=125$ °C, $j = 10^4$ A/cm², [157]

Eine Bewegung dieser Markierungen kann während des Experiments optisch untersucht werden und entspricht der Annahme nach dem Materialfluss innerhalb der Struktur. Materialparameter wie Z^* können abgeleitet werden, [91] [158]. Zudem kann an dieser präparierten Struktur eine berührungslose Temperaturmessung erfolgen.

3 Vereinfachtes Modell zur Bewertung der Schädigung durch Elektromigration

Bei der Entwicklung eines erweiterten Lebensdauermodells der Elektromigration können zwei Ansätze unterschieden werden. Um ein ganzheitliches Modell zu erstellen, müssen beim ersten Ansatz alle dargelegten Effekte berücksichtigt und mit fortschreitender Degradation kontinuierlich neu bewertet werden. Voraussetzung ist eine abschließende analytische Beschreibung jedes Einflusses. Benötigte Materialparameter müssen vollständig experimentell ermittelbar sein und bewertet werden. Die überlagerten Effekte sind bisher jedoch nicht abschließend mit Modellen beschreibbar, vgl. Kap. 2.2.3.

Um das Verständnis der Elektromigration für Lotverbindungen gezielt zu erweitern, müssen die überlagerten Effekte beim zweiten Ansatz separat betrachtet und analysiert werden. Die Erkenntnisse können dann in einem eigenständigen Lebensdauermodell mit reduzierten Modellparametern berücksichtigt werden. Bei isolierter Betrachtung der überlagerten Effekte kann die Degradation am reinen Lotwerkstoff abhängig von der Stromdichte und Temperatur und unabhängig von den Haupteinflussgrößen Thermo- und Stressmigration sowie der Materialübergänge untersucht werden. Die Migration muss bei diesem Ansatz für die definierte Ausfallregion innerhalb des Lotwerkstoffs beschrieben werden.

Die Modelle können anschließend mit Unterstützung numerischer Berechnungsverfahren auf die genauen Geometrien der Lotverbindung angewandt werden.

3.1 Beschreibung der Porengeometrie bei zunehmender Schädigung

Die Beträge der gegenläufigen Materialflüsse von Atomen $\vec{J}_{a,EM}$ und Leerstellen $\vec{J}_{v,EM}$ werden als äquivalent betrachtet, Gl. 3.1, [35].

$$\vec{J}_{v,EM} = \frac{C_v \cdot D_v}{k \cdot T} \cdot Z^* \cdot e \cdot \vec{E} = -\frac{C_a \cdot D_a}{k \cdot T} \cdot Z^* \cdot e \cdot \vec{E} = -\vec{J}_{a,EM} \quad (3.1)$$

Für das Produkt der Diffusionskoeffizienten D von Atomen und Leerstellen und deren Konzentrationen C gilt demnach Gleichung 3.2, [160] [37]. Die Leerstellenkonzentration $C_{\nu,0}$ im ausgeglichenen Zustand von Zinn wurde zu $C_{\nu,0}/C_a = 1 \cdot 10^{-5}$ bestimmt, [8].

$$C_{\nu} \cdot D_{\nu} = C_a \cdot D_a \quad (3.2)$$

Über die Berechnung der Divergenz der Leerstellen-Materialflussdichte, $div(\vec{J}_{EM}) < 0$, wird der Ausfallort und dessen Volumen bestimmt. Die zunehmende Schädigung erfolgt aufgrund der Ansammlung von Leerstellen. Diese kann über die Leerstellenflussdichte beschrieben werden.

In [145] wird für eine Leiterbahn die zunehmende Porenbildung $\partial V_{\nu,KG}(t)$ in einem Volumenelement über die Leerstellenflussdichte $\vec{J}_{\nu,EM,KG}$ entlang der Korngrenzen beschrieben, Gl. 3.3. Es wird angenommen, dass die Leerstellenflussdichte signifikant durch die Elektromigration bestimmt wird.

$$\partial V_{\nu,KG}(t)|_t = \vec{J}_{\nu,EM,KG}(t) \cdot \delta \cdot h \cdot \Omega \partial t \quad (3.3)$$

Der Diffusionspfad der $\vec{J}_{\nu,EM,KG}$ ist eine Korngrenze mit der Weite δ . Die Querschnittsfläche der Korngrenze und damit die für die Diffusion zu berücksichtigende Fläche entspricht $\delta \cdot h$ mit h der Breite der Korngrenze orthogonal zum Leerstellenfluss. Alle diffundierenden Leerstellen akkumulieren sich an einem Korn und bilden eine gemeinsame Pore. Eine theoretische Rückdiffusion wird vernachlässigt.

Im Gegensatz zu den betrachteten Leiterbahnen erfolgt die Zunahme der Porengeometrie bei Lotmaterialien über die Volumendiffusion, Kapitel 2.2.1.1.

In dieser Arbeit wird ein neuer Ansatz mit approximierter Porenausbildung und -geometrie für Lotwerkstoffe diskutiert, wie es in Abbildung 3.1 schematisch dargestellt ist. Ausgehend von einem definierten Volumenelement mit den Abmessungen Länge l , Breite a und Tiefe a wird die sich ausbildende Porengeometrie mit der Breite $b(t)$ beschrieben.

Die Abmessung $b(t)$ der Pore wird auf den Gesamtdurchmesser a normiert, Gl. 3.4.

$$x(t) = \frac{b(t)}{a} \quad (3.4)$$

Zur Vereinfachung der Modellvorstellung wird nur die Bildung einer einzelnen Pore angenommen. Für die Bereiche 1 und 3 nach Abbildung 3.1b wird eine Divergenz der Materialflussdichte von 0 angenommen, $div(\vec{J}_{\nu,EM,1}) = div(\vec{J}_{\nu,EM,3}) = 0$, d.h. es kommt nicht zu einem Materialab-

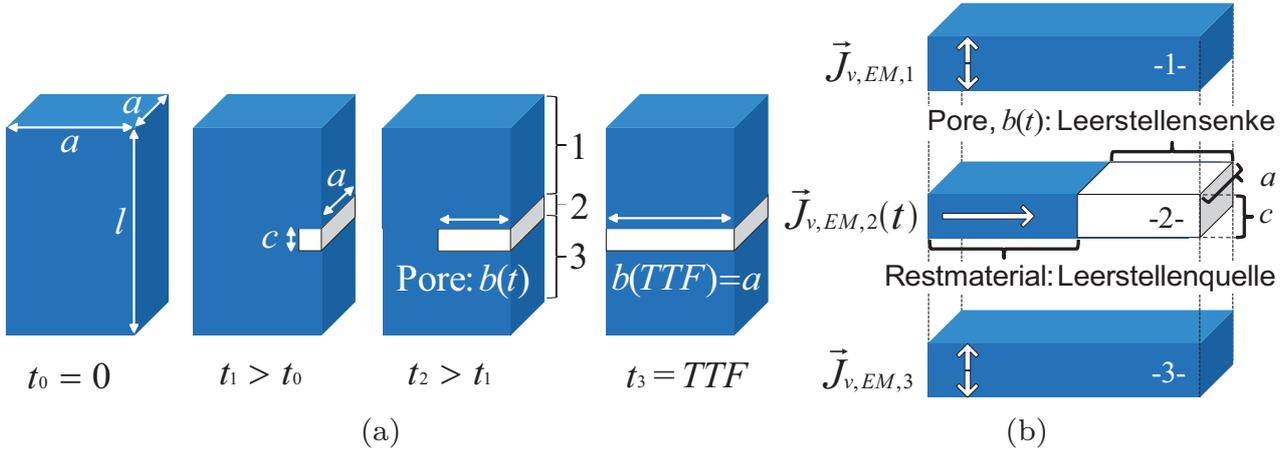


Abbildung 3.1: a) Ansatz zur Beschreibung der Porenausbreitung in einem definierten Volumenelement,
 b) Einteilung in drei Bereiche und Details der Materialflussdichten $\vec{J}_{\nu,EM}$

trag oder einer Materialansammlung. In Abhängigkeit der Belastungsrichtung der Antriebskraft ist der Materialfluss aufwärts oder abwärts gerichtet.

Die Region der Porenbildung im Bereich 2 wird in Leerstellenquelle und -senke unterschieden. Die Diffusion erfolgt von der Leerstellenquelle orthogonal gerichtet zur Leerstellensenke über die Gesamtfläche mit der Höhe c und der Weite a . Dort agglomerieren diese zu einer Pore mit der Abmessung $c \cdot a \cdot b(t)$. Der Zuwachs an Volumen $\partial V_{\nu,Vol}(t)$ durch Elektromigration innerhalb des Zeitraums ∂t zum Zeitpunkt t kann definiert werden über Gleichung 3.5.

$$\begin{aligned} \partial V_{\nu,Vol}(t)|_t &= \vec{J}_{\nu,EM,Vol}(t) \cdot c \cdot a \cdot \Omega \partial t \\ \frac{\partial V_{\nu,Vol}(t)}{\partial t} &= \vec{J}_{\nu,EM,Vol}(t) \cdot c \cdot a \cdot \Omega \end{aligned} \quad (3.5)$$

Zu Beginn der Schädigung befindet sich die Leerstellenkonzentration C_{ν} im gesamten Lotmaterial in einem ausgeglichenen Zustand mit $C_{\nu} = C_{\nu,0}$. Der Annahme nach beginnt die Porenbildung beim Erreichen einer kritischen Leerstellendichte $C_{\nu,f}$, mit $C_{\nu,f} \gg C_{\nu,0}$. Das gesamte Leerstellenvolumen $V_{\nu,Vol}(t)$ in Bereich 2 des Modells ergibt sich aus der Summe der Volumina mit Leerstellenkonzentrationen $C_{\nu,0}$ im Bereich des Restmaterials und des Volumens der Pore mit $C_{\nu,f}$, Abb. 3.2.

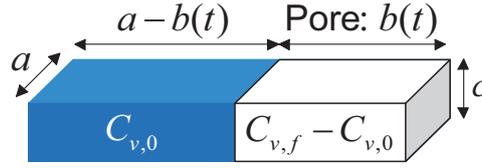


Abbildung 3.2: Beschreibung der Leerstellenkonzentrationen im Bereich 2 des Modells

Dieses Leerstellenvolumen kann allgemein beschrieben werden über Gleichung 3.6.

$$\begin{aligned}
 V_{\nu,Vol}(t) &= C_{\nu,f} \cdot \Omega \cdot a \cdot c \cdot b(t) + C_{\nu,0} \cdot \Omega \cdot a \cdot c(a - b(t)) \\
 &\quad - C_{\nu,0} \cdot \Omega \cdot a \cdot c \cdot b(t) \\
 &= C_{\nu,f} \cdot \Omega \cdot a \cdot c \cdot b(t) + C_{\nu,0} \cdot \Omega \cdot a \cdot c(a - 2b(t)) \quad (3.6)
 \end{aligned}$$

Zum Zeitpunkt $t = 0$ liegt keine Pore vor und das Leerstellenvolumen wird nur über die Leerstellen $C_{\nu,0}$ im ausgeglichenen Zustand bestimmt, Gl. 3.7. Zum Zeitpunkt $t = TTF$ erstreckt sich die Pore über den gesamten Querschnitt des Ausgangsvolumens und für das Leerstellenvolumen gilt Gleichung 3.8.

$$V_{\nu,Vol}(0) = C_{\nu,0} \cdot \Omega \cdot a^2 \cdot c \quad (3.7)$$

$$V_{\nu,Vol}(TTF) = C_{\nu,f} \cdot \Omega \cdot a^2 \cdot c - C_{\nu,0} \cdot \Omega \cdot a^2 \cdot c \quad (3.8)$$

Die Änderung des Leerstellenvolumens $\partial V_{\nu,Vol}(t)$ ergibt sich nach Differentiation von Gleichung 3.6 zu Gleichung 3.9. Für das kritische Leerstellenvolumen gilt $C_{\nu,f} = 1/\Omega$.

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V_{\nu,Vol}(t)}{\partial t} &= \frac{\partial b(t)}{\partial t} (a \cdot c - 2 \cdot C_{\nu,0} \cdot \Omega \cdot a \cdot c) \\
 \frac{\partial V_{\nu,Vol}(t)}{\partial t} &= \frac{\partial b(t)}{\partial t} a \cdot c \left(1 - \frac{2 \cdot C_{\nu,0}}{C_{\nu,f}} \right) \quad (3.9)
 \end{aligned}$$

Das Leerstellenvolumen durch die Volumendiffusion nach Gleichung 3.5 wird mit der Porenbildung nach Gleichung 3.9 gleichgesetzt, Gl. 3.11. In den Gleichungen werden die Materialflussdichte $\vec{J}_{\nu,EM,Vol}$ nach Gleichung 2.24 und die sich durch die Porenbildung ändernde Stromdichte $j(t)$ nach Gleichung 3.10 substituiert.

$$j(t) = \frac{I}{a \cdot (a - b(t))} \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial V_{\nu, Vol}(t)}{\partial t} &= \vec{J}_{\nu, EM, Vol}(t) \cdot c \cdot \Omega \cdot a = \frac{\partial b(t)}{\partial t} a \cdot c \left(1 - \frac{2 \cdot C_{\nu, 0}}{C_{\nu, f}} \right) \\
 \frac{C_{\nu} \cdot D_{\nu, Vol} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot I \cdot \Omega}{k \cdot T \cdot a \cdot (a - b(t))} &= \frac{\partial b(t)}{\partial t} \left(1 - \frac{2 \cdot C_{\nu, 0}}{C_{\nu, f}} \right) \\
 \frac{C_{\nu} \cdot D_{\nu, Vol} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot I \cdot \Omega}{k \cdot T \cdot a \left(1 - \frac{2 \cdot C_{\nu, 0}}{C_{\nu, f}} \right)} &= \frac{\partial b(t)}{\partial t} \cdot (a - b(t)) \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

Im letzten Schritt wird die normierte Porenlänge $x(t)$ substituiert und es ergibt sich die zu lösende Differentialgleichung zur Beschreibung der Porenausbreitung, Gl. 3.12.

$$\frac{\partial x(t)}{\partial t} \cdot (1 - x(t)) - \frac{C_{\nu} \cdot D_{\nu, Vol} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot I \cdot \Omega}{a^3 \cdot k \cdot T \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot C_{\nu, 0}}{C_{\nu, f}} \right)} = 0 \quad (3.12)$$

Diese Differentialgleichung kann mit entsprechenden Randbedingungen gelöst und bei der Berechnung der Widerstände berücksichtigt werden.

3.2 Berechnung der Lebensdauer in Abhängigkeit der Porengeometrie und der Widerstandsänderung

Die allgemeine analytische Lösung von Gleichung 3.12 ergibt sich für $x_{1,2}(t)$ gemäß Gleichung 3.13 zu:

$$x_{1,2}(t) = 1 \pm \sqrt{1 + 2 \cdot B_x \cdot t + 2 \cdot C_x} , \quad (3.13)$$

mit

$$B_x = - \frac{C_{\nu} \cdot D_{\nu, Vol} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot I \cdot \Omega}{a^3 \cdot k \cdot T \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot C_{\nu, 0}}{C_{\nu, f}} \right)} . \quad (3.14)$$

Die Randbedingungen zum Anfangs- sowie Ausfallzeitpunkt, $x(t = 0) = 0$ und $x(t = TTF) = 1$, werden bei der Lösung der Differentialgleichung 3.12 und zur Ermittlung der Konstante C_x berücksichtigt. Für $x(0) = 0$ ergibt sich C_x zu 0, Gl. 3.15.

$$\begin{aligned}
 x(0) &= 1 - \sqrt{1 + 2 \cdot C_x} = 0 \\
 C_x &= 0 \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

Die Porenausbreitung $x(t)$ ergibt sich somit zu Gleichung 3.16.

$$x(t) = 1 - \sqrt{1 + 2 \cdot B_x \cdot t} \quad (3.16)$$

Unter Berücksichtigung der weiteren Randbedingung $x(t = TTF) = 1$ ergibt sich B_x nach Gleichung 3.16 zu Gleichung 3.17.

$$B_x = -\frac{1}{2 \cdot TTF} \quad (3.17)$$

Die Ausfallzeit TTF kann somit aufgelöst werden nach Gleichung 3.18.

$$TTF = -\frac{1}{2 \cdot B_x} = \frac{a^3 \cdot k \cdot T \cdot \left(1 - \frac{2 \cdot C_{\nu,0}}{C_{\nu,f}}\right)}{2 \cdot C_{\nu} \cdot D_{\nu,Vol} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot I \cdot \Omega} \quad (3.18)$$

Unter Berücksichtigung der Annahme, dass $C_{\nu,f} \gg C_{\nu,0}$ gilt, kann die Gleichung zur Berechnung der TTF vereinfacht werden zu Gleichung 3.19.

$$TTF \approx \frac{a^3 \cdot k \cdot T}{2 \cdot C_{\nu} \cdot D_{\nu,Vol} \cdot Z^* \cdot e \cdot \rho \cdot I \cdot \Omega} \quad (3.19)$$

Als Lösung der Differentialgleichung ergibt sich im Ergebnis folgende Gleichung 3.20 für $x(t)$:

$$x(t) = 1 - \sqrt{1 - \frac{t}{TTF}} \quad (3.20)$$

Die zunehmende Pore innerhalb des Volumenelements führt zu einer Änderung des elektrischen Widerstands des Gesamtvolumens. Zum Zeitpunkt $t = 0$ liegt keine Schädigung vor und es gilt Gleichung 3.21, [75].

$$R(t = 0) = \frac{\rho \cdot l}{a^2}. \quad (3.21)$$

Der zeitabhängige Widerstand für den Ansatz ergibt sich zu Gleichung 3.22.

$$R(t) = \frac{\rho \cdot (l - c)}{a^2} + \frac{\rho \cdot c}{a \cdot (a - b(t))} = \frac{\rho}{a^2} \cdot \left(l - c + \frac{c}{1 - x(t)} \right) \quad (3.22)$$

Messtechnisch werden im Experiment die zeitlichen Widerstandsänderungen $\Delta R(t)$ überwacht, Gl. 3.23. Der zeitabhängige Widerstand $R(t)$ der Ansatzfunktionen wird zur Berechnung genutzt und die Gleichung nach dt abgeleitet, Gl. 3.24.

$$\Delta R(t) = R(t) - R(t=0) = \frac{\rho \cdot c}{a^2} \cdot \frac{x(t)}{1 - x(t)} \quad (3.23)$$

$$\frac{d\Delta R(t)}{dt} = \frac{\rho \cdot c}{a^2} \cdot \frac{dx(t)}{dt} \cdot \frac{1}{(1 - x(t))^2} \quad (3.24)$$

Die Widerstandsänderung wird im letzten Schritt mit dem berechneten $x(t)$ substituiert und es ergibt sich ein weiteres Randwertproblem, Gl. 3.25.

$$\frac{d\Delta R(t)}{dt} = \frac{\rho \cdot c}{a^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot TTF} \cdot \left(1 - \frac{t}{TTF}\right)^{-\frac{3}{2}} \quad (3.25)$$

Für die Berechnung der Widerstandsänderung wird die Randbedingung $x(t=0) = 0$ gesetzt. Es wird die Änderung des Widerstands zum Ausgangszeitpunkt der Belastung ermittelt und zur Berechnung der TTF verwendet. Im Ergebnis erhält man zur Berechnung der TTF nach Umstellung folgende Gleichung 3.26.

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\Delta R(t)}{dt} \right|_{t=0} &= \frac{\rho \cdot c}{a^2} \cdot \frac{1}{2 \cdot TTF} \\ TTF &= \frac{\rho \cdot c}{a^2} \cdot \left(2 \cdot \left. \frac{d\Delta R(t)}{dt} \right|_{t=0}\right)^{-1} \end{aligned} \quad (3.26)$$

Mit dem diskutierten Vorgehen kann bei Betrachtung der Elektromigration in Lotwerkstoffen die Lebensdauer frühzeitig für unterschiedliche Konfigurationen analytisch und über eine Auswertung der Widerstandsänderung zu Beginn eines Experiments bzw. eines Einsatzes berechnet werden. Zur Beschreibung des Widerstandsanstiegs werden neben den Materialeigenschaften die Geometrieparameter Porenhöhe c , Durchmesser a sowie die lokalen Stromdichten j und Temperaturen T für die Auswertung berücksichtigt.

3.3 Berücksichtigung der Eigenerwärmung bei zunehmender Migration

Es wird angenommen, dass durch die zunehmende Porenbildung in der Ausfallregion der Querschnitt der Struktur lokal abnimmt. In der Folge steigt der thermische Widerstand R_{th} des Volumenelements an, wodurch die Joule'sche Erwärmung und damit die Temperatur lokal zunimmt. Dieser Umstand wird in den meisten Untersuchungen zur Vereinfachung der Modelle nicht berücksichtigt.

In diesem Abschnitt soll ein Ansatz diskutiert werden, um die Auswirkung der Temperaturzunahme mit der vereinfachten Betrachtung aus Kapitel 3.1 bewerten zu können.

Die zeitabhängige Temperatur $T(t)$ kann allgemein durch die Anfangstemperatur T_0 der Teststruktur und deren Zunahme ΔT beschrieben werden, Gl. 3.27 und Gl. 3.28, [75] [144].

$$T(t) = T_0 + \Delta T(t) \quad (3.27)$$

$$\Delta T(t) = R_{th} \cdot \Delta P = R_{th} \cdot \Delta R(t) \cdot I^2 \quad (3.28)$$

T_0 berücksichtigt die Eigenerwärmung der Struktur im Ausgangszustand durch die eingebrachte Leistung $P = R(t) \cdot I^2$, [144].

Für den im vorherigen Abschnitt diskutierten Ansatz der Porenbildung im Volumenelement gilt für den thermischen Widerstand nach Gleichung 3.29:

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda \cdot A_F} = \frac{c}{\lambda \cdot a \cdot (a - b(t))} = \frac{c}{\lambda \cdot a^2 \cdot (1 - x(t))}, \quad (3.29)$$

mit der Länge l des Elements, der spezifischen Wärmeleitfähigkeit λ des Materials und der Querschnittsfläche A_F .

Unter Berücksichtigung des berechneten $\Delta R(t)$ nach Gleichung 3.23 ergibt sich $T(t)$ zu Gleichung 3.30.

$$T(t) = T_0 + \frac{\rho \cdot c^2 \cdot I^2 \cdot x(t)}{\lambda \cdot a^4 \cdot (1 - x(t))^2} \quad (3.30)$$

Zur Berechnung des Einflusses der zunehmenden Temperatur auf die statisch berechnete TTF nach Gleichung 3.18 wird diese Gleichung mit zeit- und temperaturabhängigen Parametern erweitert und mit den nicht zeitabhängigen Parameter verrechnet, Gl. 3.31. Der temperaturabhängige Exponentialterm stammt aus dem Diffusionskoeffizienten D_{vol} .

$$TTF(T(t)) = TTF \cdot \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T_0}\right)}{T_0} \cdot \frac{T(t)}{\exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T(t)}\right)} \quad (3.31)$$

Nach Substitution des allgemeinen Ansatzes für $T(t) = T_0 + \Delta T(t)$ ergibt sich die Ausfallzeit in Abhängigkeit der Eigenerwärmung, Gl. 3.32.

$$TTF(T(t)) = TTF \cdot \frac{T_0 + \Delta T(t)}{T_0} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T_0}\right)}{\exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta T(t)}{T_0}\right)}\right)} \quad (3.32)$$

Unter der Randbedingung, dass die Temperaturzunahme $\Delta T(t)$ sehr klein im Vergleich zur Ausgangstemperatur T_0 ist, $\frac{\Delta T(t)}{T_0} \ll 1$, kann Gleichung 3.32 vereinfacht werden zu Gleichung 3.33.

$$\begin{aligned} TTF(T(t)) &\approx TTF \cdot \frac{T_0 + \Delta T(t)}{T_0} \cdot \frac{\exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T_0}\right)}{\exp\left(-\frac{E_a}{k \cdot T_0} \cdot \left(1 - \frac{\Delta T(t)}{T_0}\right)\right)} \\ &= TTF \cdot \left(1 + \frac{\Delta T(t)}{T_0}\right) \cdot \exp\left(-\frac{E_a \cdot \Delta T(t)}{k \cdot T_0^2}\right) \\ &\approx TTF \cdot \left(1 + \frac{\Delta T(t)}{T_0}\right) \cdot \left(1 - \frac{E_a \cdot \Delta T(t)}{k \cdot T_0^2}\right) \\ &\approx TTF \cdot \left(1 - \frac{E_a \cdot \Delta T(t)}{k \cdot T_0^2}\right) \end{aligned} \quad (3.33)$$

Zur quantitativen Abschätzung des Einflusses der zunehmenden Temperatur wird die berechnete $TTF(T(t))$ nach Gleichung 3.33 über dem Verhältnis $\Delta T/T_0$ aufgetragen, Abb. 3.3.

In [97] wurde numerisch gezeigt, dass sich die maximale Temperatur im Lot erst bei einer Schädigung von 96 % signifikant um 0,7 % erhöht. Unter der Voraussetzung einer Änderung der lokalen Temperatur von < 1 % mit fortschreitender Schädigung würde sich bei der Betrachtung nach Gleichung 3.33 die TTF theoretisch um maximal 20 % gegenüber einer konstanten Tempera-

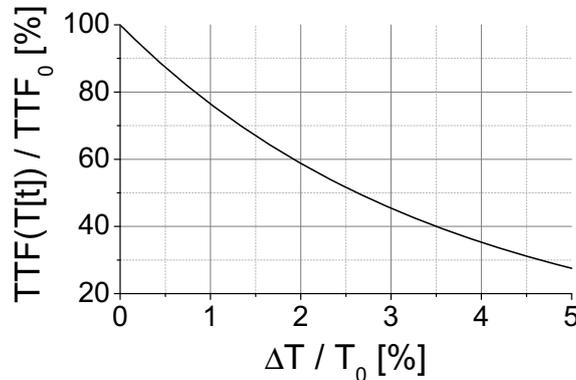


Abbildung 3.3: Einfluss der Temperaturzunahme ΔT auf die Berechnung der Lebensdauer TTF

tur verringern. Da diese Temperaturzunahme sehr langsam und erst bei starker Schädigung von rund 96 % signifikant eintritt, ist dessen Einfluss auf eine beschleunigte Schädigung des Materials durch EM zu vernachlässigen und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

3.4 Randbedingungen zur Verwendung des Modells

Vorteile der dargelegten Entwicklung des vereinfachten Modells sind die physikalisch begründete Herleitung und der *TTF*-Term, der eine direkte Bewertung der Lebensdauer ermöglicht. Des Weiteren kann in der Ansatzfunktion 3.11 die resultierende Materialflussdichte um weitere Einflussgrößen erweitert werden.

Anhand der Materialwerte in Tabelle 3.1 wurde die *TTF* mit Gleichung 3.18 unter Berücksichtigung von Gleichung 3.2 berechnet und über der Aktivierungsenergie E_a für eine konstante Stromdichte $j = 7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ aufgetragen, Abb. 3.4a.

Je höher die Aktivierungsenergie E_a für die Modellbetrachtung gewählt wird, desto stärker steigt die *TTF* an. Liegt die *TTF* für ein $E_a = 0,8 \text{ eV}$ bei $\approx 0,1 \text{ h}$, so steigt diese theoretisch auf $\approx 1 \cdot 10^{10} \text{ h}$ für ein $E_a = 1,8 \text{ eV}$ an.

Abbildung 3.4b veranschaulicht die Abnahme der *TTF* bei steigenden Stromdichten und Temperaturen für ein konstantes $E_a = 1,09 \text{ eV}$. Die Temperatur wird in dieser Berechnung ohne die steigende Eigenerwärmung bei zunehmender Stromdichte betrachtet. Es zeigt sich die antiproportionale Abhängigkeit der *TTF* von der Stromdichte im Modell. Dieser lineare Zusammenhang wird in der Literatur nicht erreicht, siehe Stromdichteexponenten in Kapitel 2.3.1. Durch eine stationäre Berücksichtigung der Temperaturerhöhung in Abhängig-

Tabelle 3.1: Materialparameter zur Berechnung der *TTF* aufgrund von EM für den Lotwerkstoff $\text{SnAg}_4\text{Cu}_{0,5}$

Parameter	λ [W/(mK)]	ρ [$10^{-8}\Omega\text{m}$]	c_s [J/(kgK)]	D_0 [$10^{-4}\text{m}^2/\text{s}$]	$C_{v,0}$ [$10^{24}/\text{m}^3$]	C_a [$10^{28}/\text{m}^3$]
Wert	57,3 ^{*1}	13,3 ^{*1}	219 ^{*1}	Sn: 10,7 ^{*2}	1,11 ^{*3}	3,69 ^{*3}
Z^*	α [$10^{-3}/\text{K}$]	Q^* [10^{-3}eV]	E_a [eV]	E [GPa]	Ω [10^{-29}m^3]	ρ_{Dens} [kg/m ³]
18 ^{*2}	2,8 ^{*1}	9,4 ^{*1}	1,09 ^{*2}	26,2 ^{*1}	2,71 ^{*2}	7390 ^{*1}

Referenzen: ^{*1}: [102], ^{*2}: [27], ^{*3}: [160]

keit von der Stromdichte würden sich die Kurvenformen von Abbildung 3.4b derart ändern, dass sich die TTF mit steigender Stromdichte weiter verkürzt. Das ΔT ist demnach für den stationären Fall zu ermitteln und in der Berechnung der TTF zu berücksichtigen.

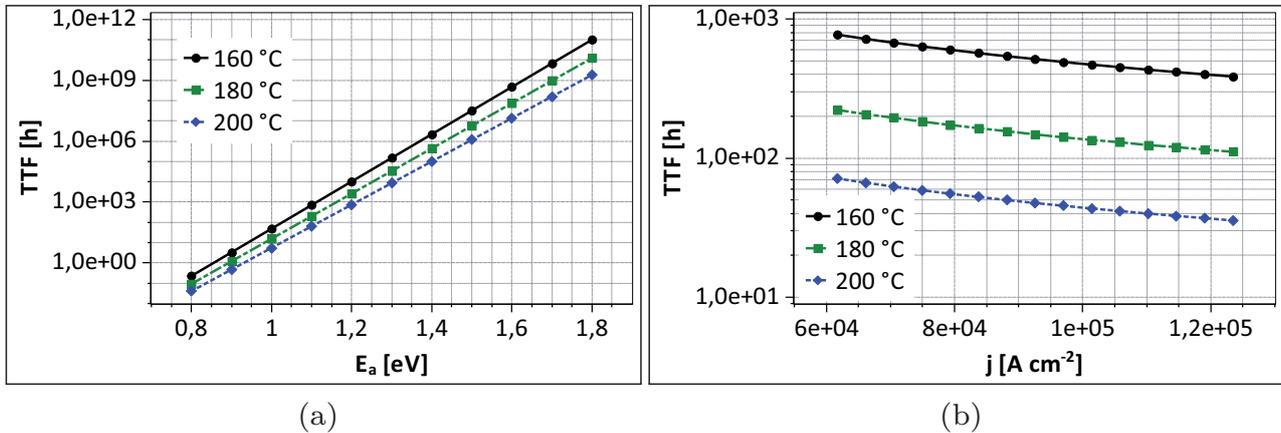


Abbildung 3.4: Analytische Berechnung der TTF über Gleichung 3.18: a) Abhängigkeit von der Aktivierungsenergie, $j = 7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, b) Abhängigkeit von der Stromdichte, $E_a = 1,09 \text{ eV}$

Eine Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit bei zunehmender Schädigung wird im Modell vernachlässigt. Wie dargelegt, tritt eine signifikante Temperaturerhöhung jedoch erst bei einer Schädigung von 96 % auf. Damit beeinflusst diese Zunahme den Prozess bis zum Ausfallzeitpunkt nicht signifikant, sodass diese in erster Näherung vernachlässigt werden kann.

Durch die Anwendbarkeit auf Teststrukturmesswerte im frühen Prüfstadium, kann eine Vorhersage der Lebensdauer bei realer Einsatzbedingung erfolgen. Voraussetzung zur Anwendung des Modells ist eine Untersuchung des Fehlermechanismus Elektromigration bei Separation von den in Kapitel 2.2.3 dargelegten Effekten. Zudem muss der Ausfallort in einem definierten Volumen innerhalb des zu untersuchenden Materials liegen.

4 Entwicklung von elektromigrationssensitiven Indikatorstrukturen

Damit der aufgrund äußerer Kräfte resultierende Materialfluss \vec{J} zu einer Porenbildung im Material führt, muss dessen Divergenz bei Betrachtung der Leerstellendiffusion < 0 und bei Atomdiffusion > 0 sein. Ausgehend von dieser Annahme werden die potentiellen Antriebskräfte analysiert und derart minimiert, dass der Einfluss der Elektromigration maximiert wird.

Zur Entwicklung der Teststruktur wird der Aufbau in die Kategorien Lotwerkstoff (Lot), Übergangsbereiche (UE), Ankontaktierung (AK) und Chip bzw. Substrat (ST) eingeteilt, Abb. 4.1. Jede Kategorie kann im Aufbau mit unterschiedlichen Geometrien und Materialien modelliert und hinsichtlich der Zielsetzung optimiert werden.



Abbildung 4.1: Kategorisierung von Teststrukturen nach dem zu untersuchenden Lotwerkstoff (Lot), den Übergangsbereichen (UE_{1,2}), Ankontaktierungen (AK_{1,2}) und dem Chip bzw. Substrat (ST_{1,2})

4.1 Separation überlagerter Einflussgrößen in *Flip-Chip*-Lotkontakten

Um die Effekte der Elektromigration an Lotverbindungen gezielt mit reduzierten überlagerten Einflüssen untersuchen zu können, werden in der vorliegenden Arbeit neuartige Teststrukturen mit einer lokalen Ausfallregion entwickelt. Bei Standard-Lotverbindungen liegt die Ausfallregion im Bereich zwischen den Übergängen bzw. der IMC und dem Lotwerkstoff, Abb. 4.2a.

Durch die Verschiebung der Ausfallregion im Lot entspricht diese in Näherung dem Volumen, das im Modellansatz berücksichtigt worden ist. Durch eine langsame Verjüngung des Lotwerkstoffs wird eine nahezu homogene Verteilung der Stromdichte in der Ausfallregion erreicht, Abb. 4.2b. Diese Region, die eine konkave Lotgeometrie annimmt, ist anders als die konvexe Form beim Standard-*Flip-Chip*-Lotkontakt lokal von der Bildung der intermetallischen Phase (IMC) isoliert, ebenso von den Materialübergängen. Die Auswirkungen des *current crowding* im Übergangsbereich UE_1 , UE_2 werden zudem minimiert. Korreliert der Ort der Bildung einer IMC nicht mit dem Ausfallort durch EM, so beeinflusst diese IMC nur den Widerstandsanstieg, jedoch nicht das Ausfallverhalten. Nicht vernachlässigt werden können Materialien, die unabhängig von der Bildung der IMC durch den Lotwerkstoff diffundieren. Deren Auswirkungen auf ein Ausfallverhalten müssen separat untersucht werden. Voraussetzung für einen Ausfall innerhalb der Verjüngung ist ein lokales Maximum der Stromdichte und der Divergenz der Materialflussdichte.

Zur Minimierung der Effekte von Temperaturgradienten, die zur Thermomi-

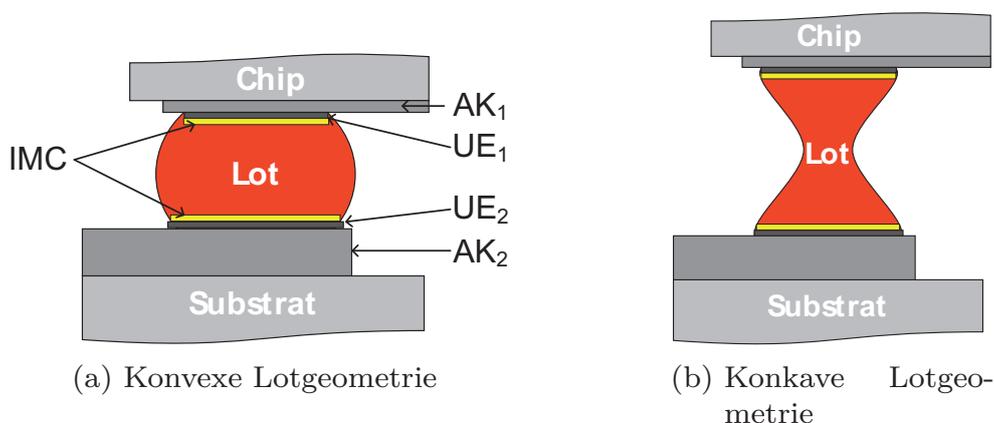


Abbildung 4.2: Schematische Kategorisierung von a) Standard-*Flip-Chip*-Aufbau mit konvexer Lotgeometrie, b) *Flip-Chip*-Aufbau mit Verjüngung in der Lotverbindung (konkave Lotgeometrie)

gration führen, muss die Entstehung der Joule'schen Erwärmung herab gesetzt werden. Durch den geringen Querschnitt der chipseitigen Leiterbahnen AK_1 nach Abbildung 4.2, der sich antiproportional auf den thermischen Widerstand nach Gleichung 3.29 auswirkt, erfolgt die Erwärmung bei Standard-*Flip-Chip*-Strukturen insbesondere in diesen Regionen. Diesem Prozess kann nach Gleichung 3.28 durch geringere Stromstärken oder eine Geometrieoptimierung entgegen gewirkt werden.

Die einsetzende Spannungsmigration kann nicht verhindert werden, da diese ein Ergebnis der Materialverschiebung ist. Durch Anpassung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Substrat ST_1 bzw. Chip und ST_2 können thermo-mechanisch induzierte Kraftwirkungen jedoch minimiert werden.

Zur Verifizierung der theoretischen Annahmen wird in der Arbeit eine numerische Simulationsumgebung aufgebaut, die die bestehenden Theorien zur Elektromigration auf ein parametrisierbares Modell anwendet. Hergestellt wird die Struktur durch kontrolliertes Auseinanderziehen aufgeschmolzener Lotverbindungen. Die konkave Form des Lots bildet sich über die Minimierung der Oberflächenenergie aus und bleibt beim Erstarren erhalten.

4.2 Entwicklung unter Verwendung der Finite-Elemente-Analyse

Mit der Finite-Elemente-Analyse kann das Design der konkaven Lote hinsichtlich der Geometrie, Homogenität der Stromdichteverteilung und Eliminierung von Temperatureffekten analysiert und optimiert werden. Die unterschiedlichen Belastungen und deren Effekte auf die Teststruktur werden vor dem experimentellen Aufbau simuliert, um die theoretischen Annahmen zu bestätigen. Zur realitätsnahen Einbindung der Teststruktur in die Simulationsumgebung wird die Software *Surface Evolver* [21] genutzt.

4.2.1 Bestimmung der Lotausbildung im Umschmelzprozess

Unter Berücksichtigung der Materialparameter, Geometrien, Gravitation und des Chipgewichts berechnet die Software *Surface Evolver* die sich ausbildende Lotform beim Umschmelzprozess über die Minimierung der Oberflächenspannung [20]. Im Ausgangszustand, Abb. 4.3a, bildet sich die herkömmliche, konvexe Lotgeometrie aus. Wird ein zunehmender Abstand Δz von Chip und Substrat bei fest vorgegebenem Lotvolumen definiert, kann die sich ausbildende Verjüngung einer konkaven Form simuliert werden. Die theoretisch maxima-

le Auslenkung vor Trennung der Lotverbindung wird mit $250 \mu m$ berechnet, Abb. 4.3f. Ab einem $\Delta z \approx 220 \mu m$ wird die Änderung des Durchmessers bis zur Auftrennung nur durch die Anzahl an Elementen in der Verjüngung beeinflusst und wird als konstant betrachtet. Zwischenschritte der Auslenkung sind in Abbildung 4.3 dargestellt. In [121] wird eine gute Übereinstimmung von Simulation und experimentellem Aufbau konkaver Lotverbindungen gezeigt.

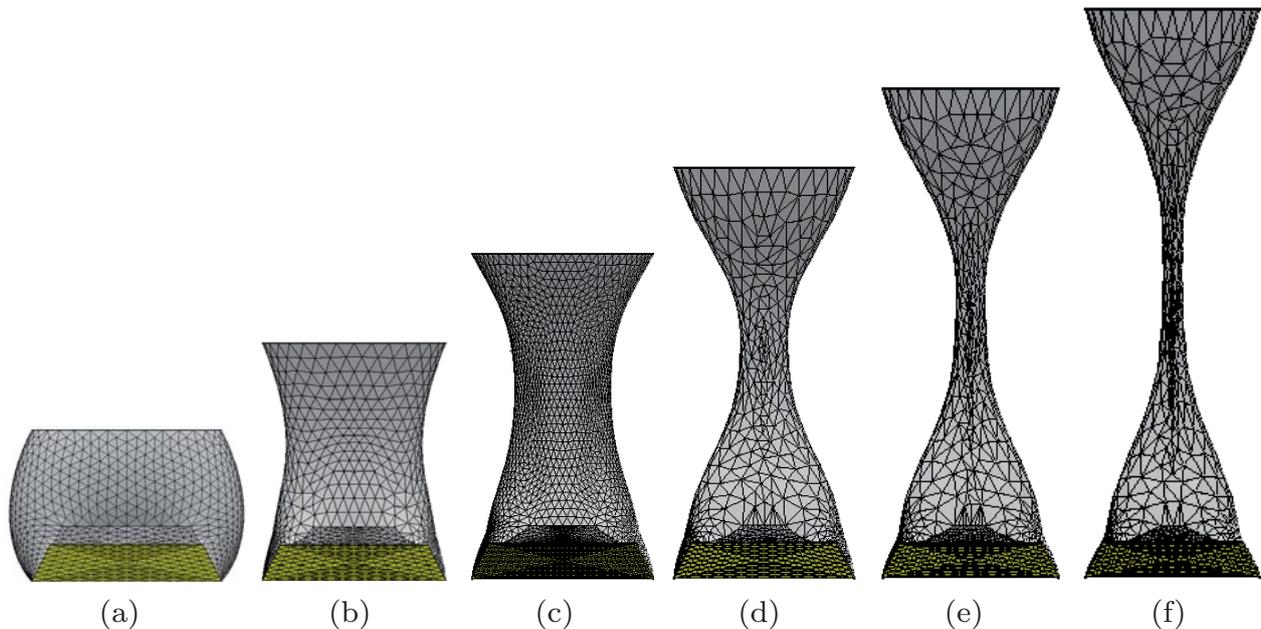


Abbildung 4.3: Numerische Berechnung der Lotgeometrie nach dem Umschmelzprozess mittels der Software *Surface Evolver*:
 a) Ausgangszustand, b) $\Delta z = 50 \mu m$, c) $\Delta z = 100 \mu m$,
 d) $\Delta z = 150 \mu m$, e) $\Delta z = 200 \mu m$, f) $\Delta z = 250 \mu m$

4.2.2 Aufbau der Lotverbindung als parametrisiertes Modell

Zum Aufbau der Simulationsumgebung für beliebige *Flip-Chip*-Designs wird die Software *ANSYS® Multiphysics* verwendet. Die Geometrien werden über Variablen definiert, deren Parameter somit leicht angepasst werden können. Die modellierte Nachbildung der Teststruktur wird mit frei wählbaren Elementen vernetzt. Mit den Finiten-Elementen werden die Differentialgleichungen abhängig von den elementspezifischen Freiheitsgraden gelöst. Elementknoten dienen als Randbedingung. Zur Berechnung direkt gekoppelter elektrophysikalischer Felder wird für das 3D-Modell der Elementtyp „solid69“ gewählt. Dieser bietet die beiden Freiheitsgrade Temperatur und elektrische Spannung und rechnet mit 8-knotigen Quadern. Zudem kann die Joule'sche Erwärmung

berechnet werden und die Elemente haben eine *Birth and Death*-Fähigkeit. Damit können Elemente in Abhängigkeit der Randbedingung nachträglich entfernt oder hinzugefügt werden.

Bei der numerischen Simulation gekoppelter Felder wird zwischen direkter und indirekter Berechnung unterschieden. Erstere nutzt die Ergebnisse aller Freiheitsgrade wie Temperatur und elektrische Spannung zur Berechnung der abhängigen Auswirkungen. Bei der indirekten Methode wird erst ein Feld berechnet, welches dem zweiten als Eingangsparameter dient. Zudem wird zwischen statischer und transienter Berechnung unterschieden. Statische Berechnungen betrachten den ausgeglichenen, sich nicht weiter veränderlichen Zustand eines Systems nach Lösung aller zugrunde liegenden Differentialgleichungen. Die zeitliche Veränderung der Freiheitsgrade wird mit der transienten Berechnung abgebildet.

Da die durch Elektromigration resultierenden Materialflussdichten und deren Divergenzen nicht direkt in der FEA-Software implementiert sind, werden die in den Programmen hinterlegten Gleichungen angepasst. Hierzu werden die in der Theorie hergeleiteten benutzerdefinierten Differentialgleichungen implementiert. Die mit der elektro-thermischen Simulation berechneten Parameter können für jedes Element im Modell über die beschriebenen Element-Tabellen abgerufen und mit mathematischen Operationen bearbeitet werden, siehe Kapitel 2.3.2. Die in Kapitel 2.2 dargelegten analytischen Lösungen der Materialflussdichte und deren Divergenzen wurden auf diese Weise implementiert. Alterungsbedingte Materialabhängigkeiten werden nicht berücksichtigt.

Das *Flip-Chip*-Modell wird durch gezielte Randbedingungen hinsichtlich der Übergangsbereiche von Lot zu Leiterbahn auf der Substratseite vereinfacht und die Passivierungen im Aufbau werden vernachlässigt. Ersteres ist Ergebnis der Randbedingung, dass in diesem Bereich der größte Querschnitt in der Lotverbindung ist, der damit lokal zu den geringsten Stromdichten und Temperaturen führt. Die Vernachlässigung der Passivierung ist begründet durch deren geringe thermische Leitfähigkeit von $\approx 0,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, die in der Größenordnung der Leiterplatte (engl. *Printed Circuit Board*, PCB) liegt, [96] [82]. Daraus resultiert ein geringer Wärmeübergangskoeffizient auf diesen Grenzflächen, der damit nur eine geringe Auswirkung auf die Ergebnisse der thermischen Simulation hat. Die Haftsichten, Diffusionsbarrieren und Oberflächenvergütungen wie Ni/Au aus den Prozessschritten zum Aufbau der Lotverbindung werden ebenfalls vernachlässigt. Deren hohe thermische Leitfähigkeit mit Werten größer der thermischen Leitfähigkeit des Lots bei gleichzeitig geringen Dimensionen haben keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnung der Temperaturen und Stromdichten, vgl. Tabelle 4.1, [82] [161]. Zudem beeinflussen diese

Vernachlässigungen nicht den Bereich der Verjüngung, der einen Abstand zu diesen Schichten aufweist. Die im Modell verwendeten Materialwerte sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst. Bei der Berechnung des Atomvolumens Ω über das Atomgewicht wird durch die Dichte ρ_{Dens} des Elements dividiert.

Tabelle 4.1: Materialparameter für die numerischen Berechnungen, $\Omega = \frac{1}{C_{a,0}}$

Kategorie	Chip	Lot	AK _{1,2}	UE _{1,2}	ST _{1,2}	IMC	IMC
Material	Si	SnAg(Cu)	Cu	Ni	PCB	Cu ₆ Sn ₅	Cu ₃ Sn
λ [W/(m · K)]	148 ^{*11}	57,3 ^{*1}	393 ^{*1}	91 ^{*1}	0,35 ^{*11} 0,64 ^{*10}	34,1 ^{*5}	70,4 ^{*5}
ρ [10 ⁻⁸ Ω · m]		13,3 ^{*1}	1,58 ^{*1}	7,8 ^{*6}		17,5 ^{*5}	8,93 ^{*5}
c_s [J/(kg · K)]		219 ^{*1}	385 ^{*1}	444 ^{*1}		286 ^{*5}	326 ^{*5}
D_0 [10 ⁻⁴ m ² /s]		Sn:10,7 ^{*2} (0,41) ^{*1,4}	6 - 7,8 ·10 ⁻¹ ^{*2}			1,85 ·10 ⁻⁵ ^{*2}	5,48 ·10 ⁻⁵ ^{*2}
$C_{v,0}$ [10 ²⁴ /m ³]		1,11 ^{*3}					
Ω [10 ⁻²⁹ m ³]		2,71 ^{*2,3}	1,18 ^{*8}	1,1 ^{*8}			
Z^*		18 ^{*2} (-23) ^{*1,4}	-4 ^{*4} 2 - 7 ^{*2}			Sn:36 ^{*5} Cu:26 ^{*5}	Sn:23,6 ^{*5} Cu:26,5 ^{*5}
α [10 ⁻³ /K]		2,8 ^{*1}	4,3 ^{*1}				
Q^* [10 ⁻³ eV]		9,4 ^{*1} (-8,4) ^{*4}	0,204 ^{*9}				
E_a [eV]		1,09 ^{*2} (1,11) ^{*2}				0,56 ^{*2} 0,67 ^{*2}	0,64 ^{*2} 0,87 ^{*2}
E [GPa]		26,2 ^{*1}				85,56 ^{*5}	108,3 ^{*5}
ρ_{Dens} [kg/m ³]	2300 ^{*1}	7390 ^{*1}	8900 ^{*1}	8900 ^{*1}	1900 ^{*1}	8280 ^{*5}	8900 ^{*5}

Referenzen: ^{*1}: [102], ^{*2}: [27], ^{*3}: [160], ^{*4}: [151], ^{*5}: [49], ^{*6}: [135], ^{*7}: [26],
^{*8}: [152], ^{*9}: [137], ^{*10}: [42], ^{*11}: [98]

Schwerpunkt der Untersuchung ist die Betrachtung des Lotmaterials. Dazu werden die elektromigrationsspezifischen Materialwerte zusätzlich berücksichtigt. Die zusätzlichen Materialwerte der weiteren Werkstoffe sind der Vollständigkeit halber und zum Vergleich angegeben in Tabelle 4.1. Als konvektiver Wärmeübergangskoeffizient h_c von Teststruktur zur Umgebungsluft wird ein

Wert von $60 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gewählt. Dieser wurde für die Simulation nach messtechnischer Überprüfung im Experiment abgeleitet.

Ein Vergleich der konkaven Lotform mit der Standard-Teststruktur für Leiterbahnen zeigt Analogien, Abb. 4.4. Beide enthalten lokale Ausfallbereiche, an denen die Auswirkungen der Elektromigration gezielt untersucht werden können.

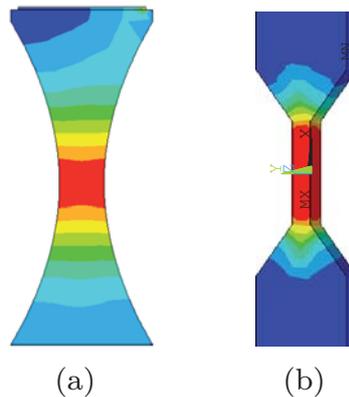


Abbildung 4.4: Qualitativer Vergleich der Stromdichteverteilungen (blau/rot: geringe/hohe Stromdichte): a) konkave 3D-Lotgeometrie, b) Standard-Teststruktur vom NIST für Elektromigrationsuntersuchungen an Leiterbahnen (planar)

Das FEA-Grundmodell wird mit den weiter aufzubauenden Modellen der Teststrukturen kombiniert, um die Effekte im zu erwartenden Ausfallbereich der Lotverbindung bei unterschiedlichen Belastungsszenarien zu beschreiben.

4.2.3 Theoretische Betrachtung des elektrischen Widerstands und des kritischen Produkts der Lotverbindung

Zur theoretischen Betrachtung des elektrischen Widerstands $R(T)$ der Teststruktur wird dieser nach Gleichung 4.1 über die Länge l , Fläche A_F und den spezifischen elektrischen Widerstand $\rho(T)$ berechnet, [75].

$$R(T) = \rho(T) \cdot \frac{l}{A_F} \quad (4.1)$$

Der Widerstand einer konvexen Lotverbindung liegt nach der Simulation bei nur $\approx 1 \text{ m}\Omega$. Bei Betrachtung der konkaven Lotverbindung ergibt sich ein numerisch berechneter Widerstand von $13,8 \text{ m}\Omega$. Dieser Widerstand der kompletten Struktur mit der Länge $l_x = 360 \text{ }\mu\text{m}$, einem ρ nach Tabelle 4.1 und

den Flächen $A_{F,Verjüngung} = 1,13 \cdot 10^3 \mu\text{m}^2$ und $A_{F,UBM} = 1,33 \cdot 10^4 \mu\text{m}^2$ wird in einem Experiment überwacht und als Ausfallkriterium definiert, Abb. 4.5a. In das Modell geht jedoch nur die Widerstandsänderung der Ausfallregion ein. Zur Abschätzung, wie sich deren Widerstand im Verhältnis zum Gesamt-*Bump* verhält, wird in Abbildung 4.5b der Widerstand in Abhängigkeit der Länge l des Volumenelements aufgetragen. Zusätzlich wird das Verhältnis berechnet.

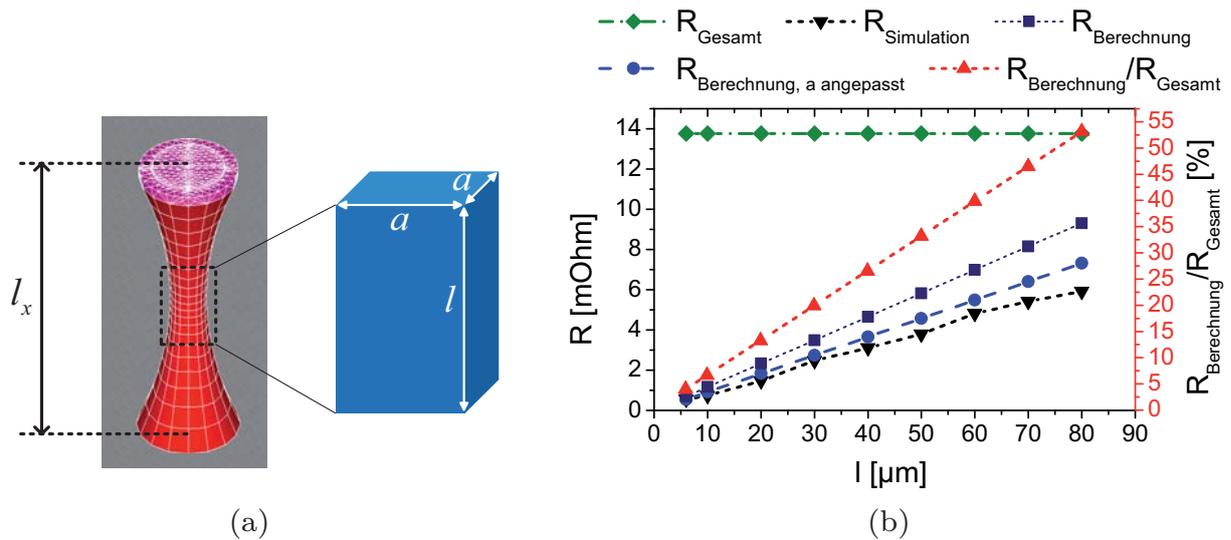


Abbildung 4.5: Widerstand der Verjüngung mit der Annahme eines rechtwinkligen Volumenelements, a) Volumenelement innerhalb der Teststruktur, b) Beitrag des Widerstands des Volumenelements in Abhängigkeit der Länge l

Die dargestellten simulierten Werte ergeben sich aus der sich ausbildenden Realstruktur mit rundem Querschnitt, die berechneten Werte aus der Annahme eines theoretischen Quadvolumens. Bei den Werten $R_{Berechnung}$ wurde die Fläche des Quaders auf den des Kreises bei minimalem Radius der Verjüngung angepasst. Im konkreten Fall beträgt der Durchmesser der Verjüngung im Modell $38 \mu\text{m}$ und der des Volumenelements $a = 34 \mu\text{m}$. Somit sind die Flächen äquivalent. $R_{Berechnung, a angepasst}$ berücksichtigt mit $a = 38 \mu\text{m}$, dass die Realstruktur in der Ausfallregion kein Zylinder ist, sondern der Querschnitt mit zunehmendem l steigt. Der Querschnitt der Verjüngung sollte demnach für das Modell mit Quader genutzt werden. Bei einer Ausfallregion der Länge $l = 10 \mu\text{m}$ beträgt dessen Widerstand rund 8 % des Gesamtwiderstands, bei $l = 70 \mu\text{m}$ rund 47 %. Durch Minimierung des Durchmessers der Verjüngung und Maximierung der Anschlussgeometrie kann dieses Verhältnis vergrößert werden. Im Modell wird die Widerstandsänderung betrachtet, die unabhängig vom Gesamtwiderstand ist. Ändert sich der Widerstand demnach durch Ge-

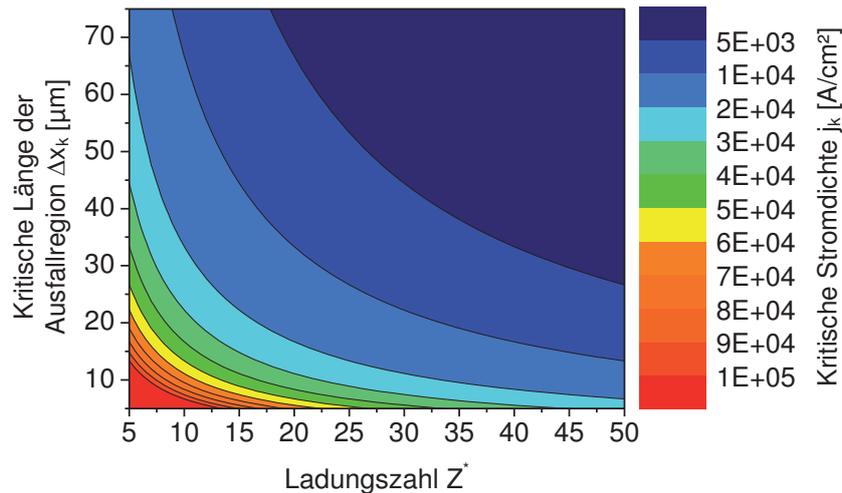


Abbildung 4.6: Berechnung der kritischen Stromdichte j_k für einen Ausfall innerhalb der Verjüngung, abhängig von der Länge der Ausfallregion Δx_k und der effektiven Ladungszahl Z^*

fügeveränderung sowohl in der Verjüngung als auch im Bereich der UBM, so muss das Ausfallkriterium diese Widerstandsänderung entsprechend berücksichtigen.

Zur Berechnung des kritischen Produkts der Verjüngung und Ableitung der kritischen Stromdichte wird Gleichung 2.38 unter Verwendung der Werte aus Tabelle 4.1 genutzt, Abb. 4.6. Es ergibt sich eine kritische Stromdichte j_k in Abhängigkeit der kritischen Länge der Ausfallregion Δx_k und der effektiven Ladungszahl Z^* . Für Lote werden Werte für Z^* im Bereich von 10 bis etwa 40 angegeben, [70] [27] [136]. Bei einem Z^* von 36 nach [27] für Sn-Diffusion liegt die kritische Stromdichte zwischen $0,5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ und $4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, bei Z^* von 10 zwischen $2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ und $9 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$.

4.3 Prozessablauf zur Fertigung von Lotverbindungen mit konkaver Geometrie

Verschiedene Verfahren zur Herstellung von Lotverbindungen mit konkaver Geometrie werden in der Literatur diskutiert. Diese bauen auf Prozessschritten der *Flip-Chip*-Technologie auf und können in die Kategorien „Einsatz von Abstandshaltern und Hilfsmetallen im *Lot-Bump*“, „Verwendung vorgeformter *Lot-Bumps*“ und „Strecken von *Lot-Bumps*“ eingeteilt werden.

Beim Stapeln von zwei oder mehr Lotverbindungen (engl. *solder bump stacking*), werden sowohl auf dem Schaltungsträger als auch auf dem Chip *Lot-Bumps* aufgebracht. Beim *Flip-Chip*-Prozess werden diese gegenüber vonein-

ander gebracht und verbinden sich im Umschmelzprozess. Über entsprechende Abstandshalter zwischen Chip und Substrat wird ein Absinken des Chips verhindert und die sich über die Minimierung der Oberflächenspannung einstellenden Geometrien definiert, [55]. Mit diesem Verfahren können konkave und Säulen-Geometrien erzeugt werden. Ohne diese Abstandshalter ergibt sich ein konventioneller konvexer *Lot-Bump* mit entsprechend großem Volumen. In [83], [99] wird ein Verfahren mit Metallkugeln beschrieben, die in einem vorangehenden Prozessschritt platziert werden. Deren Durchmesser entspricht dem definierten Abstand.

Bei der Verwendung von verschiedenen Lotlegierungen mit unterschiedlichen Schmelztemperaturen kann eine hochschmelzende Lotkugel im Inneren der eigentlichen Lotverbindung als Abstandshalter dienen. Die Temperatur im Umschmelzprozess wird derart gewählt, dass sich die Lotkugel nicht verflüssigt und die weiteren aufgeschmolzenen Lotlegierungen Chip und Substrat kontaktieren. Abhängig vom Lotvolumen ergeben sich ober- und unterhalb der Lotkugel Kappen mit konkaver Geometrie, [99]. Anstatt einer hochschmelzenden Lotkugel kann auch ein Metallstift im Inneren der Lotverbindung als Abstandshalter dienen, [88]. Auch bei diesem bildet sich durch Minimierung der Oberflächenspannung bei entsprechendem Lotvolumen eine definierte konkave Geometrie aus. In [107] wird die Verwendung von weiteren hochschmelzenden, elektrisch leitenden Materialien als Abstandshalter innerhalb der Lotverbindung diskutiert. Der Einsatz zusätzlicher Lotlegierungen im Prozess erzeugt allerdings weitere Material- und Phasenübergänge.

Bei der Verwendung vorgeformter Lotverbindungen werden keine Abstandshalter benötigt. Die Geometrie wird vor dem Platzieren der Chips auf das Substrat auf dem *Wafer* erzeugt. In [153], [121], [120] wird eine Technologie auf *Wafer-Level-Ebene* diskutiert, mit der ein Strecken, Ablösen und Verbinden (engl. *Wafer Level Packaging stretch, detach and bond Technology*) von Lotwerkstoffen realisiert werden kann. Mit der Standard-*Flip-Chip*-Technologie werden die konvexen Lotverbindungen auf den strukturierten *Wafer* aufgebracht und vollflächig mit einem zweiten *Dummy-Wafer* verbunden. Im umgeschmolzenen Zustand der Lotverbindungen werden die *Wafer* so weit voneinander getrennt, dass sich eine konkave Lotgeometrie ausbildet. Diese bleibt nach dem Erstarren erhalten. Durch eine spezielle Beschichtung des *Dummy-Wafers* kann der funktionale *Wafer* inklusive der Lotverbindungen gelöst werden, ohne diese zu beeinflussen. Nach einer Vereinzelung des *Wafers* können die Chips mit dem eigentlichen Substrat verbunden werden. Dafür werden die Kontakte des Substrats mit einem Niedertemperaturlot beschichtet, das einen geringeren Schmelzpunkt als die konkaven Lotverbindungen aufweist.

Ein weiteres Verfahren streckt die Lotverbindungen erst nach dem Platzieren und Umschmelzprozess der *Flip-Chip*-Strukturen. Der Chip wird zunächst mit den herkömmlichen Prozessschritten aufgebaut. Im nächsten Schritt wird dieser erneut umgeschmolzen, im aufgeschmolzenen Zustand gestreckt und anschließend abgekühlt. Ein Aufbau zur Durchführung der Schritte wird in [23] skizziert. Prinzipiell können mit diesem Verfahren einzelne *Flip-Chip*-Strukturen nachträglich manipuliert werden, wenn die entsprechende Schmelztemperatur der Lotverbindung in den Aufbau eingebracht werden kann. Die Lotlegierungen müssen weder angepasst noch verändert werden, sodass unterschiedliche Lote untersucht werden können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prozessablauf konzipiert und umgesetzt, mit dem nahezu beliebige *Flip-Chip*-Aufbauten nachträglich manipuliert werden können, Abb. 4.7.

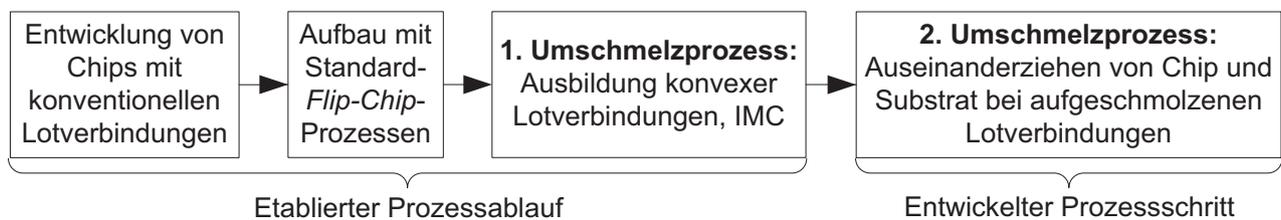


Abbildung 4.7: Prozessschritte zur Herstellung von Lotverbindungen mit konkaver Geometrie

Insbesondere aufgebaute Strukturen können derart verändert werden, dass sich beliebige konkave Lotgeometrien ausbilden. Ähnlich der Skizze nach [23] wird die Struktur durch kontrolliertes Auseinanderziehen aufgeschmolzener Lotverbindungen herausgebildet. Realisiert wird dies mittels des *Flip-Chip*-Verbinders (engl. *bonder*) „FC150“ der Firma *SET S.A.S., Smart Equipment Technology* in Verbindung mit einem neu entwickelten Lötprofil. Das Kontaktierungs-Profil zum Aufbau der konkaven Lotverbindung ist äquivalent zu einem zweiten Umschmelzprozess. Mit diesen Prozessschritten können Geometrievariationen mit reproduzierbarer Genauigkeit hergestellt werden.

4.4 Konzeptionierung und Aufbau der Messumgebung

Zur Durchführung der Experimente wurde ein Teststand konzipiert und aufgebaut. Dieser besteht aus 4-Quadranten-Stromquellen des Typs „2420“ der Firma *Keithley Instruments, Inc* mit besonders Langzeit-präzisen Ausgangs-

werten [41] und einem Ofen der Baureihe „6000“ (Firma *Heraeus Holding GmbH*) mit einem Temperaturbereich bis 250 °C bei einem zeitlichen maximalen Temperaturdrift von $\pm 0,5$ °C, [43]. Die Materialdegradation wird mittels eines Multiplexers des Typs „2750“ (*Keithley Instruments, Inc*) mit Messkarten des Typs „7708“ überwacht [40], der von einem Computer über die Softwareumgebung *LabVIEW*[®] der Firma *National Instruments Corporation* gesteuert wird. Der analytisch beschriebene Widerstandsanstieg der Teststrukturen, der direkt auf die Elektromigration schließen lässt, wird mittels einer Vierleiter-Messung mit einer Auflösung von $1 \mu\Omega$ aufgenommen, siehe Kapitel 2.3.3.

Um eine hohe Anzahl von Teststrukturen gleichzeitig zu testen, wurde ein *Daisy-Chain*-Konzept gewählt. Wird ein definierter Widerstandsanstieg überschritten, so werden diese Strukturen automatisch von dem Steuerrechner detektiert und mit der Messkarte vom Typ „7705“ (*Keithley Instruments, Inc*) überbrückt, sodass der Strom in den übrigen Strukturen nicht unterbrochen wird. Der Teststand ist in Abbildung 4.8 gezeigt.

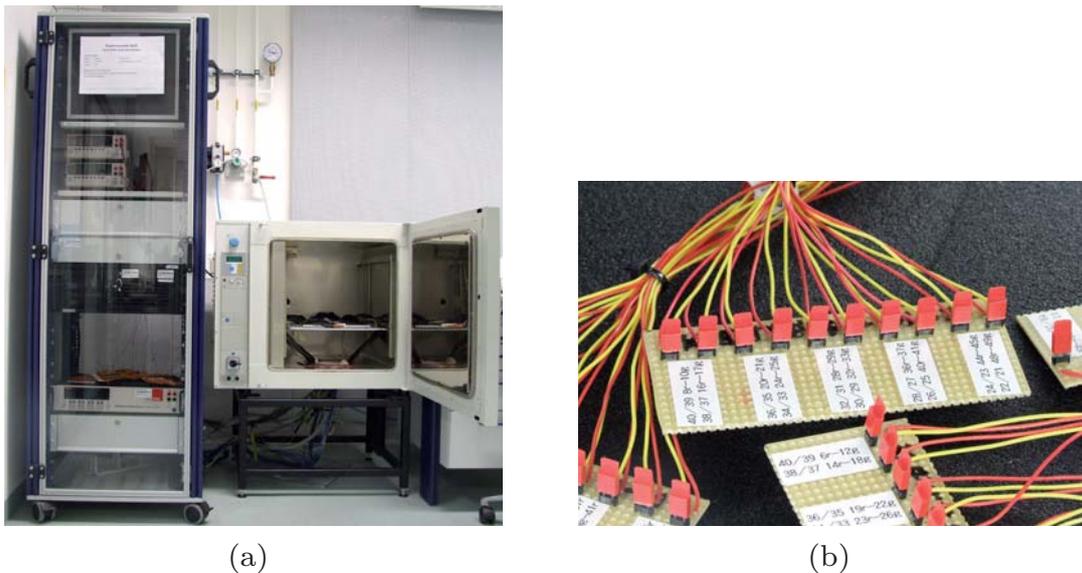


Abbildung 4.8: Aufgebaute Messumgebung, Foto: a) Messtechnikschrank und Ofen, b) Steckboard zum manuellen Überbrücken von Teststrukturen

Im Versuchsaufbau können zusätzliche Schalter eingesetzt werden, die manuell mit Steckverbindern außerhalb vom Ofen gezielt einzelne Lotverbindungen überbrücken können, Abb. 4.8b. Mögliche Fehler in der Struktur, die im laufenden Versuch oder beim Aufbau auftreten, können mit diesen überbrückt werden, sodass die Teststruktur ohne direkten Eingriff bei konstanter Temperatur weiter betrieben werden kann.

4.5 Vorbetrachtung: *Flip-Chip*-Struktur zur Untersuchung überlagerter Einflussgrößen

Zur Untersuchung der Randbedingungen und der überlagerten Effekte wird eine Standard-*Flip-Chip*-Struktur mit konkaven Lotverbindungen aufgebaut. Der auf Silizium basierende Chip hat insgesamt vier bleifreie SnAg_{3,5}-Lotverbindungen. Je Chip sind zwei Lotverbindungen miteinander verbunden, die mittels einer Vierleiter-Messung überwacht werden können, Abb. 4.9a.

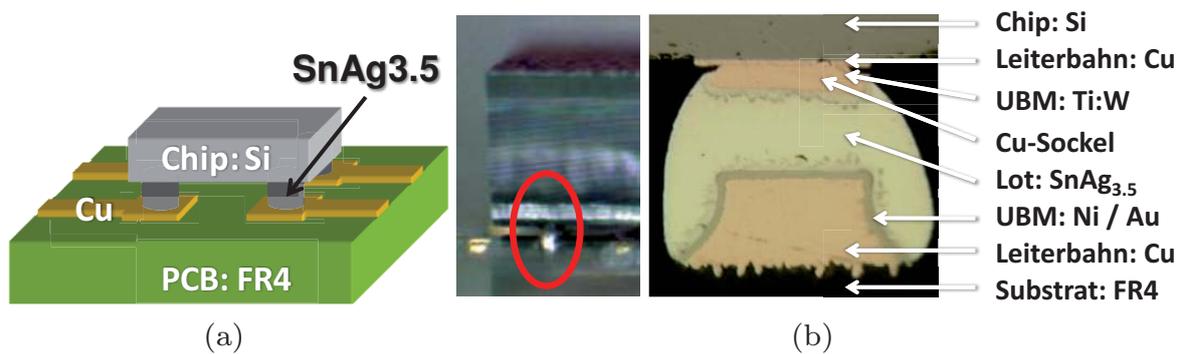


Abbildung 4.9: Teststruktur der Vorversuche: a) Verwendete *Flip-Chip*-Struktur schematisch, b) Ausgangszustand des Lotaufbaus im Querschliff, Auflichtmikroskop, nach [18]

Die Geometriedaten sind in Tabelle 4.2 zusammengefasst. Die Lotverbin-

Tabelle 4.2: Geometrieparameter der *Flip-Chip*-Struktur, Vorbetrachtung

Kategorie	Material	Höhe [μm]	Breite [μm]	Länge [μm]
Chip	Si	600	900	1400
UBM-Öffnung			Durchmesser: 90	
AK ₁	Cu	3	50	750
UE ₁	Ti:W / Cu	0,2 / 0,3		
	Cu Sockel	8		
Lot <i>Ausgang</i>	SnAg _{3,5}	100	Durchmesser: 150	
UE ₂	Ni / Au	5 / 1		
AK ₂	Cu	50	90	
ST ₂	FR4	$1,5 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^5$

dungen wurden mit einer maximalen Volumenabweichung von $\pm 5\%$ galvanisch abgeschieden. Eine gesputterte TiW/Cu-UBM mit einem Cu-Sockel wird auf der Chipseite genutzt. Auf der Substratseite dient eine chemische Ni/Au-Schicht als Oberflächenvergütung der FR4 (engl. *Flame Retardant 4*, Materialbezeichnung)-Leiterplatte und als Diffusionsbarriere, Abb. 4.9b. Das Design der Lotankontaktierung auf dem PCB wird teils über die Lotmaske gesteuert (engl. *Half Solder Mask Defined*).

4.5.1 Prozessschritte und numerische Verifikation der Randbedingungen

Die in Kapitel 4.5 entwickelten *Flip-Chip*-Teststrukturen werden nach den Prozessschritten in Abbildung 4.7 mit Standard-*Flip-Chip*-Technologien aufgebaut. Das Kontaktierungs-Profil besteht aus einem definierten Temperatur- und Auslenkungsprofil zur Herstellung der konkaven Lotgeometrie, Abb. 4.10. Die Schmelztemperatur von SnAg_{3.5}-Lotverbindungen liegt bei 221 °C, [135].

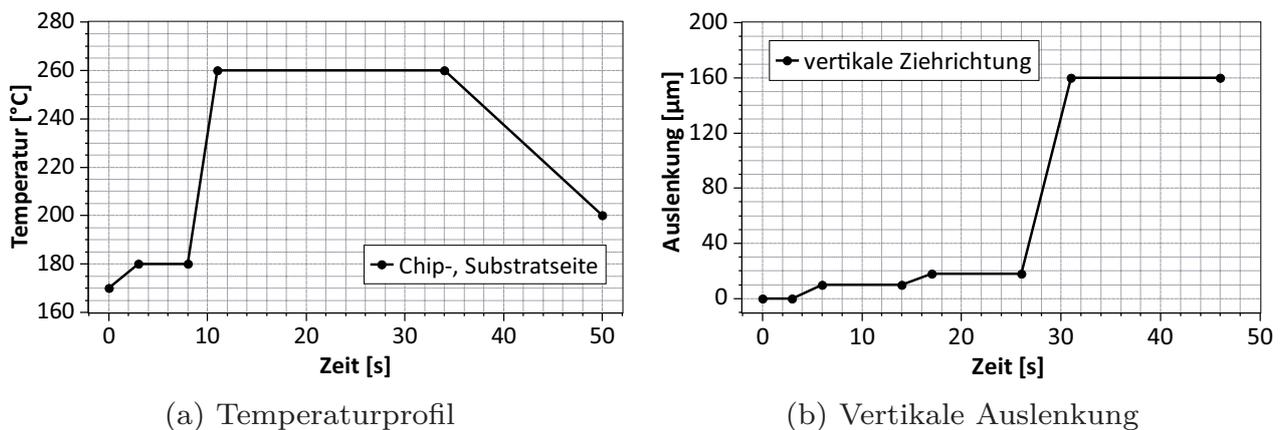


Abbildung 4.10: Aufbau der Teststrukturen, Vorversuche

In Voruntersuchungen hat sich gezeigt, dass die maximale Auslenkung des Lots $180\ \mu\text{m}$ beträgt, bevor die Verbindung mechanisch durch das Kontaktierungs-Werkzeug aufgetrennt wird. Für die weiteren Untersuchungen wird deshalb eine Auslenkung von $150\ \mu\text{m}$ gewählt, um einen mechanisch stabilen Zustand zu erreichen. Abbildung 4.11 zeigt die Ausgangs- und Endkonfiguration sowie Zwischenschritte der erzielbaren Lotgeometrie.

Der berechnete Wert einer maximalen theoretischen Auslenkung von $250\ \mu\text{m}$, Kapitel 4.2.1, bei reiner Betrachtung der Oberflächenspannung wird durch die abnehmende mechanische Stabilität der Verbindung nicht erreicht.

Die Steuergröße Lotgeometrie wird pro Teststruktur optisch vermessen und

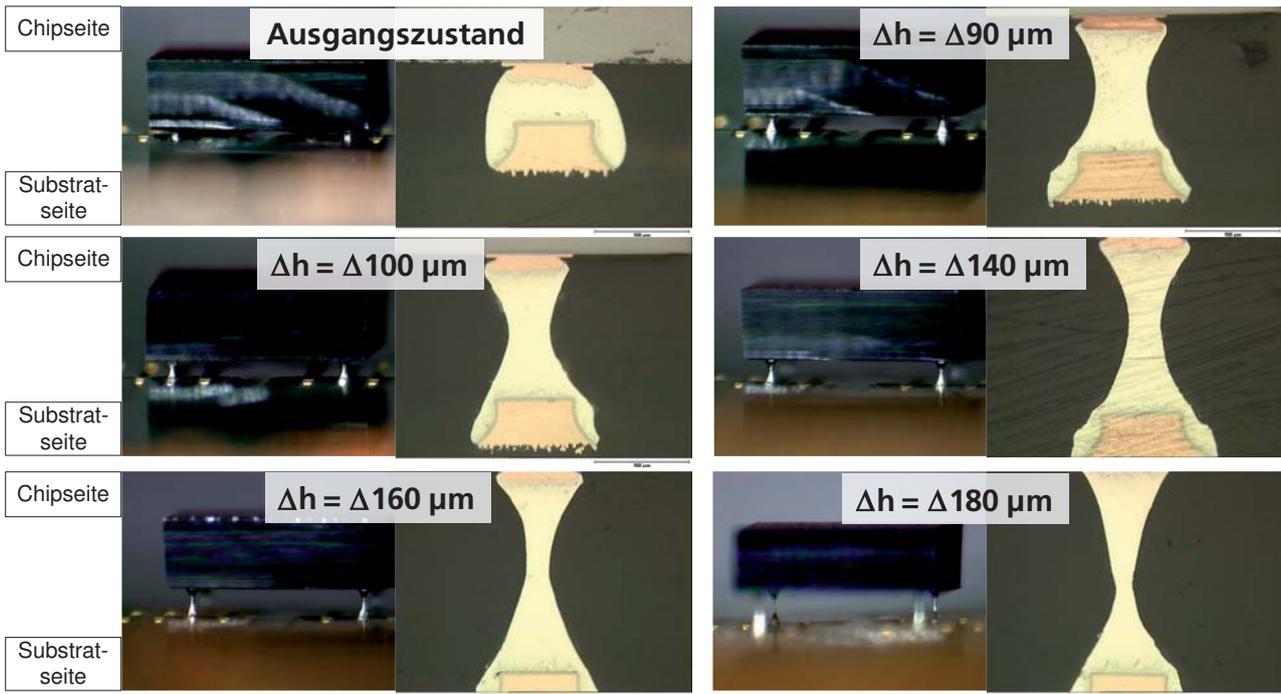


Abbildung 4.11: Vergleichende Bilder, Auflichtmikroskop: links im Bild jeweils der aufgebaute Chip auf dem Substrat, rechts: entsprechender Querschliff der Lotverbindungen mit unterschiedlichen Auslenkungen

statistisch ausgewertet. Für die *Flip-Chip*-Struktur wurde der Querschnitt der Verjüngung an insgesamt 16 Strukturen ermittelt, die alle mit den gleichen Parametern hergestellt wurden. Für die 64 Lotverbindungen ergibt sich ein Mittelwert von $31,4 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung von $\pm 2,1 \mu\text{m}$. Im Ausgangszustand beträgt der Durchmesser etwa $150 \mu\text{m}$. Die Reproduzierbarkeit konventioneller Strukturen mit Silizium-Chip ist somit verifiziert und alle Lotverbindungen können äquivalent ausgewertet werden. Ursache der Toleranzen sind die prozessbedingte Abweichung des Lotvolumens von max. $\pm 5 \%$ sowie Unebenheiten des Substrats.

Basierend auf diesen *Flip-Chip*-Verbindungen erfolgt die numerische Simulation nach Anpassung der Parameter, Abb. 4.12. Innerhalb der konkaven Struktur befindet sich die maximale Stromdichte nun in der gebildeten Verjüngung, Abb. 4.13. Die lokale Zunahme der Stromdichte am Übergang zur UBM beträgt 87% der Stromdichte innerhalb der Verjüngung. Die Kupferleiterbahn auf der Chipseite führt die höchste Stromdichte des Aufbaus, ist aber um einen Faktor von ca. 100 resistenter gegenüber Elektromigration als Lot, siehe Kapitel 2.2.

Der Temperaturgradient kann über die Stromstärke angepasst werden. Wenn

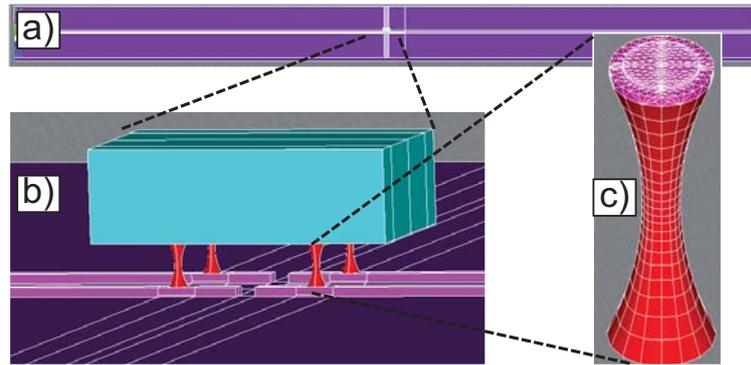


Abbildung 4.12: Aufbau der Teststruktur der Pilotversuche als FEA-Modell:
 a) Gesamtbetrachtung des Aufbaus mit dem Substrat,
 b) Details des Chip-Aufbaus mittig auf dem Substrat,
 c) Lotverbindung im Detail

nur zwei der vier *Bumps* der Teststruktur mit einem Strom belastet werden, ergeben sich weitere Vorteile. Einerseits wird die Temperatur des Aufbaus reduziert, sodass höhere Stromdichten erreicht werden können. Andererseits liegt der Temperaturgradient aufgrund der guten Wärmeleitfähigkeit des Siliziums über den unbelasteten Lotverbindungen in der Größenordnung der belasteten, Abb. 4.14. Mit einer Struktur können demnach sowohl die Effekte der Elektromigration als auch die der Thermomigration bewertet werden.

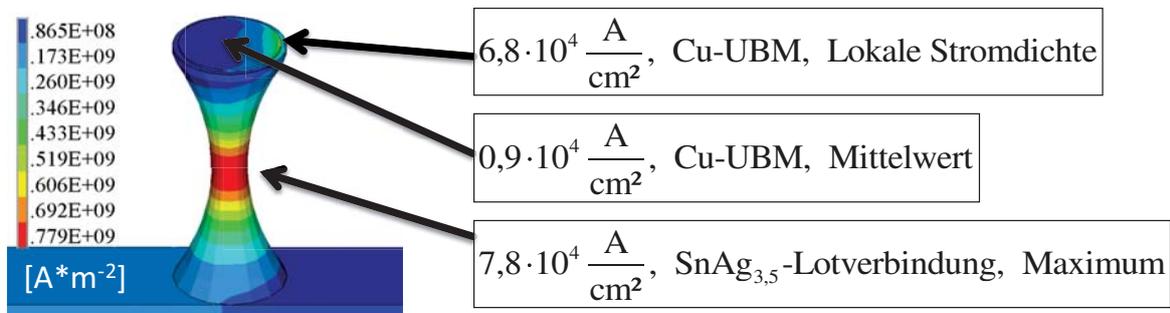


Abbildung 4.13: Stromdichteverteilung über der Lotverbindung im Detail,
 $I = 0,6 A$

Zur Ermittlung der Ausfallregion und Verifizierung der Hauptausfallmechanismen werden die Materialflussdichten der EM und TM und deren Divergenzen bestimmt. Es zeigt sich, dass sich die Maxima in der Verjüngung ergeben. Die Verhältnisse der Materialflussdichten von EM zu TM und deren Divergenzen liegen bei $\approx 1,4 \cdot 10^4$ und $\approx 3,2 \cdot 10^3$. Demnach wird der Hauptfehlermechanismus in der Verjüngung durch die EM hervorgerufen. In den nicht strombelasteten Lotverbindungen wird der Ausfall durch TM initiiert.

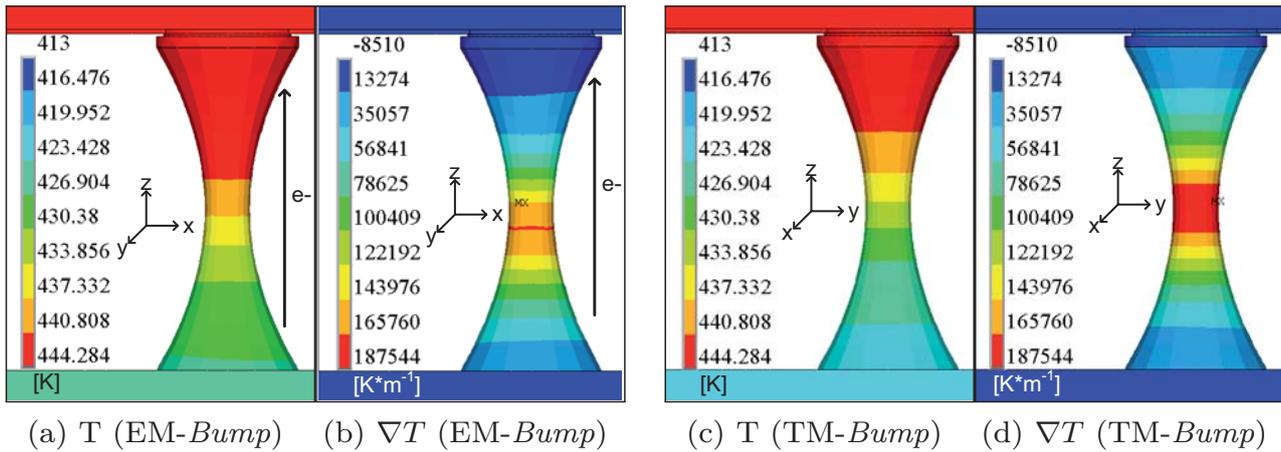


Abbildung 4.14: Numerische Berechnung der EM/TM-Bump-Reihe der Vorversuche, konkav, $I = 0,6 \text{ A}$, $T = 140 \text{ °C}$: a) Temperaturverteilung (EM), b) Temperaturgradient (EM), c) Temperaturverteilung (TM), d) Temperaturgradient (TM)

4.5.2 Versuchsplanung der Pilotversuche

Die Standard-*Flip-Chip*-Struktur wird mit reduziertem Versuchsplan untersucht, um den Einfluss der theoretisch und numerisch ermittelten überlagerter Effekte zu verifizieren. Es wird der Einfluss des Faktors Temperatur auf drei Stufen untersucht, die Stromdichte wird konstant gehalten. Im Ergebnis kann die Aktivierungsenergie E_a mit drei Stützstellen berechnet werden. Der Temperaturgradient ist für diese Teststruktur bei allen Stromdichten im Test $> 1000 \text{ K/cm}$.

Es werden insgesamt acht unabhängige Experimente durchgeführt. Um höhere Stromdichten innerhalb der Verjüngung zu erreichen wird bei den Tests 6 bis 8 nur die Hälfte der *Bumps* mit Strom belastet, Tabelle 4.3. Zur Reduzierung von Streuungen basieren die Ausfallstatistiken auf jeweils 16 Teststrukturen mit einem Durchmesser der Verjüngung von $31 \mu\text{m} \pm 2 \mu\text{m}$.

Tabelle 4.3: Versuchsplan konkave Lotgeometrie, Vorversuche

Test-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_{\text{Ofen}} [\text{°C}]$	100	100	120	120	140	130	140	150
Stromstärke [A]	0,1	0,15	0,15	0,2	0,3	0,6	0,6	0,6
Stromdichte [10^4 A/cm^2]	1,3	1,9	1,9	2,6	3,9	7,8	7,8	7,8

Abbildung 4.15a zeigt die schematische Verschaltung einer Teststruktur mit der Messumgebung, Abbildung 4.15b die verschalteten 16 Proben im Ofen.

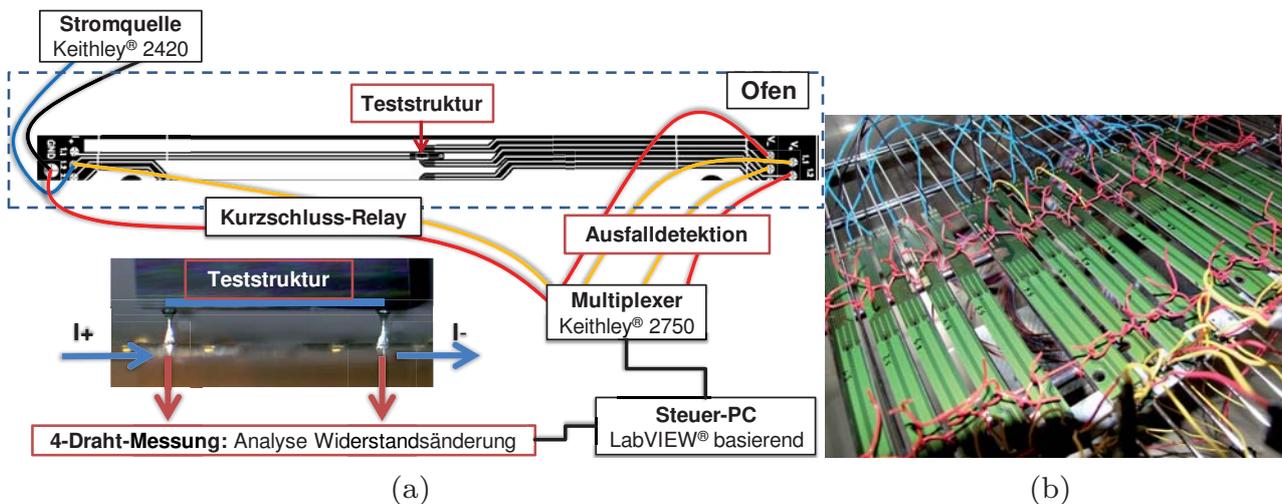


Abbildung 4.15: Verschaltung der Teststrukturen, Vorversuche: a) Schematische Kontaktierung von Teststruktur und Messumgebung, b) 16 aufgebaute und verkabelte Strukturen im Ofen

4.5.3 Ausfallcharakteristik und Bestimmung der Lebensdauer

Es wurden Experimente bei fünf unterschiedlichen Temperaturen und fünf Stromdichten durchgeführt. Bei den Tests 1 bis 5 nach Tabelle 4.3 kam es nach jeweils 400 h zu keinem Ausfall der Strukturen. Für den Test Nummer 6 ergab sich ein Temperaturanstieg von $25,8 \text{ °C} \pm 2,8 \text{ °C}$, für Test 7 von $26,5 \text{ °C} \pm 1,6 \text{ °C}$ und für Test 8 von $32 \text{ °C} \pm 3,9 \text{ °C}$.

Im Ausgangszustand ist die Lotgeometrie homogen und die IMC konzentrieren sich an den Materialübergängen. Abbildung 4.16 zeigt die Querschnitte einer Standard-Lotgeometrie im Vergleich mit der gezogenen Struktur, aufgenommen mit einem Raster-Elektronen-Mikroskop (REM).

Es kann ein Einfluss der hohen Stromdichten abhängig von den unterschiedlichen Belastungen ermittelt werden. Werden die Lotverbindungen einer Strombelastung ausgesetzt, können unterschiedliche Ausfallcharakteristika für die Strukturen mit Stromrichtung vom Substrat zum Chip und denen mit entgegen gerichteter Belastung beobachtet werden.

Abbildung 4.17 zeigt die Auswirkungen der überlagerten Effekte Thermo- und Elektromigration richtungsabhängig sowie die sich auflösende UBM. In den Lotverbindungen mit entgegengesetzter Belastung der Migrationsmechanismen Elektro- und Thermomigration nimmt der Querschnitt mit der Zeit

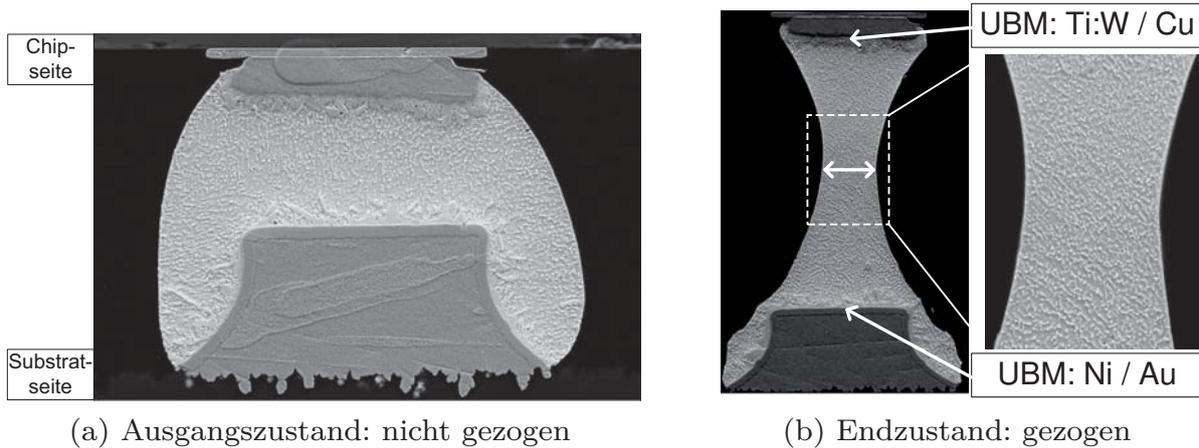


Abbildung 4.16: Vergleich der Lotverbindungen im Vorversuch, REM-Aufnahmen an Querschliffen: a) nicht gezogene Struktur, Ausgangszustand Lotverbindung, b) gezogene Struktur

mittig ab. Der Strom schwächt das abwärts gerichtete Wachstum der Cu_6Sn_5 -IMC, sodass sich diese an der chipseitigen UBM konzentriert. Die Ni/Au-Schicht auf der Substratseite agiert als Diffusionsbarriere und verhindert eine Kupferdiffusion der dort angrenzenden Kupferleiterbahn in den Lotwerkstoff.

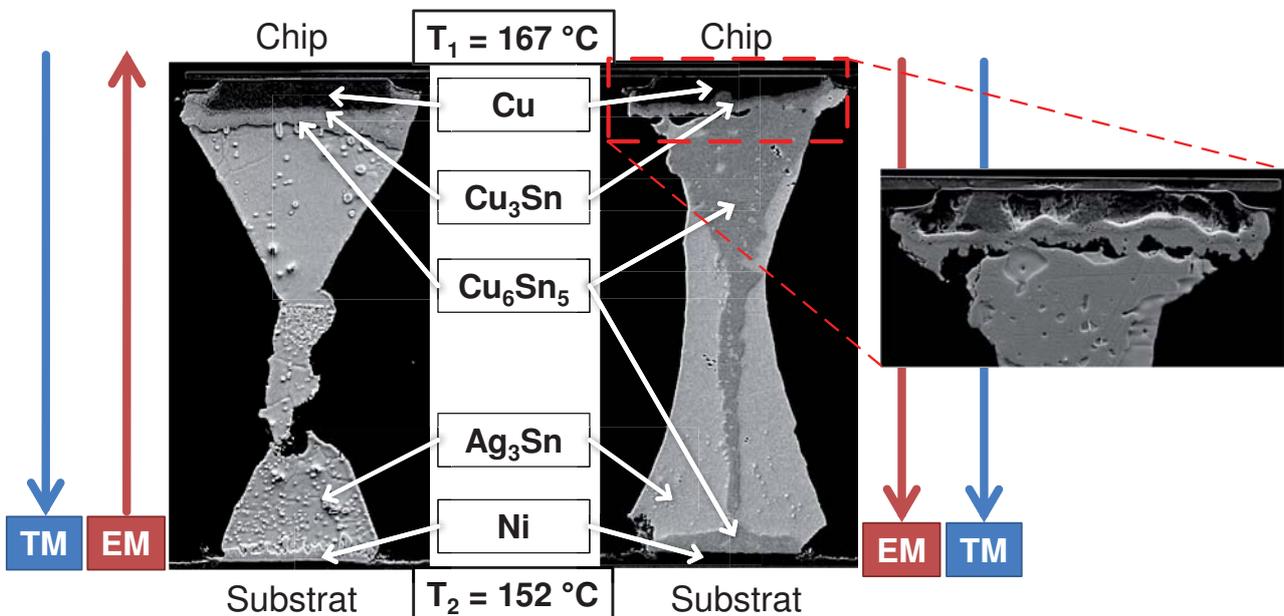


Abbildung 4.17: Elektro- und Thermomigration überlagert und Details der Auflösung UBM, die Bilder stammen von Querschliffen verschiedener Teststrukturen der Vorversuche, Testdauer: 340 h, $T_{Ofen} = 140 \text{ }^\circ\text{C}$, $I = 600 \text{ mA}$, REM-Aufnahme

Innerhalb der Verjüngung diffundiert das Sn der Lotverbindung in Richtung der Elektromigration. Die Ag_3Sn -IMC diffundiert entgegen der Elektromigrationsrichtung. Als Resultat bilden sich in der Verjüngung Poren, die zu einem Ausfall führen, Abb. 4.17.

Der Querschnitt der Lotverbindungen mit gleicher Belastungsrichtung von Elektro- und Thermomigration nimmt insgesamt zu. Die chipseitige Metallisierung besitzt keine Diffusionsbarriere. Es zeigt sich, dass das Kupfer der Kupfer-UBM mit dem Zinn des Lotwerkstoffs eine Cu_6Sn_5 -IMC ausbildet. Deren Diffusion durch den Lotwerkstoff wird durch die EM unterstützt. Die EM verstärkt somit das abwärts gerichtete Wachstum der IMC und führt zu Materialauswüchsen im Bereich der Verjüngung. Dieser Vorgang wird begleitet von einem Porenwachstum sowohl in der Mitte als auch im Übergangsbereich zum Chip.

Bei Auslagerung einer Referenzprobe unter einer Temperatur von 140 °C ändert sich die Geometrie nicht. Es kann jedoch, unabhängig vom *Bump*, ein Wachstum der IMC bei der UBM beobachtet werden, Abb. 4.18, ähnlich zu Untersuchungen an Standard-Lotverbindungen, [47] [28]. Es handelt sich um eine Cu_6Sn_5 -IMC, die mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (engl. *energy dispersive X-ray spectroscopy*, EDX) ermittelt wurde. Es kommt zu keiner Porenbildung.

Der Einfluss eines Temperaturgradienten beeinflusst die Lotgeometrie eben-

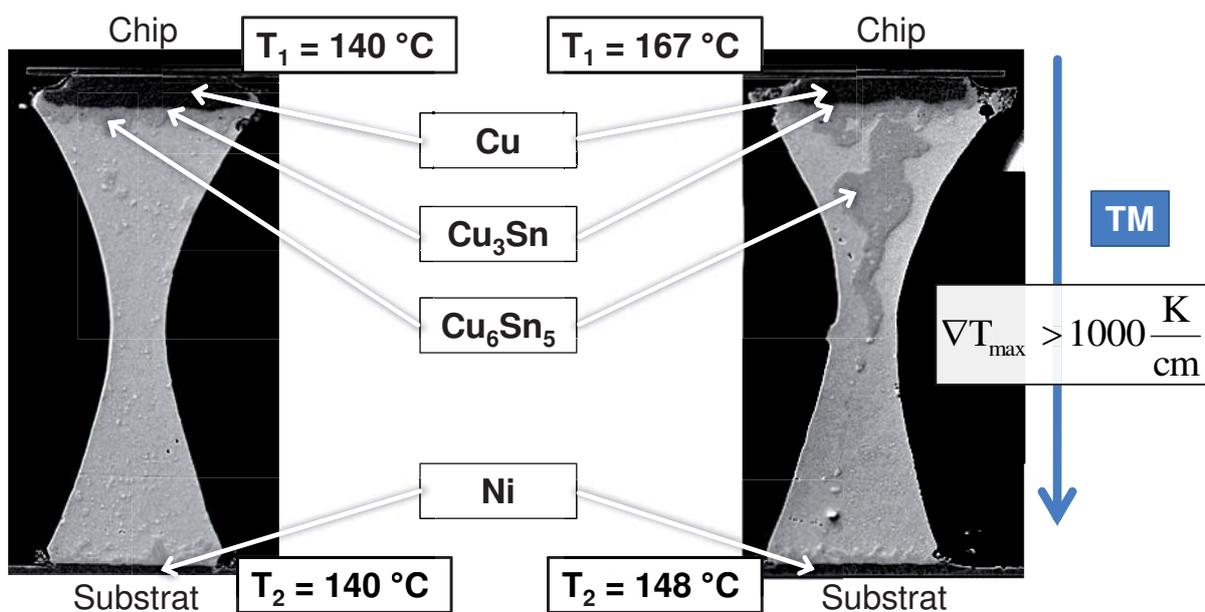


Abbildung 4.18: Ausfallcharakteristik: links: Temperaturlagerung bei $T_{Ofen} = 140\text{ °C}$ für 400 h ; rechts: Thermomigration, $T_{Ofen} = 140\text{ °C}$, 400 h

so nicht. Ein beschleunigtes Wachstum der Cu_6Sn_5 -IMC durch das Lot wird beobachtet. Das Kupfer der UBM löst sich ähnlich der EM-Untersuchung im Lot und bildet eine IMC, die innerhalb der Lotverbindung transportiert wird, Abb. 4.18. Es konnte keine Porenbildung festgestellt werden.

Die zur Bestimmung der $MTTF$ und Aktivierungsenergie notwendigen, grafisch aufgearbeiteten Messkurven der Ausfallverteilungen befinden sich im Anhang A dieser Arbeit. Die Ergebnisse der Ausfallzeiten sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. Die aus den Experimenten ermittelten Weibull-Faktoren β liegen zwischen 1,3 und 2,0 und kennzeichnen für Elektromigration typische Alterungsausfälle. Ursache der starken Streuungen der β -Werte ist einerseits die geringe Anzahl an Teststrukturen. Zudem wird bei zunehmend rauerer Testbedingungen generell ein Absinken der Werte des Weibull-Faktors beobachtet, [79]. Der Versuch Nr. 7 bei 140 °C wird in der Auswertung aufgrund der geringen Statistik der Messwerte nicht betrachtet.

Tabelle 4.4: Berechnung der Aktivierungsenergie E_a , konkave Lotgeometrie, konventionelle Teststruktur

Test-Nr.	\bar{j} [$10^4 \frac{A}{cm^2}$]	$T + \Delta T$ [°C]	Messwerte	β	$MTTF_{63,2\%}$ [h]
6	7,8	130 + 26	9 / 16	1,3	547
7	7,8	140 + 27	4 / 8	22,5	360 *
8	7,8	150 + 32	14 / 16	2,0	72
Berechnung E_a [eV]		1,32			

Wert mit * nicht berücksichtigt

Mit den berechneten mittleren Ausfallzeiten kann die Aktivierungsenergie der Struktur für Elektromigrationsausfälle mittels der Arrhenius-Gleichung zu einem Wert von 1,32 eV bestimmt werden. Dieser Wert entspricht der Aktivierungsenergie bei Überlagerung der Fehlermechanismen Thermo- und Elektromigration und der Ausbildung der IMC.

Der Exponent n der Stromdichte kann für diese Teststruktur nicht bestimmt werden, da diese nur bei einer Stromdichte untersucht wurde. Die Widerstandsveränderung wurde sowohl über zwei *Bumps* als auch über der chipseitigen Leiterbahn gemessen. Es müssten Annahmen bei der Auswertung der Widerstandskurven berücksichtigt werden, welche das Ergebnis weiter beeinflussen würden. Eine Ableitung der TTF wäre nur fehlerbehaftet möglich.

Mit den Experimenten an *Flip-Chip*-Strukturen mit konkaver Lotgeometrie

kann gezeigt werden, dass die Ausfälle der Strukturen durch die Porenbildung in der Verjüngung ausgelöst werden. Der reine Temperatureinfluss führt zu keinen Ausfällen. Die experimentell ermittelten Ausfallzeiten müssen statistisch abgesichert werden. Die Struktur eignet sich somit nicht für eine reine Untersuchung der Elektromigration. Es können die sich bei Untersuchungen zur Elektromigration überlagerten Effekte aufgezeigt werden. Neben einer Einzelmessung der Lotverbindungen müssen die Effekte Thermo- und Elektromigration weiter separiert und die Ankontaktierungen optimiert werden.

5 Aufbau einer optimierten Indikatorstruktur und Versuchsdurchführung

5.1 Teststruktur zur gezielten Untersuchung des Ausfallverhaltens unterschiedlicher Lotgeometrien bei minimierten Einflussgrößen

Auf Grundlage der Simulationsumgebung wird eine erweiterte Teststruktur entwickelt. Durch ein optimiertes Design, insbesondere die Anpassung der Leiterbahnen auf der Chipseite, wird die Thermomigration weiter reduziert und es können zusätzlich konvexe Lotgeometrien mit deutlich reduziertem *current crowding* hinsichtlich Elektromigrationsprozessen untersucht werden. Eine Abstimmung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Substrat und Teststruktur verhindert zudem thermo-mechanische Spannungen im Material. Um eine verbesserte statistische Ausfallverteilung zu erhalten, wird die Anzahl an Lotverbindungen pro Testchip auf 40 erhöht. Zur Erfassung eines Ausfalls abhängig von der Belastungsrichtung des Stroms wird eine Einzelüberwachung für jeden *Bump* realisiert. Ein bezüglich Geometrie und Material symmetrischer Aufbau von Chip, Ankontaktierungen, Übergängen und Substrat gewährleistet gleiche Randbedingungen. Damit kann die Analyse der Strom-Belastungsrichtung auf den Lotwerkstoff unabhängig von den Leiterbahngeometrien und der Bildung intermetallischer Phasen erfolgen. Sowohl Chip als auch Substrat bestehen aus dem hochtemperaturstabilen Basismaterial „RO4003C®“ (*Rogers Corporation*) mit einer Glasübergangstemperatur $>280\text{ °C}$, [42]. Dieses weist zudem mit $0,64\text{ W}/(m \cdot K)$ eine bessere thermische Leitfähigkeit im Vergleich zum Standard-Basismaterial FR4 auf ($0,3\text{ W}/(m \cdot K)$). Eine vereinfachte Kontaktierung der aufgebauten Teststruktur erfolgt über Steckverbinder.

Die messtechnische Erfassung jedes Einzel-*Bumps* ist schematisch in Abbildung 5.1 skizziert. Über den 40 EM-Lotverbindungen fließt ein Strom, bis diese ausfallen oder ein definiertes Fehlerkriterium erreichen. Die Widerstandsmes-

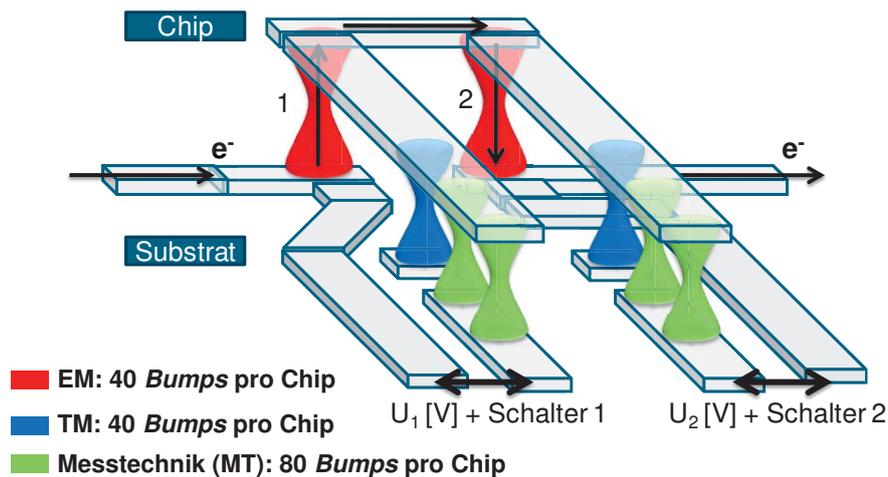


Abbildung 5.1: Verschaltung der erweiterten Teststruktur, schematisch

sung mittels Vierleiter-Messung erfolgt über die 80 Messtechnik (MT)-*Bumps* direkt ober- und unterhalb der EM-*Bumps* senkrecht zur Stromrichtung. Alle EM-*Bumps* eines Chips sind pro *Daisy-Chain* elektrisch miteinander verbunden. Fällt ein EM-*Bump* aus, so schließt der entsprechende Schalter und der Strom fließt über die zugehörigen MT-*Bumps* unverändert über die weiteren zu untersuchenden Lotverbindungen. Zur Halbierung der Stromdichte werden zwei Messtechnik-*Bumps* verwendet. Über den Thermomigrations (TM)-*Bumps* in Abbildung 5.1 fließt nie Strom. Diese befinden sich in einem Abstand von $500\ \mu\text{m}$ zu den EM-*Bumps* und dienen als Referenz zur Verifizierung, dass Ausfälle durch die Stromdichte und nicht die Temperatur verursacht werden. Insgesamt umfasst eine Teststruktur somit 160 Lotverbindungen. Die Geometrieparameter sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Das Design der Leiterplatten wird mittels einer rechnerunterstützten Fertigungssoftware (engl. *Computer-aided manufacturing*) unter Berücksichtigung der Fertigungstoleranzen entworfen und für eine Stromstärke bis 2 A ausgelegt. Richtlinien zur Leiterplattenfertigung geben bei 2 A Strombelastung eine Leiterbahnhöhe von $70\ \mu\text{m}$, -breite von min. $200\ \mu\text{m}$ und -abstände von min. $200\ \mu\text{m}$ vor, um eine theoretische Eigenerwärmung bei Dauerlast $< 30\ ^\circ\text{C}$ zu erreichen, [61]. Der genaue Aufbau des 4-lagigen Substrats besteht aus einem $800\ \mu\text{m}$ RO4003C[®]-Kern und beidseitig je $35\ \mu\text{m}$ Cu-Innenlagen, $100\ \mu\text{m}$ RO4403[®]-Prepregs, $70\ \mu\text{m}$ Cu-Leiterbahnen und einer abschließenden Passivierungsschicht. Eine zusätzliche mechanische Stabilität des 4-lagigen Aufbaus wird durch die zwei internen, vollflächigen Cu-Lagen realisiert. Zur Erhöhung der thermischen Leitfähigkeit des Substrats und Spreizung der Temperatur sind im Bereich des Chips kupfergefüllte Durchkontaktierungen (engl. *Vias*)

Tabelle 5.1: Geometrieparameter der optimierten Indikatorstruktur

Kategorie	Material	Höhe [μm]	Breite [μm]	Länge [μm]
ST ₁	Rogers RO4003C [®]	$1,2 \cdot 10^3$	$8 \cdot 10^3$	$1,66 \cdot 10^4$
UBM Öffnung		Durchmesser: 130		
AK ₁	Cu	70	200	
UE ₁	Ni / Au	5 / 1		
Lot <i>Ausgang</i>	SnAg ₄ Cu _{0,5}	100	Durchmesser: 230	
Lot <i>Gezogen</i>	SnAg ₄ Cu _{0,5}	330	Durchmesser: min. 33	
UE ₂	Ni / Au	5 / 1		
AK ₂	Cu	70	200	
ST ₂	Rogers RO4003C [®]	$1,2 \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^5$

vorgesehen, die mit den internen Kupferschichten verbunden sind. Auf der Subtratseite befinden sich 16, auf der Chipseite zwölf *Vias*. Zusätzlich befinden sich Cu-Flächen auf der Rückseite des Substrats. Auf diese Weise kann lokal ein optimierter Wärmetransport erreicht werden. Die *EM-Bumps* liegen für eine optische Vermessung und Kontrolle am äußeren Rand des Chips. Eine Präzisionsfräsung mit einer Genauigkeit von $\pm 50 \mu m$ ist in diesen Bereichen des Chips nötig. Auf dem Substrat sind insgesamt vier Bohrungen vorgesehen, um dieses während der Handhabung mit Schrauben auf einem Träger fixieren zu können und somit ein Verbiegen zu verhindern. Zusätzlich wird die Möglichkeit zur manuellen Überbrückung der Strukturen jedes Viertels eines Chips durch entsprechende Kabelanschlüsse ermöglicht. Diese kann genutzt werden, um Teile des Chips im Falle von Fertigungsproblemen zu überbrücken oder um Referenzstrukturen im Testlauf von der Stromzufuhr zu trennen.

5.2 Verifizierung des Designs und Ableitung der Lebensdauerberechnung unterstützt durch die Finite-Elemente-Analyse

Um die Auswirkungen der Optimierungen der Teststruktur auf die relevanten Randbedingungen der Fehlermechanismen zu verifizieren, wird ein Viertelmo-

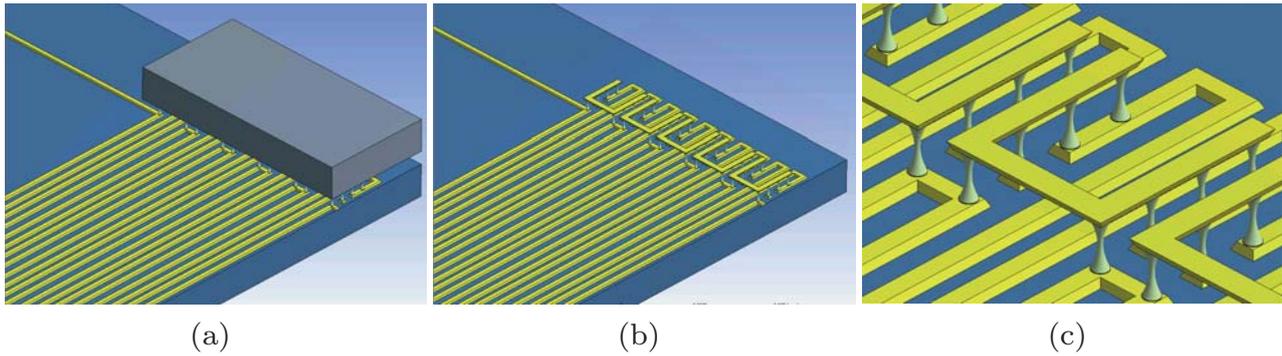
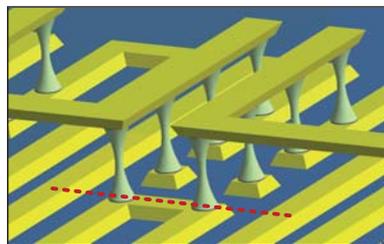


Abbildung 5.2: Aufbau der Teststruktur als FEA-Modell: a) Viertelmodell mit Details Chip, Ausschnitt Substrat, b) Details Leiterbahnen, Chip ausgeblendet, c) Details Lotverbindungen und Leiterbahnen

dell in die parametrisierte numerische Umgebung implementiert, Abb. 5.2.

Für eine Stromstärke von 1 A sind in Abbildung 5.3 die Querschnitte je einer EM-Lotverbindung mit aufwärts und abwärts gerichteter Strombelastung dargestellt.



(a) Betrachtungsebene

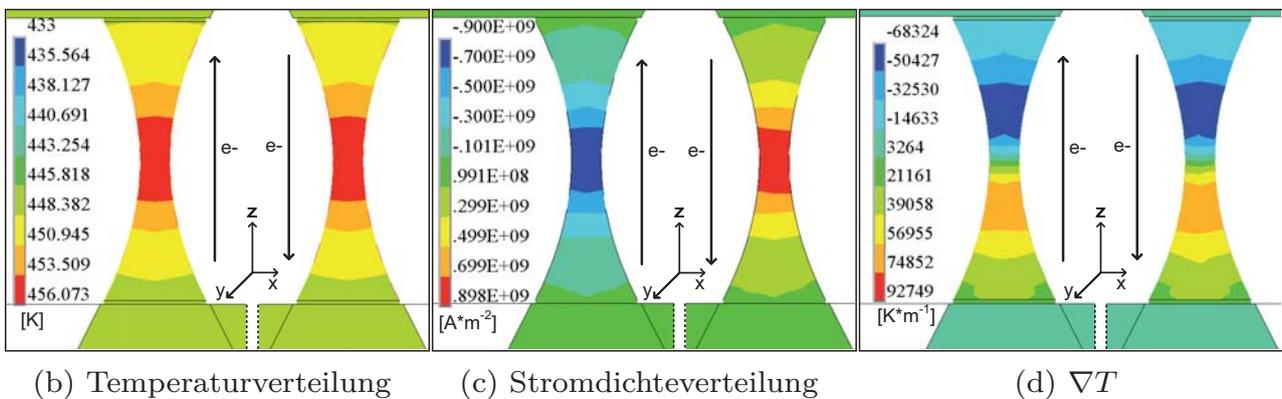


Abbildung 5.3: Numerische Berechnung der EM-Bump-Reihe, $I = 1\text{ A}$, $T = 160\text{ °C}$: b) Temperatur-, c) Stromdichteverteilung, d) Temperaturgradient

Demnach lässt sich ableiten, dass das *current crowding* im Übergangsbereich zu den Leiterbahnen im Vergleich zur Standard-Struktur um 56 % auf einen Wert von $3 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ reduziert wird, Abb. 5.3c. Für den Temperaturgradienten zeigt sich, dass dieser auf einen Wert von $\approx 750 \text{ K/cm}$ reduziert werden kann, Abb. 5.3d. Die Struktur erwärmt sich um $\approx 23 \text{ °C}$, Abb. 5.3b.

Mit den implementierten Gleichungen werden die Materialflussdichten \vec{J} von EM und TM bestimmt, Abb. 5.4. Die Verhältnisse der \vec{J}_{EM} zu \vec{J}_{TM} betragen $\approx 1,9 \cdot 10^3$ und das der Divergenzen ≈ 300 , Abb. 5.4a, 5.4c und Abb. 5.4b, 5.4d. Bei der Divergenz der Materialflussdichte aufgrund von Elektromigration zeigt sich ein symmetrischer Ausfallbereich ober- und unterhalb der Verjüngung.

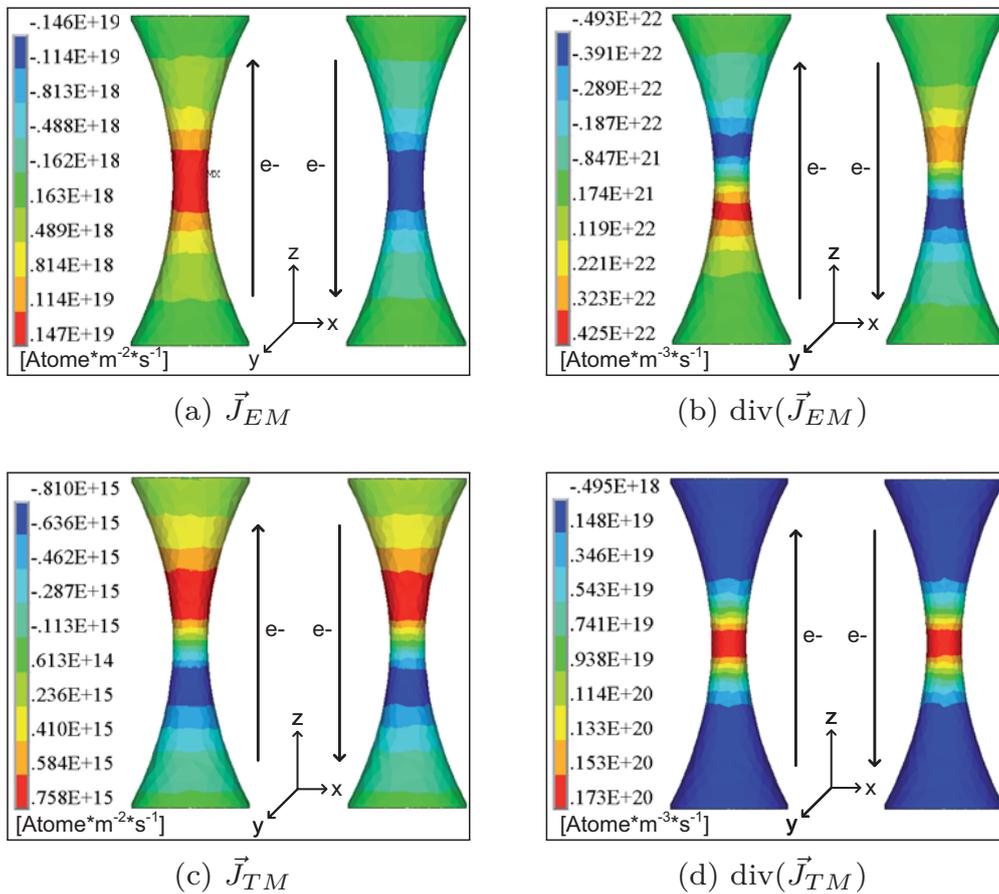


Abbildung 5.4: Numerische Berechnung der EM-Bump-Reihe, $I = 1 \text{ A}$, $T = 160 \text{ °C}$: a) Materialflussdichte durch EM, \vec{J}_{EM} , b) Divergenz der \vec{J}_{EM} , c) Materialflussdichte durch TM, \vec{J}_{TM} , d) Divergenz der \vec{J}_{TM}

Die lokale Temperaturentwicklung und Stromdichtezunahme einer EM-Lot-Verbindung bei fortschreitender Schädigung in der Verjüngung zeigt Abbil-

dung 5.5. Die Schädigung wird durch Entfernen von Elementen im Bereich der Verjüngung simuliert. Ab einer Schädigung von 84 % ergibt die Simulation eine signifikante Zunahme der Temperatur von > 20 °C. Die Stromdichte zeigt bereits bei einer Schädigung von 55 % eine Zunahme um den Faktor 2 und bei 90 % um den Faktor 9. Diese Veränderungen der Belastungen wirken sich direkt auf die Elektromigration aus und müssen im numerischen Modell zur Berechnung der TTF berücksichtigt werden.

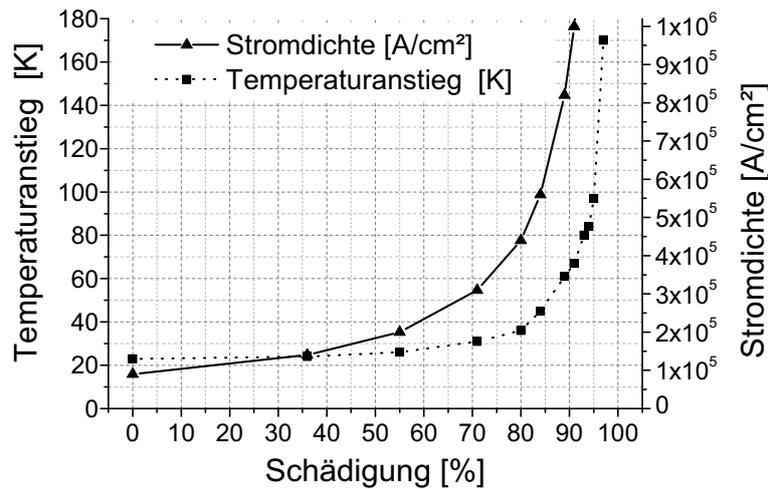


Abbildung 5.5: Numerische Berechnung des Temperaturanstiegs und der Zunahme der Stromdichte bei zunehmender Schädigung innerhalb der Verjüngung, $I = 1$ A, 38 μ m Durchmesser

Zur analytischen Berechnung der TTF ausgehend von den numerisch berechneten Werten werden die Gleichungen 2.60 und 2.61 genutzt. Um die Quotienten $\frac{E_{del,i}}{E_{ges}}$ nach Kapitel 2.3.2 zu bestimmen, ist in Abbildung 5.6 die zunehmende Divergenz der Materialflussdichte aufgrund von Elektromigration über der Schädigung aufgetragen. Die Kurve wird in vier Bereiche ($N_E = 4$) eingeteilt. Dabei gilt die Näherung, dass die Zunahme der Divergenz der Materialflussdichte in jedem Bereich mit einem linearen Anstieg beschrieben werden kann. Im ersten Bereich bis zu einer Schädigung von 30 % ($\frac{E_{del,1}}{E_{ges}} = 0,3$) wird ein unveränderter Wert der Divergenz $div(J_{a,1}) = div(J_{EM,a}(t=0))$ für die Berechnung eingesetzt. Für den Bereich 2 der Schädigung von 30 % bis 60 % ($\frac{E_{del,2}}{E_{ges}} = 0,3$) entspricht der Mittelwert der Divergenz dem Ausgangswert um den Faktor 3 erweitert, $\overline{div(J_{a,2})} = 3 \cdot div(J_{a,1})$. Für Schädigungen von 60 % bis 90 % ($\frac{E_{del,3}}{E_{ges}} = 0,3$) im Bereich 3 ergibt sich $\overline{div(J_{a,3})} = 10^2 \cdot div(J_{a,1})$ und von 90 % bis 100 % ($\frac{E_{del,4}}{E_{ges}} = 0,1$) entspricht der Mittelwert dem Ausgangswert multipliziert mit 10^4 , $\overline{div(J_{a,4})} = 10^4 \cdot div(J_{a,1})$.

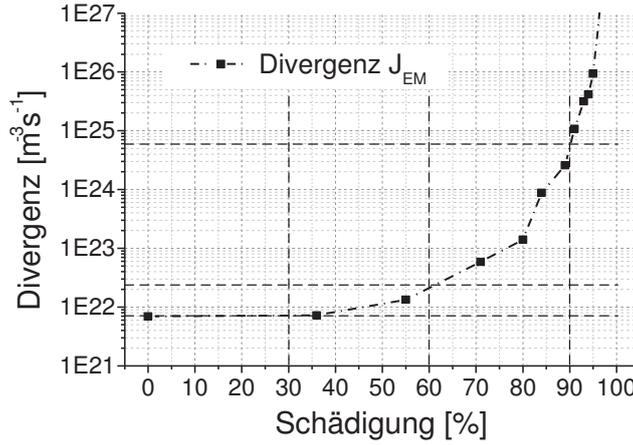


Abbildung 5.6: Numerische Berechnung der Auswirkungen einer zunehmenden Schädigung in der Verjüngung, $I = 1 \text{ A}$, $38 \mu\text{m}$ Durchmesser: Zunahme der Divergenz der Materialflussdichte J_{EM}

Nach Gleichung 2.60 ergibt sich die resultierende Gleichung 5.1 zur Berechnung der TTF in Abhängigkeit der Materialflussdichte verwendet werden.

$$\begin{aligned}
 TTF_{n,1} &= \ln(10) \cdot C_{a,0} \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\text{div}(J_{a,i})} \cdot \frac{E_{del,i}}{E_{ges}} \\
 &= \frac{\ln(10) \cdot C_{a,0}}{\text{div}(J_{a,1})} \cdot \left(1 \cdot 0,3 + \frac{1}{3} \cdot 0,3 + \frac{1}{10^2} \cdot 0,3 + \frac{1}{10^4} \cdot 0,1 \right) \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

Entsprechend Gleichung 2.61 ergibt sich die weitere zu betrachtende Gleichung 5.2 unter Berücksichtigung der Volumendiffusion im Modell nach Kapitel 3.1 mit $\delta = a$, $h = c$, $\Delta l = c$, $\Omega = 1/C_{a,0}$ und $V_c = a \cdot a \cdot c$.

$$\begin{aligned}
 TTF_{n,2} &= \frac{V_c \cdot C_{a,0}}{\Delta l \cdot \delta \cdot h} \cdot \sum_{i=1}^4 \frac{1}{\text{div}(J_{a,i})} \cdot \frac{E_{del,i}}{E_{ges}} \\
 &= \frac{V_c \cdot C_{a,0}}{\Delta l \cdot \delta \cdot h \cdot \text{div}(J_{a,1})} \cdot \left(1 \cdot 0,3 + \frac{1}{3} \cdot 0,3 + \frac{1}{10^2} \cdot 0,3 + \frac{1}{10^4} \cdot 0,1 \right) \\
 &= \frac{C_{a,0} \cdot a}{c \cdot \text{div}(J_{a,1})} \cdot \left(1 \cdot 0,3 + \frac{1}{3} \cdot 0,3 + \frac{1}{10^2} \cdot 0,3 + \frac{1}{10^4} \cdot 0,1 \right) \quad (5.2)
 \end{aligned}$$

Gleichung 5.1 wird für die Berechnung der TTF in Abhängigkeit der Aktivierungsenergie E_a und Stromdichte j verwendet, Abb. 5.7.

Ähnlich der theoretischen Betrachtung des Modells in Kapitel 3.4 hängt die numerisch berechnete TTF stark von der Aktivierungsenergie ab und steigt

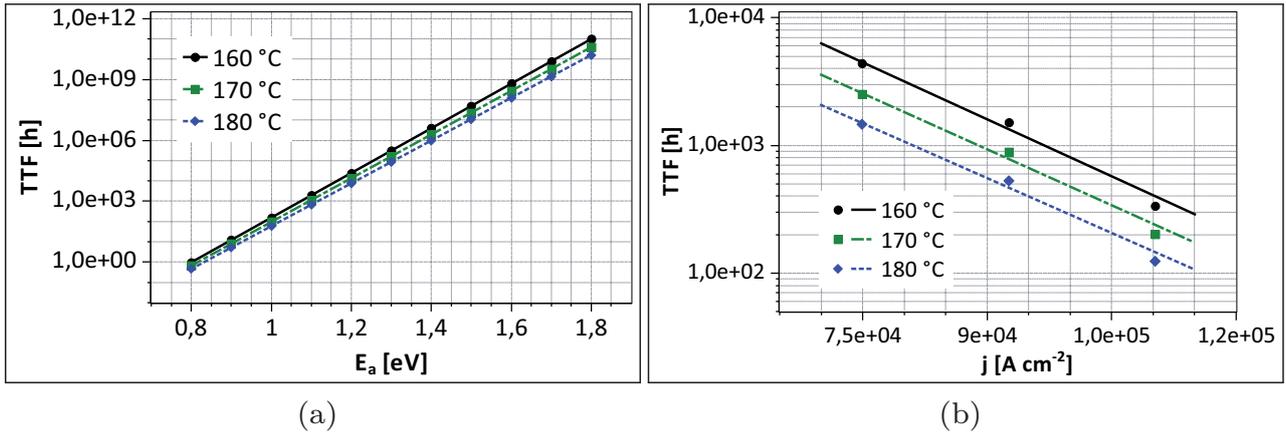


Abbildung 5.7: Numerische Berechnung der $TTF_{n,1}$ über Gleichung 5.1:
 a) Abhängigkeit von der Aktivierungsenergie E_a ,
 $I = \textit{konstant} = 1 \textit{ A}$, $38 \mu\text{m}$ Durchmesser; b) Abhängigkeit von der Stromdichte j , $E_a = \textit{konstant} = 1,09 \textit{ eV}$

von $5 \textit{ h}$ für ein $E_a = 0,8 \textit{ eV}$ auf $10^{11} \textit{ h}$ für ein $E_a = 1,8 \textit{ eV}$. Eine feinere Unterteilung der Bereiche bei der Bestimmung der Divergenz der Materialflussdichte ändert die Berechnung der TTF kaum, da die Zeit insbesondere durch den ersten Bereich mit nahezu konstantem Wert der Divergenz bestimmt wird.

Für die mit unterschiedlichen Herleitungen ermittelten numerischen Gleichungen zur Berechnung der TTF gilt $TTF_{n,1} = c \cdot a^{-1} \cdot \ln(10) \cdot TTF_{n,2}$. Bei der Auswertung über $TTF_{n,2}$ müssen die Werte in Abbildung 5.7 demnach um den Faktor $c \cdot a^{-1} \cdot \ln(10)$ reduziert werden.

Die Temperaturverhältnisse in den vergleichenden TM-Bumps zeigt Abbil-

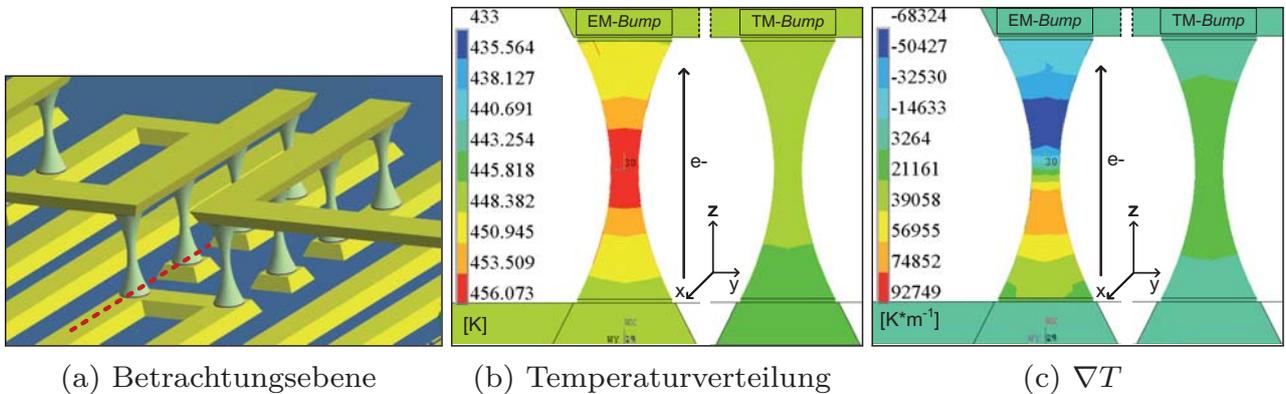


Abbildung 5.8: Numerische Berechnung der EM-, TM-Bump-Reihe:
 b) Temperaturverteilung, c) Temperaturgradient

dung 5.8. Bei diesen ist die Temperaturerhöhung im Vergleich zu den EM-*Bumps* um $> 50\%$ und der Temperaturgradient auf $< 210\text{ K/cm}$ reduziert. Die TM-*Bumps* werden als Referenz zur Bewertung der Auswirkungen der Temperaturenlagerung genutzt.

5.3 Prozessschritte zur Fertigung der Indikatorstruktur

Bei der entwickelten Teststruktur nach Kapitel 5.1 handelt es sich nicht um einen herkömmlichen *Flip-Chip*-Aufbau, da Chip und Substrat aus dem gleichen Substratmaterial bestehen. Die Lotverbindungen werden mittels Siebdruckverfahren abgeschieden. Lotpasten werden über die Kugelgröße der Zusammensetzung in acht Klassen eingeteilt, [60]. In dieser Untersuchung wird eine $\text{Sn}_{95,5}\text{Ag}_4\text{Cu}_{0,5}$ -Lotpaste der Klasse 6 (F510 SA 40C5-89S6) der Firma *Heraeus Holding GmbH* verwendet. Klasse 6 bedeutet, dass die Durchmesser der Kugeln der Paste im Ausgangszustand nicht größer als $20\ \mu\text{m}$ sind, kleiner 1% der Gesamtanzahl größer als $15\ \mu\text{m}$ sind, mindestens 90% zwischen $5\ \mu\text{m}$ und $15\ \mu\text{m}$ liegen und maximal 10% kleiner als $5\ \mu\text{m}$ sind. Nach dem Umschmelzprozess ist keine Reinigung von Flussmittelrückständen nötig (engl. *no-clean*), da sich der in der Paste enthaltene Flussmittelzusatz verflüchtigt.

Zur Überprüfung der Planarität bzw. Durchbiegung von Substrat und Chip und Verifizierung, dass die beiden Substrate möglichst parallel zueinander ausgerichtet werden können, wurde deren Höhenprofil bei Raumtemperatur mittels des Profilometers „MicroGlider[®]“ (Firma *FRT, Fries Research & Technology GmbH*) aufgenommen. Das als Chip dienende Substrat hat eine Breite von 8 mm und eine Länge von $16,6\text{ mm}$. Dieser Bereich wurde für beide Substratseiten vermessen. Das Chip-Substrat hat demnach in Längsrichtung eine maximale Höhentoleranz von $< 5\ \mu\text{m}$ und in Querrichtung von $< 3\ \mu\text{m}$. Für das Haupt-Substrat liegt die Toleranz für den betrachteten Bereich in Längsrichtung bei $< 18\ \mu\text{m}$ und quer zu dieser bei $< 10\ \mu\text{m}$. Die maximale Durchbiegung im Ausgangszustand von Chip und Substrat zusammen liegt bei $< 25\ \mu\text{m}$.

Es wird ein zweifacher Lotpastendruck durchgeführt, um der Durchbiegung der Substrate durch größeres Lotvolumen entgegen zu wirken und einen zuverlässigen Aufbau der erweiterten Teststruktur zu gewährleisten. Ein einfach ausgeführter Lotpastendruck bildet für diesen konkreten Aufbau nach dem Umschmelzprozess auf dem Substrat einen Lot-*Bump* mit einer Höhe von ca. $80\ \mu\text{m}$ aus, beim doppelten Lotdruck liegt diese bei ca. $140\ \mu\text{m}$. Des Weiteren

wird die Flussmittelwirkung der Lotpaste auf beiden Substratkontaktpartnern ausgenutzt. Der Prozessablauf zur Kontaktierung der Teststruktur ist in Abbildung 5.9 zusammengefasst schematisch dargestellt.

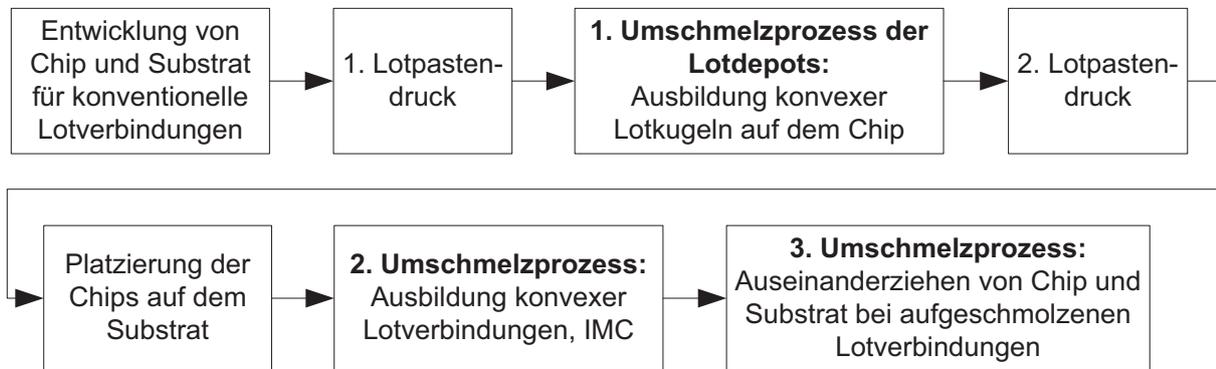


Abbildung 5.9: Prozessablauf zur Herstellung der erweiterten Teststruktur, schematisch

Etwaige Kontaminationen auf den Oberflächen der Substrate werden durch eine Plasmareinigung vor dem Lotdruckprozess beseitigt, [111]. Durch Einsatz des Geräts „Microwave Plasma Systems 400“ der *PVA TePla AG* wird dazu Sauerstoff als Prozessgas für 10 min bei 300 W, einem Druck von 0,9 mbar und einem Durchfluss von 500 ml/min verwendet.

Um eine Homogenität der Temperatureinprägung und -verteilung in beiden Substraten zu gewährleisten, werden Thermographieaufnahmen der Temperaturverteilungen zur Optimierung der Prozesstemperaturen und -zeiten verwendet. Das Leiterplattenmaterial ist im Vergleich zu einem herkömmlichen Si-

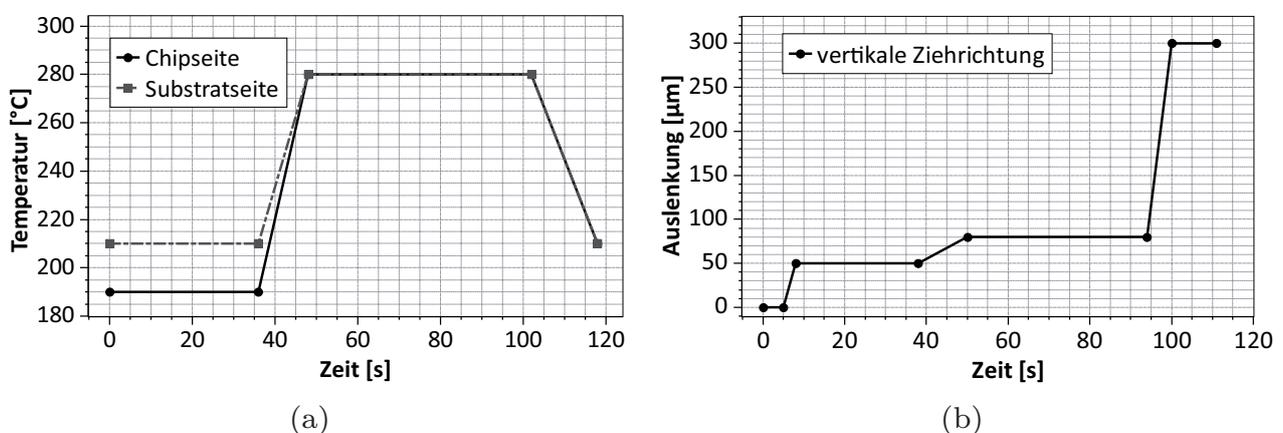


Abbildung 5.10: Prozessschritte zur Herstellung konkaver Lotverbindungen: a) Temperaturprofil, b) vertikale Auslenkung

Chip eine größere Wärmesenke, sodass die Prozesstemperaturen erhöht werden müssen. Abbildung 5.10 zeigt das optimierte Profil zum Auseinanderziehen der Struktur. Die Schmelztemperatur von $\text{Sn}_{95,5}\text{Ag}_4\text{Cu}_{0,5}$ -Lotverbindungen liegt in einem Bereich von 217 °C bis 225 °C , [135].

Die resultierende Endstruktur vor der experimentellen Versuchsdurchführung zeigt Abbildung 5.11.

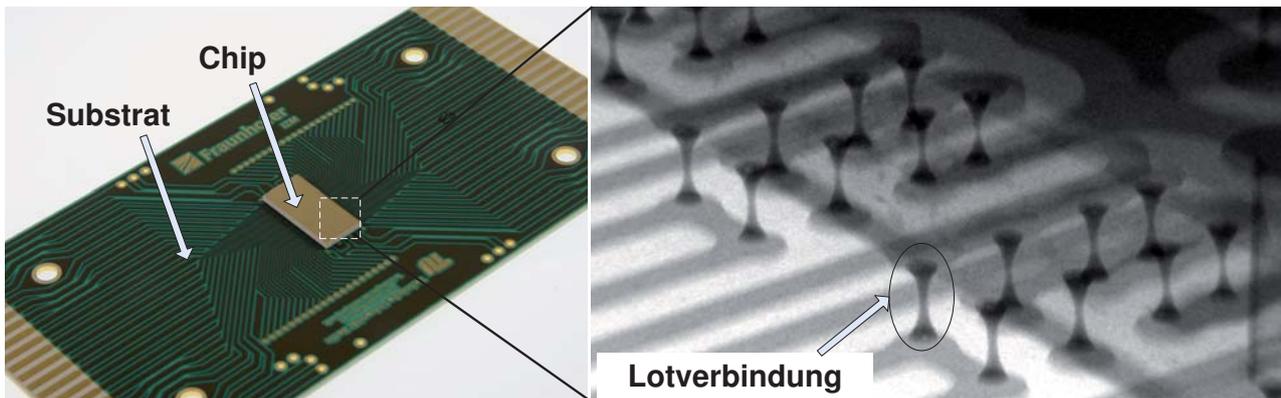


Abbildung 5.11: Aufgebaute Teststruktur mit Detailaufnahme eines Ausschnitts vom Chip im Röntgenbild

Bei der Teststruktur beträgt die Standardabweichung des Durchmessers der Verjüngung bei gleichen Parametern im Herstellungsprozess $\text{max. } \pm 10\%$. Grund ist das gewählte Lotdruckverfahren und ein sich über den Chip verändernder Abstand von Chip und Substrat aufgrund der dargelegten Durchbiegung. Die Lotverbindungen werden deshalb vor dem Experiment im nicht geschädigten Zustand pro Teststruktur kategorisiert. Die einzelnen Kategorien können so miteinander verglichen und ausgewertet werden.

5.4 Statistische Versuchsplanung

Ziel der Versuchsreihen ist die Verifizierung der theoretischen und numerischen Annahmen der Teststruktur sowie die Ermittlung der Modellparameter. Untersucht wird die Zielgröße mittlere Ausfallzeit *MTTF* der Proben in Abhängigkeit der Steuergrößen Stromdichte, Temperatur und Geometrie der Lotverbindung. Die Steuergrößen bzw. Faktoren werden beeinflusst durch die Störgrößen von Substrat, Chip und Lotverbindung. Die Lotgeometrie und damit die Stromdichte werden durch das Lotvolumen und die Ebenheit der Substrate beim Ziehprozess beeinflusst. Um Zufallsstreuungen zu minimieren, werden die nicht untersuchten Einflussgrößen konstant gehalten.

Damit die Störgrößen die Zielgrößen, d.h. die Ergebnisse, nicht verfälschen, sind geeignete Abstände der Faktorstufen zu wählen. Eine nichtlineare Abhängigkeit der Zielgrößen von den Faktoren wird durch den exponentiellen Temperatureinfluss auf die *MTTF* im Modell erwartet. Es müssen demnach mindestens drei bis fünf Stufen pro Faktor untersucht werden. Sind die einzelnen Faktoren nicht explizit messbar, so beträgt der Mindestabstand der Faktorstufen $6 \cdot \sigma_{sa}$, mit σ_{sa} der Standardabweichung, um den Zusammenhang beschreiben zu können, [72]. Liegen die Stufen zu weit beieinander, so werden deren Effekte durch die Zufallsstreuung überdeckt. Bei zu großem Abstand wird der kausale Zusammenhang von Einfluss und Ergebnis unsicher qualifizier- und quantifizierbar, Abb. 5.12.

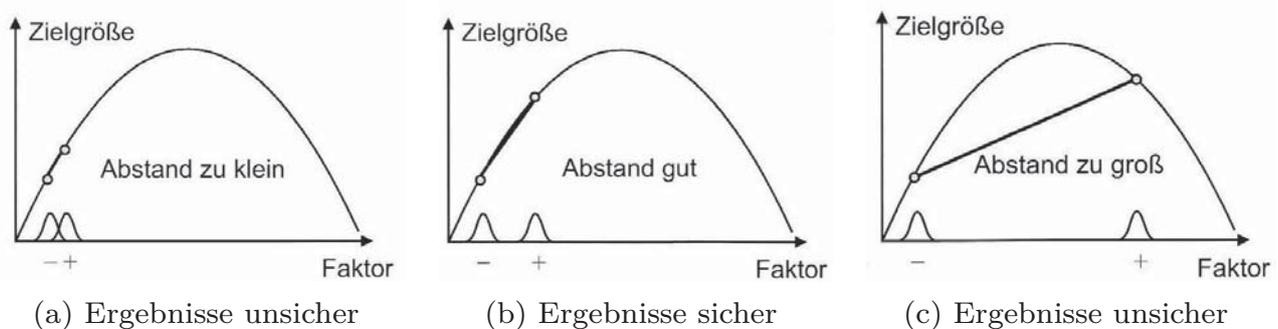


Abbildung 5.12: Geeignete Wahl der Stufenabstände bei einem zweistufigen Faktor, [72]

Bei der Versuchsplanung wird zwischen vollfaktoriellen und reduzierten Versuchsplänen unterschieden. Letztere zeigen Einflüsse und Trends der Faktoren auf, werden aber bei nichtlinearen, quantitativen Faktoren nicht empfohlen. Bei dem in dieser Arbeit verwendeten vollfaktoriellen Versuchsplan werden alle Faktoren auf allen Stufen getestet, um Vermengungen und Wechselwirkungen der Faktoren zu vermeiden. Die Faktoren Temperatur und Stromdichte werden auf jeweils drei Stufen untersucht und die Geometrie auf den zwei Stufen konkave und konvexe Lotgeometrie. Teststrukturen mit unterschiedlichen Auslenkungen, die in unterschiedlichen Geometrien resultieren, werden dazu aufgebaut.

Der Versuchsstand ist für Temperaturen bis 200 °C bei 2 A Strombelastung ausgelegt. Die Genauigkeit der Temperatur des Ofens liegt bei ± 1 °C. Wird diese Abweichung der Standardabweichung gleichgesetzt, so ergibt sich für die Stufenabstände der Temperatur ein Wert von $\min. 6 \cdot \sigma_{sa} \approx 6 \cdot 1 \text{ °C} = 6 \text{ °C} = \Delta T$. Für die Versuchsplanung wird deshalb ein ΔT von 10 °C gewählt. Zur Bestim-

mung der Joule'schen Erwärmung und Verifizierung der numerisch ermittelten Temperaturanstiege wird der temperaturabhängige Widerstandskoeffizient (engl. *Temperature Coefficient of Resistance*, TCR) jeder Struktur messtechnisch aufgenommen, [64] [67]. Die Aufheizphase des Ofens wird dazu nach jeweils 20 °C Temperaturanstieg angehalten und die elektrischen Widerstände aller Strukturen werden nach einer Wartezeit von 60 min, nach der sich die Temperaturen homogen verteilt haben, gemessen. Wird die Struktur nach Erreichen der Versuchstemperatur mit Strom belastet, kann der Temperaturanstieg in der Struktur über den Widerstandsanstieg berechnet werden.

Als Ausfallkriterium gilt laut [67] bei einer *Daisy-Chain*-Verschaltung und Messung des Gesamtwiderstands über alle *Bumps* ein Widerstandsanstieg von 10 % bzw. 20 %. Bei einer Einzel-*Bump*-Überwachung ist mindestens ein Anstieg von 50 % und bei ausgeprägter Degradation von 100 % zu wählen. Insbesondere die Bildung intermetallischer Phasen muss im Ausfallkriterium berücksichtigt werden, da diese nicht zu einem Ausfall führt, den Messwert aber beeinflusst. In dieser Arbeit wird der erste Widerstandssprung in der Messkurve oder ähnlich der Arbeit [122] ein Widerstandsanstieg von 300 % als Ausfallkriterium definiert. Um die Struktur und Metallurgie des Lots zu stabilisieren und mechanische Spannungen abzubauen, werden nach IPC-9701A [62] die Teststrukturen vor dem Aufbringen der Strombelastung der Testtemperatur für 24 h ausgesetzt.

In [144] werden enge Randbedingungen für die Stromdichte von einer Größenordnung zum Untersuchen von Elektromigration in Lotverbindungen angegeben. Diese liegt je nach Design der UBM und Lotwerkstoff zwischen $1 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ und $1,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ bzw. zwischen $5 \cdot 10^3 \text{ A/cm}^2$ und $5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Bei geringeren Stromdichten kommt es in der Struktur zu keinem Ausfall durch EM, bei höheren zu einem zeitabhängigen Aufschmelzen der Lotverbindung.

Ausgehend von Pilotversuchen werden die Faktorstufen Temperatur und Stromdichte derart gewählt, dass die Ausfälle der Teststrukturen innerhalb des Abbruchkriteriums von 720 h ($\hat{=}$ 30 Tage) erzielt werden. Die Testbedingungen können in drei Bereiche eingeteilt werden, Abb. 5.13. Bei einer Versuchstemperatur zwischen 160 °C und 180 °C und einer Stromdichte $j < 7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ in der Verjüngung liegt die Versuchsdauer bis zu einem Ausfall bei $> 800 \text{ h}$. Wird eine Stromdichte $j > 13 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ eingepreßt, wird eine stark beschleunigte Auflösung der UBM und ein starkes Aufschmelzen der Lotverbindung am Versuchsende beobachtet. Die Strombelastung ist zudem derart zu begrenzen, dass theoretisch Thermomigrationseffekte vernachlässigt werden können. Eine Stromdichte $> 13 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ sollte demnach nicht gewählt werden, um die Limitierung des Temperaturgradienten unter 1000 K/cm , der theoretischen

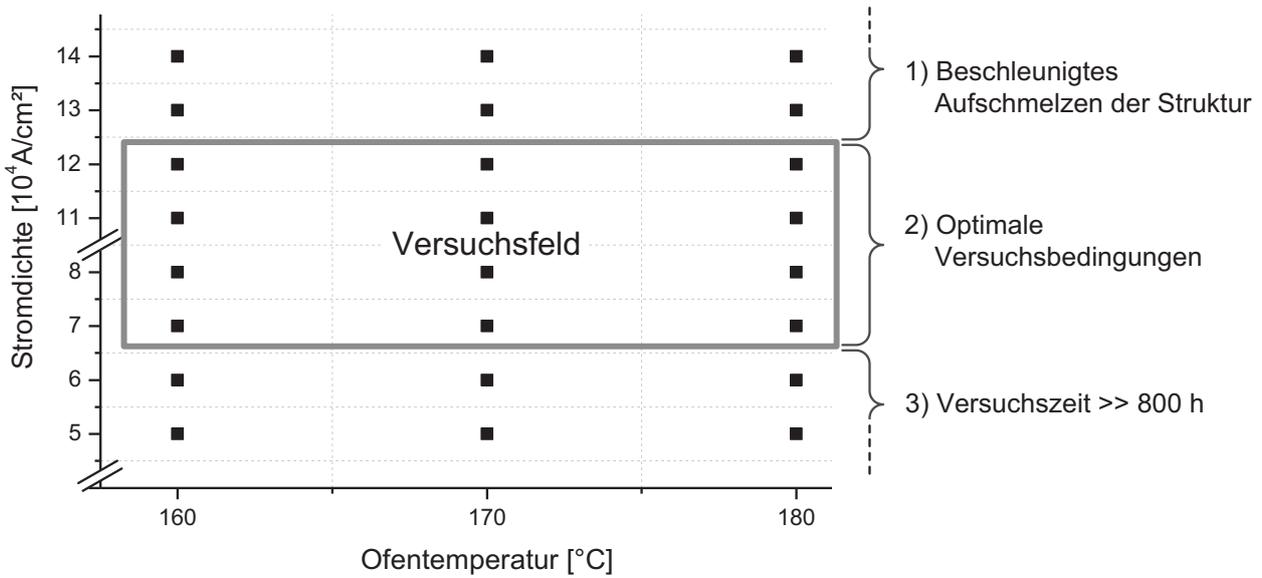


Abbildung 5.13: Versuchsfeld zur Untersuchung der Elektromigration an der optimierten Teststruktur mit Erkenntnissen aus den Pilotversuchen

Schwelle für TM, zu erreichen. Die numerische Berechnung ergibt bei einem Durchmesser der Verjüngung von $38 \mu m$ für eine Stromstärke $I = 1 A$ ein $\Delta T = 23 \text{ }^\circ C$ und $\nabla T \approx 800 K/cm$ und für eine Stromstärke von $I = 620 mA$ ein $\Delta T = 9 \text{ }^\circ C$ und $\nabla T \approx 350 K/cm$.

Zur Berechnung der Stufenabstände der Stromdichte wird von einem maximalen Messfehler des Durchmessers der Verjüngung von 10 % ausgegangen. Demnach liegt die Standardabweichung σ_{sa} der Stromdichte bei maximal $\pm 20 \text{ } \%$. Bei einer Zielstromdichte von $7 \cdot 10^4 A/cm^2$ ergibt sich ei-

Tabelle 5.2: Versuchsplan konkave Lotgeometrie, erweiterte Teststruktur

Proben-Nr.	$T_{Ofen} [^\circ C]$	$I [A]$	Durchmesser Verjüngung [μm]		
			Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
50	180	0,62	33 ± 1	-	-
51	180	1,00	40 ± 1	37 ± 1	33 ± 1
52	170	1,06	42 ± 1	37 ± 1	33 ± 1
69	170	1,12	43 ± 1	39 ± 1	36 ± 2
38	160	1,00	40 ± 1	36 ± 1	33 ± 1
67	160	1,00	41 ± 1	37 ± 1	33 ± 1

ne Standardabweichung von $\pm 1,4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ und ein Stufenabstand von $6 \cdot \sigma_{sa} \approx 8,4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Wie die Vorversuche gezeigt haben, ist der theoretisch ermittelte Stufenabstand von $8,4 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ nicht realisierbar, da Stromdichten zwischen dem unteren und oberen Schwellwert $7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ und $13 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ liegen sollten. Der Messbereich wird deshalb in die drei Bereiche $7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, $9,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ und $11,9 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ eingeteilt. Die Stufenabstände entsprechen einem Wert von 25 % der Zielstromdichte. Die vermessenen Durchmesser der Verjüngungen werden diesen drei Stufen zugeordnet. Stufe 1 umfasst Stromdichten von $(6,9 \text{ bis } 8,5) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, Stufe 2 von $(8,6 \text{ bis } 10,6) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ und Stufe 3 von $(10,7 \text{ bis } 13,1) \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$.

Die Stromstärken der einzelnen Teststrukturen werden angepasst, um die Statistik für die kategorisierten Stromdichten zu optimieren. Tabelle 5.2 fasst den Versuchsplan der optimierten Teststruktur zusammen.

6 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Zur Analyse der Ausfallcharakteristik der Teststrukturen werden diese nach der Versuchszeit für die Anfertigung von Querschliffen präpariert. Die Proben werden dafür zunächst in einem Epoxid eingebettet. Normale *Flip-Chip*-Einbettmasse wird bei Temperaturen von 150 °C für 30 min ausgehärtet. Um die Strukturen nicht weiter durch die Präparation zu beschädigen, wird ein langsam aushärtendes Epoxid gewählt. Dieses härtet innerhalb von sieben bis zwölf Stunden aus und erzeugt dabei eine Temperatur von etwa 85 °C. Querschliffe können anschließend von den Teststrukturen zu unterschiedlichen Testzeitpunkten angefertigt und analysiert werden. An mittels Ionenätzung weiter aufbereiteten Proben kann die Kornstruktur untersucht werden. Im Raster-Elektronen-Mikroskop können diese hochaufgelöst optisch analysiert werden. Zur Bestimmung der Materialzusammensetzung wird die energiedispersive Röntgenmikrobereichsanalyse angewendet.

6.1 Verjüngte Lotgeometrie mit reduzierten Einflussgrößen

6.1.1 Gefügeveränderung und Ausfallcharakteristik

Den Ausgangszustand der konkaven Lotgeometrie mit homogenem, feinkristallinem Materialgefüge zeigt Abbildung 6.1 anhand zweier Querschliffe verschiedener Teststrukturen mit gleichen Prozessparametern. Lotgeometrie, IMC und die Nickelpassivierung zeigen eine Symmetrie zwischen Chip- und Substratseite.

Zur Untersuchung der Ausfallcharakteristik wurden Teststrukturen nach verschiedenen Versuchszeiten aus dem Versuch genommen, um optisch die Geometrieveränderung zerstörungsfrei dokumentieren zu können. Abbildung 6.2 zeigt vier Lotverbindungen jeweils in analoger Ansicht vor der Strombelastung, nach 400 h und nach 800 h. Es ist eine deutliche Geometrieveränderung zu erkennen. In der Verjüngung zeigen sich Auswüchse, die mit fortschreiten-

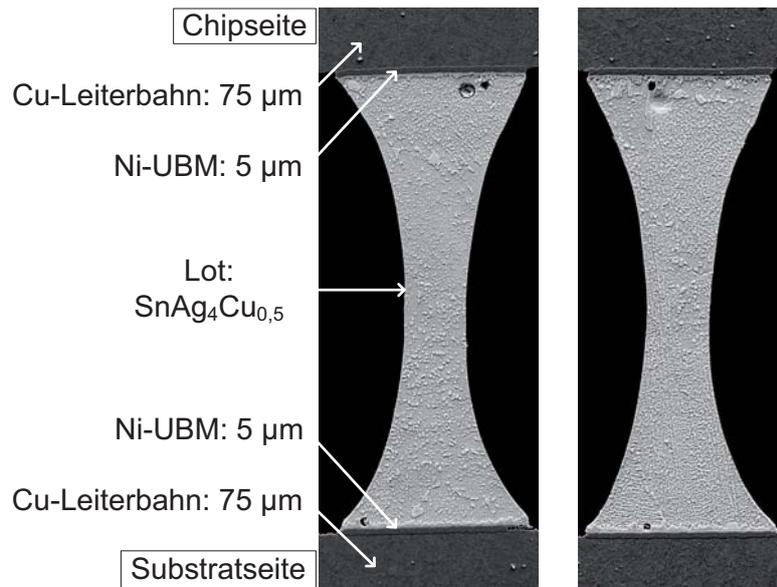


Abbildung 6.1: Unterschiedliche konkave Teststrukturen bei gleichen Prozessparametern zum Aufzeigen der Homogenität im Ausgangszustand, inkl. Details der Materialien, REM-Aufnahmen von Querschliffen

der Schädigungsdauer zunehmen. Eine genauere Untersuchung der Porenbildung bei sich verändernder Metallurgie zeigt Abbildung 6.3. Mit zunehmender

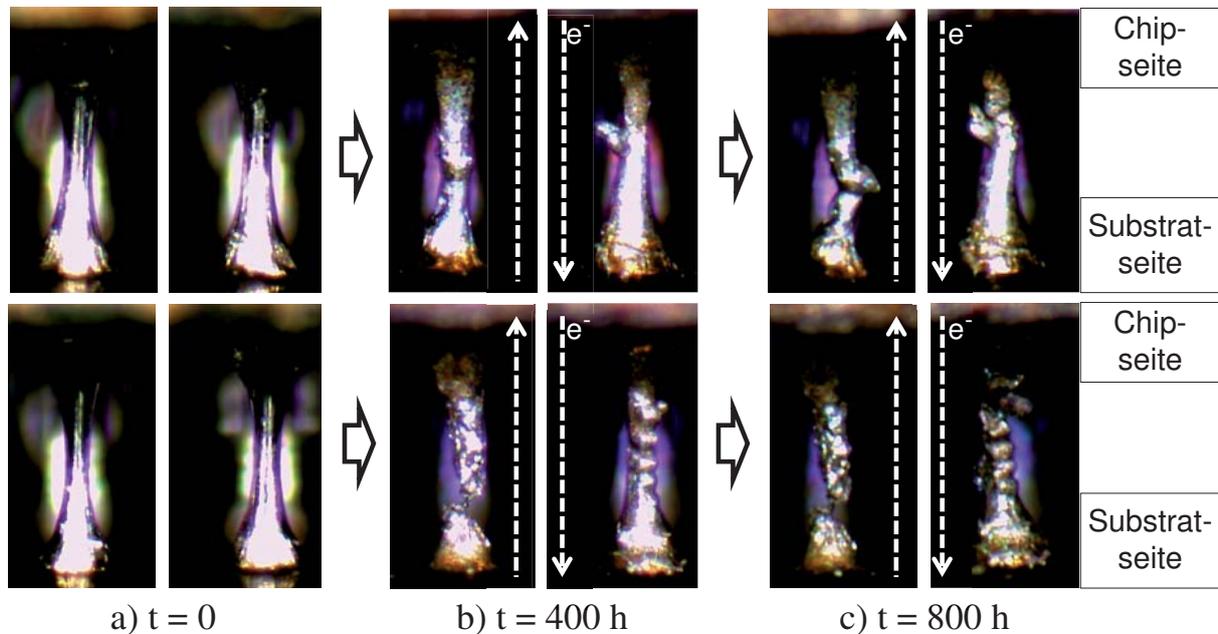


Abbildung 6.2: Veränderung der Geometrie mit zunehmender Schädigung: jeweils gleiche Lotverbindungen im Auflichtmikroskop nach 0 h, 400 h und 800 h, $T = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $j = 7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$

Migrationszeit t nimmt der Querschnitt der Lotverbindung mittig ab. Im Bereich der Verjüngung bildet sich eine Bambus-Struktur aus. Die fortschreitende Migration erfolgt nur durch Volumen- und Oberflächendiffusion, siehe Kapitel 2.2.3.1.

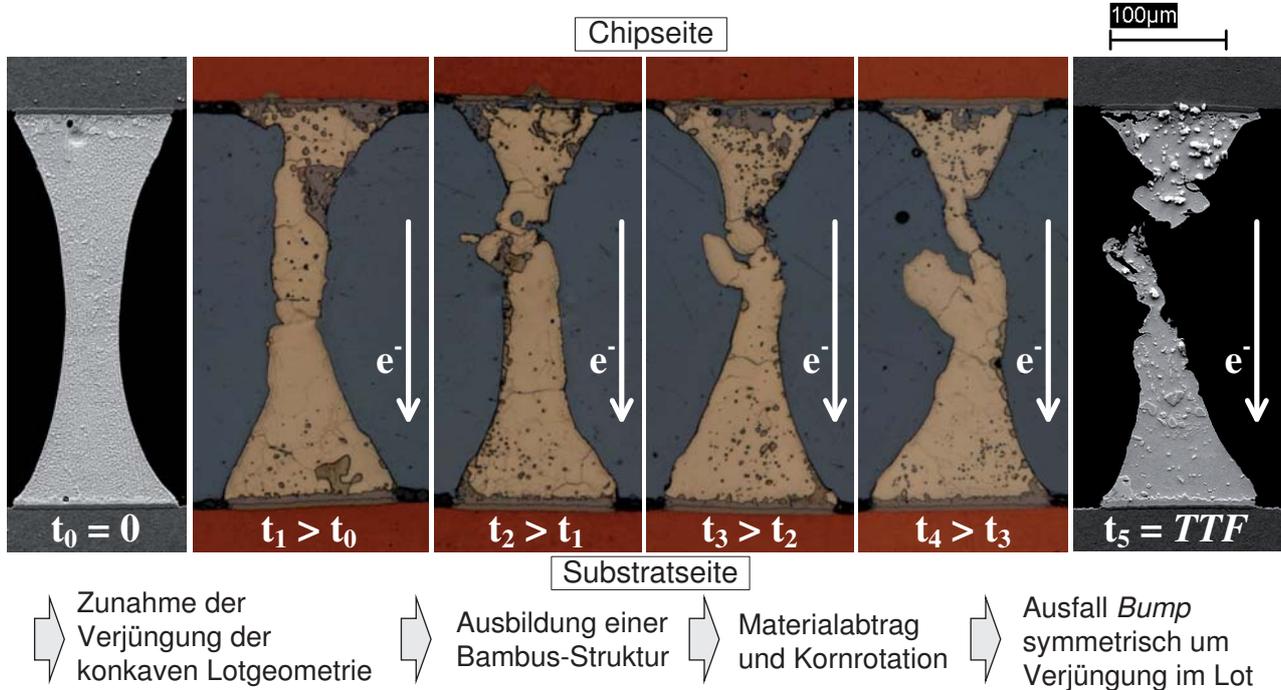


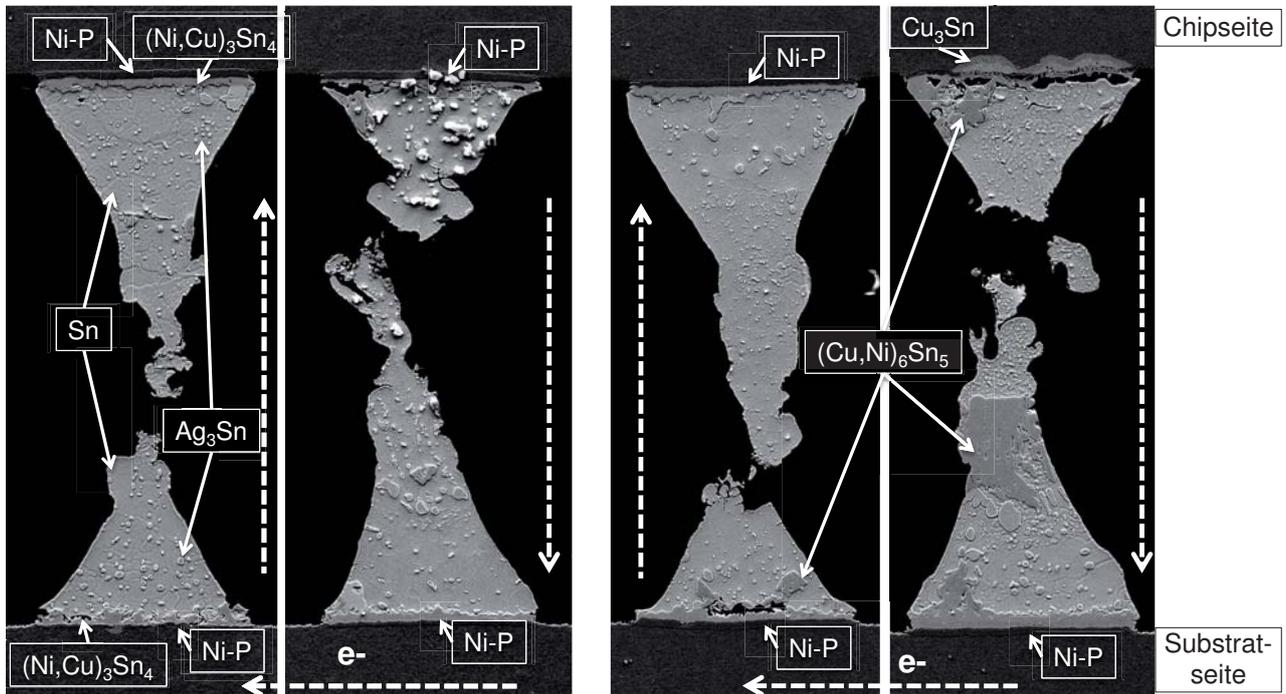
Abbildung 6.3: Fortschreitende Schädigung bei konkaver Lotgeometrie, Querschliffe verschiedener Teststrukturen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im REM bzw. Auflichtmikroskop

Der Ausfall der Struktur wird durch eine sich im Bereich der Verjüngung ausbildende Pore verursacht. Die im Auflichtmikroskop sichtbaren Auswüchse bei nicht angeschliffenen Strukturen werden zusätzlich durch rotierende Körner hervorgerufen. Körner werden durch Ablagerungen in den Korngrenzen nach außen gedrückt, vgl. Kapitel 2.2.2.2. Die geringen Durchmesser begünstigen somit die Ausbildung einer Bambus-Struktur durch Kornumorientierungen. Diese werden bei konventionellen Lotgeometrien aufgrund der größeren Dimensionen nicht beobachtet. Bei zunehmender Miniaturisierung der Lotverbindungen muss dieser Einfluss bei der Auslegung optimierter Lotgeometrien stärkere Berücksichtigung finden.

Die Ausfallcharakteristik abhängig von der Strombelastungsrichtung zeigt Abbildung 6.4. Die Porenbildung erfolgt symmetrisch im oberen bzw. unteren Bereich der Verjüngung. Diese Beobachtungen entsprechen den numerisch berechneten Regionen maximaler Divergenz der Materialflussdichten. Die Versuchsdurchführung bei verminderter Temperatur von 160 °C bedingt die glei-



(a) Übersicht der angeschliffenen Ebene eines Chips



(b) Details ausgefallener Lotverbindungen

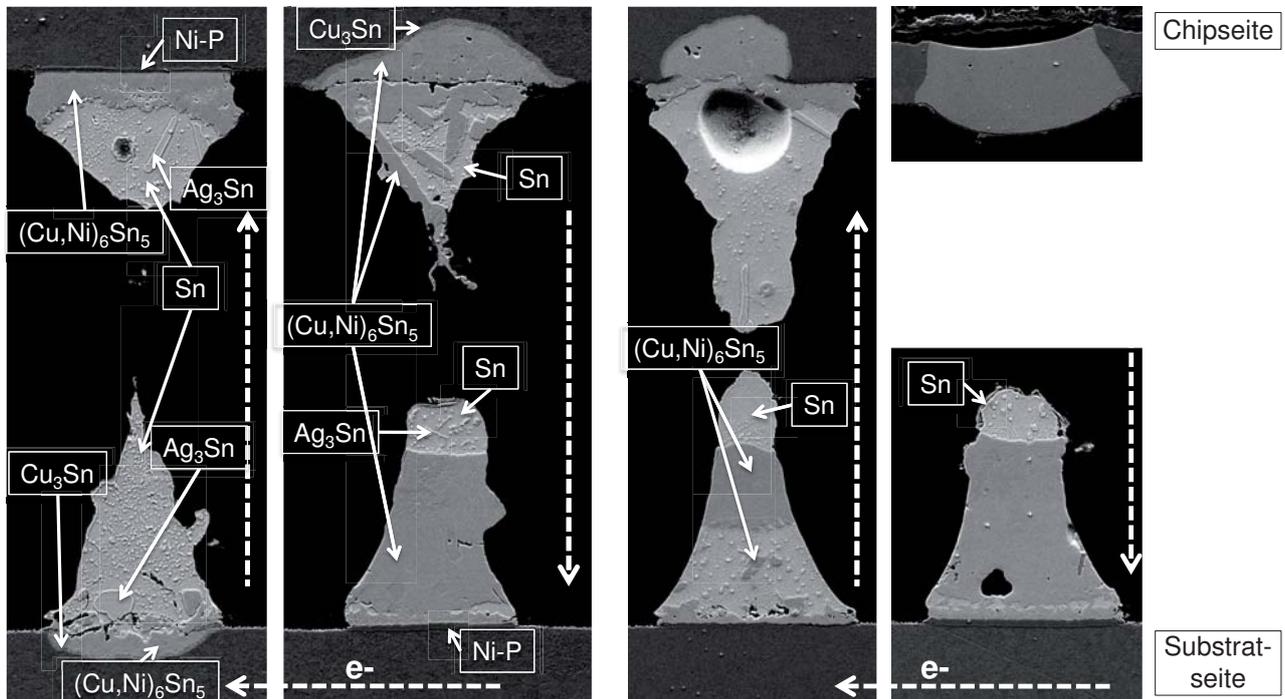
Abbildung 6.4: Ausfallcharakteristik, abhängig von der Belastungsrichtung, $T_{Ofen} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, links: $j = 7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, rechts: $j = 9,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, REM-Aufnahmen angeschliffener Proben

che Ausfallcharakteristik wie die Versuche bei $180 \text{ }^\circ\text{C}$.

Es zeigt sich eine zusätzliche Nickel-Wanderung auf Chip- bzw. Substratseite, die zu einer Porenbildung innerhalb der UBM führt. Die Ni-Diffusion erfolgt bei hohen Stromdichten unabhängig von der Versuchstemperatur und wird durch die Elektronenbewegung unterstützt. Kathodenseitig wird Ni in eine NiSn-Phase überführt. Die Gegenseite wird nicht durch Diffusion beeinflusst. Ni gilt als *fast diffusor* mit geringer Aktivierungsenergie von $0,2 \text{ eV}$ bis $0,5 \text{ eV}$ [119], siehe Kapitel 2.2.3.1. Ist die Ni-Schicht vollständig abgetragen, diffundiert das Kupfer aus der Ankontaktierung und es bildet sich im Bereich der UBM eine ternäre $(\text{Cu,Ni})_6\text{Sn}_5$ -IMC. Ni wird während der zunehmenden Schädigung nicht in die Verjüngung und den unteren Bereich der Lotverbindung transportiert. Nur ausgefallene Proben zeigen eine IMC-Bildung im Bereich der Verjüngung, die sich typischerweise beim Aufschmelzen des Lotwerkstoffs ausbildet.



(a) Übersicht der angeschliffenen Ebene eines Chips



(b) Details ausgefallener Lotverbindungen

Abbildung 6.5: Ausfallcharakteristik abhängig von der Belastungsrichtung, $T_{Ofen} = 180 \text{ °C}$, $j = 11,9 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, REM-Aufnahmen angeschliffener Proben

Bei den Querschliffen in Abbildung 6.5 von Lotverbindungen, die bei Testbedingungen nahe an der Schmelztemperatur getestet wurden, ist diese IMC-Bildung in der gesamten ausgefallenen Struktur sichtbar. Der Einfluss der IMC auf die Porenbildung in der Verjüngung kann vernachlässigt werden, da sich diese erst beim Ausfall in Verbindung mit einem Aufschmelzprozess ausbildet.

Unterschiedliche Kornorientierungen führen demnach in miniaturisierten Lotverbindungen zu den zwei bekannten Fehlermodi der Eigendiffusion mit Kornrotation und der UBM- bzw. IMC-Abtragung durch interstitielle Diffusion schnell diffundierender Materialien, siehe Kapitel 2.2.2.2. Bei der UBM handelt es sich um den Fehlermodus 2, in der Verjüngung um den Modus 1, d.h. eine Sn-Eigendiffusion.

Die Referenzstrukturen (*TM-Bumps*), die parallel zu den *EM-Bumps* auf der Teststruktur angeordnet sind und nur der Testtemperatur ausgesetzt waren, zeigen keine geometrische Veränderung, Abb. 6.6. Das Phasenwachstum der

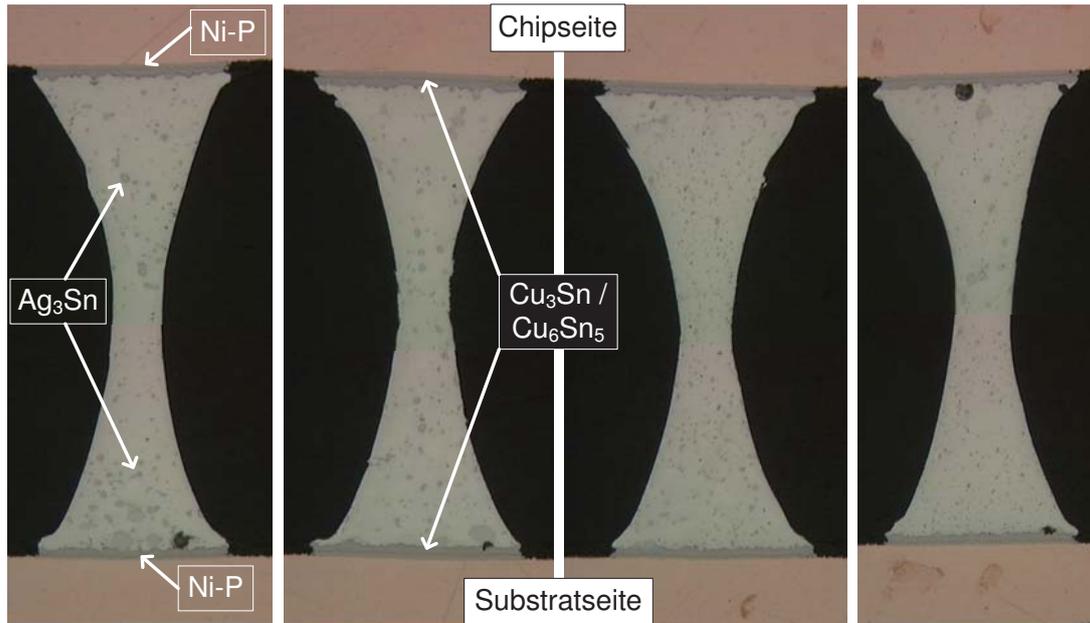


Abbildung 6.6: Einfluss der Temperaturlagerung auf die Referenzteststrukturen (TM-Bumps), Auflichtmikroskop-Aufnahmen von Querschliffen, $T = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_{Ofen} = 500 \text{ h}$, $\nabla T \approx 200 \text{ K/cm}$

IMC erfolgt auf beiden Seiten der Lotverbindung symmetrisch. Der Einfluss der Thermomigration kann in dieser Struktur demnach vernachlässigt werden.

Die konkave Struktur kann somit zur Untersuchung von Elektromigration unter definierten Testbedingungen eingesetzt werden.

6.1.2 Bestimmung der Lebensdauer und Ableitung der Modellparameter

Zur statistischen Analyse der experimentell ermittelten Werte wird die Weibull-Verteilungsfunktion nach Gleichung A.1 genutzt, siehe Anhang A.1. Die zur Bestimmung des Modellparameters Aktivierungsenergie E_a und des Exponenten der Stromdichteabhängigkeit n notwendigen, grafisch aufgearbeiteten Messkurven der Ausfallverteilungen befinden sich im Anhang A dieser Arbeit.

Der Mittelwert für den Exponenten n über sechs vermessene Strukturen liegt entsprechend Tabelle 6.1 bei 2,47. Bei der Berechnung von n ist ein konstanter Temperaturwert bei unterschiedlichen Stromdichten gefordert. Es werden je Stromdichte alle Messwerte mit einem berechneten Temperaturanstieg $< \pm 20 \%$ des Mittelwerts der ΔT aller Teststrukturen einer Probe berücksichtigt.

Mit der vorgenommenen Kategorisierung können 144 der 175 ausgefallenen Strukturen bei der Auswertung und Berechnung der Aktivierungsenergie E_a

Tabelle 6.1: Gemessene Werte für den Exponenten n , konkave Lotgeometrie

Proben-Nr.	T [°C]	Exponent n	Ausfälle / Gesamtzahl
50	180	2,07	16 / 40
51	180	1,83	40 / 40
52	170	3,61	38 / 39
69	170	2,18	19 / 40
38	160	2,61	36 / 40
67	160	2,52	26 / 37
Mittelwert		2,47	

berücksichtigt werden, Tabellen 6.2 und 6.3.

Zur Analysierung der Auswirkungen der unterschiedlichen Werte der β Weibull-Formfaktoren werden die zwei Ausfallkriterien 10 % und 50 % mit dem Standard-Prozentwert 63,2 % für alle Messwerte nach Tabelle 6.2 verglichen. Mittelwerte der berechneten Aktivierungsenergie für die unterschiedlichen Betrachtungen der $MTTF$ sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Für die mittlere Aktivierungsenergie ergibt sich ein Wert zwischen 1,84 eV und 2,38 eV. Verglichen mit Literaturwerten zur Volumendiffusion liegt dieser Wert um etwa den Faktor zwei höher. Mit kleiner werdendem Durchmesser der Lotverbindungen wird eine steigende Aktivierungsenergie bei gleichem Fehlermechanismus und Lotwerkstoff ermittelt. Ursache ist der bei zunehmender Miniaturisierung stärkere Einfluss der Kornorientierung, vgl. Kapitel 2.2.2.2. In den Experimenten wurde neben der Kornrotation die Bildung einer Bambus-Struktur nachgewiesen. Durch diese Struktur kann die Migration nur über eine Volumendiffusion erfolgen. Innerhalb der Korngrenzen der Bambus-Struktur sammeln sich Leerstellen an und es bauen sich zusätzliche Konzentrationsgradienten und mechanische Spannungen längs der Korngrenze auf, [53]. Diffundierende Leerstellen müssen die Bindungsenergie dieser Leerstellen überwinden, welche die Aktivierungsenergie der Elektromigration somit zusätzlich beeinflussen kann. Bei Aluminium-Leiterbahnen wird für eine Bambus-Struktur eine um den Faktor ≈ 2 höhere Aktivierungsenergie ermittelt im Vergleich zu einer polykristallinen-Struktur, vgl. Kapitel 2.2.1.1. Allerdings wechselt unter diesen Bedingungen der Diffusionsmechanismus von Korngrenzen- zu Volumendiffusion. Als weitere mögliche Ursache einer hohen ermittelten Akti-

Tabelle 6.2: Berechnung der Aktivierungsenergie E_a , konkave Lotgeometrie

Proben-Nr.	\bar{j} [$10^4 \frac{A}{cm^2}$]	$T + \Delta T$ [°C]	Ausfälle / Ge- samtzahl	β	$MTTF_{63,2\%}$ [h]
50	7,7	180 + 12	4 / 11	1,4	675
	9,6	180 + 17	1 / 1	-	215 *
	11,9	-	-	-	-
51	7,7	180 + 23	14 / 14	5,5	28
	9,6	180 + 25	19 / 19	2,6	24
	11,9	180 + 31	4 / 4	2,1	8
52	7,7	170 + 24	10 / 11	1,4	323
	9,6	170 + 24	18 / 18	1,6	131
	11,9	170 + 29	5 / 5	2,8	31
69	7,7	170 + 15	2 / 12	1,8	1408 *
	9,6	170 + 18	7 / 9	1,8	493
	11,9	170 + 21	3 / 4	10,6	170 *
38	7,7	160 + 23	13 / 15	2,1	386
	9,6	160 + 26	14 / 15	1,2	281
	11,9	160 + 29	5 / 6	0,8	148 *
67	7,7	160 + 21	11 / 17	1,9	614
	9,6	160 + 18	6 / 9	0,8	480 *
	11,9	160 + 25	8 / 8	1,3	177

Werte mit * werden in den weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt

vierungsenergie wird in der Literatur der Einfluss einer nicht bzw. fehlerhaft berücksichtigten Eigenerwärmung diskutiert, [65] [128]. Diese wurde in dieser Arbeit jedoch initial bestimmt und sowohl mit der TCR-Methode als auch anhand der numerischen Simulation bestätigt und in der Auswertung berücksichtigt.

In [89] wird bei Stromdichten von ca. $9 \cdot 10^4 A/cm^2$ und Ofentemperaturen zwischen 140 °C und 175 °C eine Aktivierungsenergie von 1,63 eV für $SnAg_{3,5}$ -Standard-Lotverbindungen gemessen. Es wird angenommen, dass es sich um eine Volumendiffusion handelt. Im Unterschied zur vorliegenden Arbeit wird in [89] die Joule'sche Erwärmung mit einem Wert von bis zu 100 °C angegeben.

Zur weiteren Verifizierung der messtechnisch ermittelten Aktivierungsenergie sind in Abbildung 6.7 alle Messwerte der TTF über der Temperatur aufgetragen. Für jede Struktur wird die berechnete Eigenerwärmung berücksichtigt.

Tabelle 6.3: Mittelwerte der Aktivierungsenergie E_a für die unterschiedlichen Betrachtungen der $MTTF$, konkave Lotgeometrie

Betrachtete Statistik	Stromdichte \bar{j} [$10^4 \frac{A}{cm^2}$]			Mittelwert
	7,7	9,6	11,9	
$E_{a,1}; 63,2\%$ [eV]	2,38	2,09	2,47	$2,31 \pm 0,20$
$E_{a,2}; 63,2\%$ [eV]	2,13	2,75	2,26	$2,38 \pm 0,33$
$E_{a,2}; 10\%$ [eV]	1,76	1,98	1,79	$1,84 \pm 0,12$
$E_{a,2}; 50\%$ [eV]	2,06	2,62	2,18	$2,29 \pm 0,29$

Berücksichtigte $MTTF$ nach Tabelle 6.2: $E_{a,1}$: alle Werte; $E_{a,2}$: nur Werte ohne *

Die Steigung der Ausgleichsgeraden je Stufe der Stromdichten ergibt die jeweilige Aktivierungsenergie E_a , die hier zwischen 1,71 eV und 2,00 eV liegt. Ein Fehler in der Auswertung kann somit ausgeschlossen werden.

Die Ableitung der zu berücksichtigenden Porenhöhe c für das Modell nach Kapitel 3.1 erfolgt anhand der Ausfallcharakteristik. Der Querschnitt des geschädigten *Bumps* nimmt zu Beginn mittig auf einer Länge von $2 \cdot a$ ab, mit a

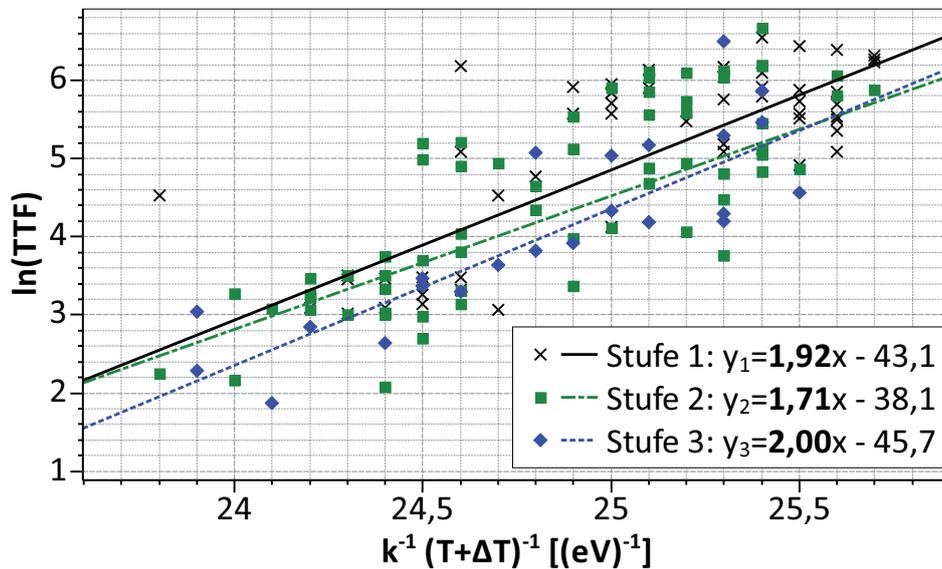


Abbildung 6.7: Ableitung der Aktivierungsenergie E_a aus der Steigung m_x der Geradengleichung $y = m_x \cdot x_x + n_x$ unter Berücksichtigung aller Messwerte TTF [h] und der entsprechenden Temperatur mit Eigenerwärmung ΔT für die drei Stufen der Stromdichte j , k : Boltzmann-Konstante

dem Durchmesser der Verjüngung, bis sich die Pore in einer Region durch den kompletten *Bump* ausbildet, Abb. 6.8.

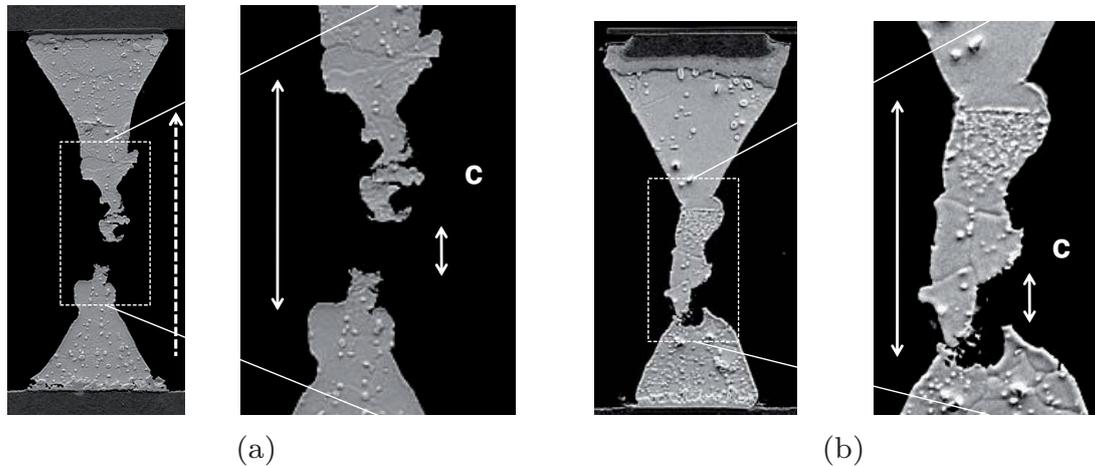


Abbildung 6.8: Ableitung der sich ausbildenden Porenhöhe c und Modellparameter: a) optimierte Teststruktur, b) Vergleich mit den Ausfallcharakteristiken der Pilotversuche an konventionellen Teststrukturen

Die Höhe der Pore c entspricht sowohl für die konkave Lotgeometrie aus dem Vorversuch als auch für die optimierte Struktur einem Wert von $10 \mu\text{m}$. Bei Messung der Widerstandsänderung $\Delta R(t)$ wird die Abnahme des Durchmessers der Verjüngung erfasst. Der Parameter c entspricht damit dem Bereich, in dem das Material abgetragen wird und nicht der Weite der Pore, die sich zum Versuchsende ausbildet und zum Ausfall führt.

Für den Vorfaktor A der Black'schen Gleichung 2.43 ergibt sich ein Mittelwert über alle $MTTF_{63,2\%}$ -Werte von $A = 7,34 \cdot 10^{-12} h \cdot (A/\text{cm}^2)^{2,47}$ mit einer Standardabweichung σ_{sa} von $4,06 \cdot 10^{-12} h \cdot (A/\text{cm}^2)^{2,47}$. Somit liegt σ_{sa} von A in der Größenordnung des Mittelwerts von A .

Für den Vorfaktor B der Gleichung 2.47 nach Shatzkes ergibt sich ein Mittelwert über alle 175 Werte von $B = 9,58 \cdot 10^{-20} A \cdot h / (\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$ mit einer Standardabweichung σ_{sa} von $8,87 \cdot 10^{-20} A \cdot h / (\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$.

6.1.3 Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit den Modellen

Die Berechnungen der TTF über das analytische Modell nach Gleichung 3.26 und die numerischen Modelle nach Gleichung 5.1 und Gleichung 5.2 basieren auf dem separierten Fehlermechanismus Elektromigration ohne überlagerte Effekte. Die in Kapitel 6.1.1 ausgewerteten Fehlerbilder zeigen neben der

Materialdiffusion eine Veränderung der Gefügestruktur mit fortschreitender Testdauer. Die analysierte Kornrotation in Verbindung mit der sich ausbildenden Bambus-Struktur und IMC beeinflussen die Migration dahingehend, dass diese langsamer abläuft. Dieses zeigt sich in dem signifikanten Anstieg der Aktivierungsenergie.

Die Modellparameter nach Kapitel 6.1.2 wurden aus den Messwerten der TTF bestimmt, die sich nach der Veränderung der Kornstruktur ergeben. Die analytischen Modelle berücksichtigen diese nachgewiesenen Einflüsse nicht und bilden daher den Ausgangszustand ab. Zu diesem Zeitpunkt liegt weder eine Kornrotation noch eine Bambus-Struktur vor. Somit muss bei den Berechnungen der TTF über das analytische und numerische Modell der Modellparameter E_a entsprechend angepasst werden, um die Berechnungen mit den messtechnisch erfassten Werten vergleichen zu können. Die Aktivierungsenergie E_a für eine Zinn-Eigendiffusion liegt zwischen $1,09 \text{ eV}$ und $1,11 \text{ eV}$, [131]. Für die analytischen und numerischen Berechnungen der TTF wird für $E_a = 1,11 \text{ eV}$ angenommen. Bei der Auswertung der TTF -Messwerte muss das veränderte Materialgefüge entsprechend berücksichtigt werden. Somit werden bei deren Betrachtung die abgeleiteten Materialparameter verwendet, insbesondere $\overline{E_{a,2; 63,2\%}} = 2,38 \text{ eV}$.

In Abbildung 6.9 sind die Messwerte mit der analytischen Berechnung der TTF nach Gleichung 3.19 und den numerischen Berechnungen für die unterschiedlichen Temperaturen und Stromdichten verglichen. Bei den Berechnungen werden jeweils die im Versuch gemessenen Eigenerwärmungen ΔT mit berücksichtigt. Das analytische Modell bildet die Messwerte insbesondere bei $T = 160 \text{ °C}$ ab, Abb. 6.9b. Die Tendenzen der TTF -Berechnung bei den höheren Temperaturen können mit dem Modell aufgezeigt werden.

Die numerische Berechnung zeigt mit steigender Stromdichte j bei allen Temperaturen eine geringere Abweichung der TTF -Berechnungen vom Mittelwert der entsprechenden Messwerte, Tabelle 6.4. Für die Berechnung mit $TTF_{n,2}$ nach Gleichung 5.2 unter Berücksichtigung von $c = 2 \cdot a$ liegt die Abweichung im Mittel bei einem Faktor 4,7 und für $TTF_{n,1}$ nach Gleichung 5.1 bei 21,6. Eine numerische Bewertung der mittleren Lebensdauer ist demnach fehlerbehaftet, zeigt jedoch eine Verbesserung gegenüber Literaturwerten, die Abweichungen von Experiment und Simulation in einem Bereich bis zum Faktor $9 \cdot 10^3$ angeben, siehe Kapitel 2.3.2.

Zur Berechnung der TTF ausgehend von der Widerstandsänderung nach Gleichung 3.26 muss zunächst der Widerstandsanstieg bei $t = 0$ bestimmt werden. Die Ableitung der Widerstandskurve zum Zeitpunkt $t = 0$ aus den messtechnisch aufgenommenen Rohdaten führt zu einer stark fehlerbehaftete-

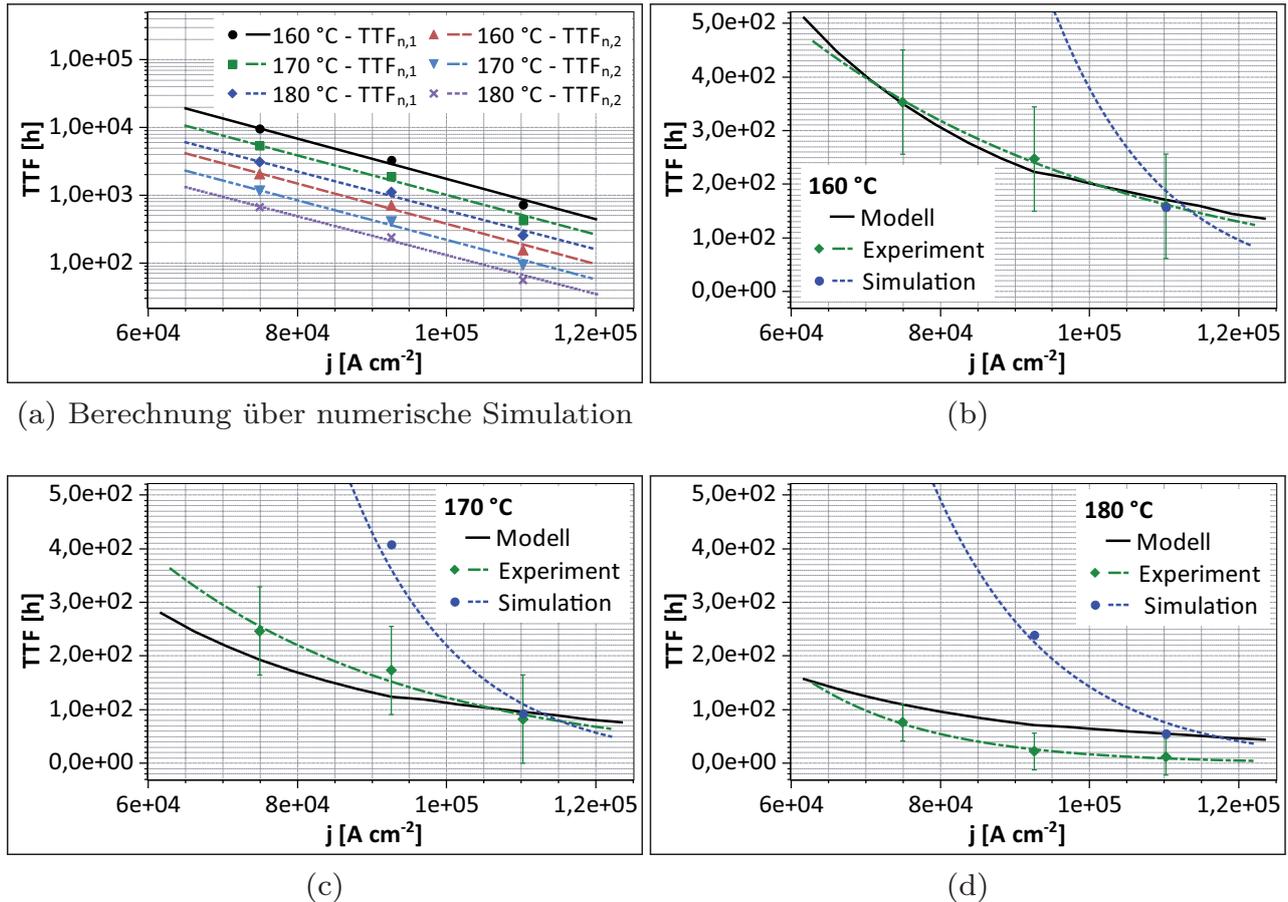


Abbildung 6.9: Vergleich der Messwerte mit den Werten der Simulation und des Modells unter Berücksichtigung der Eigenerwärmung:
 a) Berechnung über die numerische Simulation,
 b)-d) 160 °C, 170 °C, 180 °C mit Ausschnitten der numerischen Berechnung, $TTF_{n,2}$; $E_a = 1,11 \text{ eV}$

ten Berechnung, da bereits leichte Schwankungen des sehr hoch aufgelösten Widerstands zu Fehlern führen. Es wurde deshalb ein Ablauf entwickelt, um Schwankungen im Messsignal zu minimieren und dieses damit sicher auswerten zu können. Die ersten 10 Minuten werden je Widerstandskurve verworfen, da Widerstandsänderungen in diesem Zeitbereich durch das mit der Aufwärmung verbundene thermische Einschwingverhalten der Teststruktur verursacht werden. Wie in Kapitel 2.2.2.2 beschrieben, fällt auch bei den Versuchsreihen in dieser Arbeit zu Beginn nach der Strombelastung der Widerstand durch die Ausrichtung der Körner ab. Es wird eine lineare Anpassungsfunktion für den Zeitbereich ab 60 min bis 50 % des ersten Ausfalls $TTF_{erster \text{ Ausfall}}$ bestimmt. Ein fallender Widerstand, der das Ergebnis verfälschen würde, kann auf diese Weise vermieden werden. Wird der Zeitbereich nicht mit dem beschriebenen

Tabelle 6.4: Abweichung der numerisch berechneten TTF nach $TTF_{n,1}$ und $TTF_{n,2}$ von den Mittelwerten aller Messwerte \overline{TTF} der jeweiligen Stromdichte, $E_a = 1,11 \text{ eV}$, konkave Lotgeometrie

Stromdichte [A/cm^2]	$TTF_{n,1}/\overline{TTF}$ [%]	$TTF_{n,2}/\overline{TTF}$ [%]
$7,7 \cdot 10^4$	29,7	6,5
$9,6 \cdot 10^4$	24,7	5,4
$11,9 \cdot 10^4$	10,4	2,3
Mittelwert	21,6	4,7

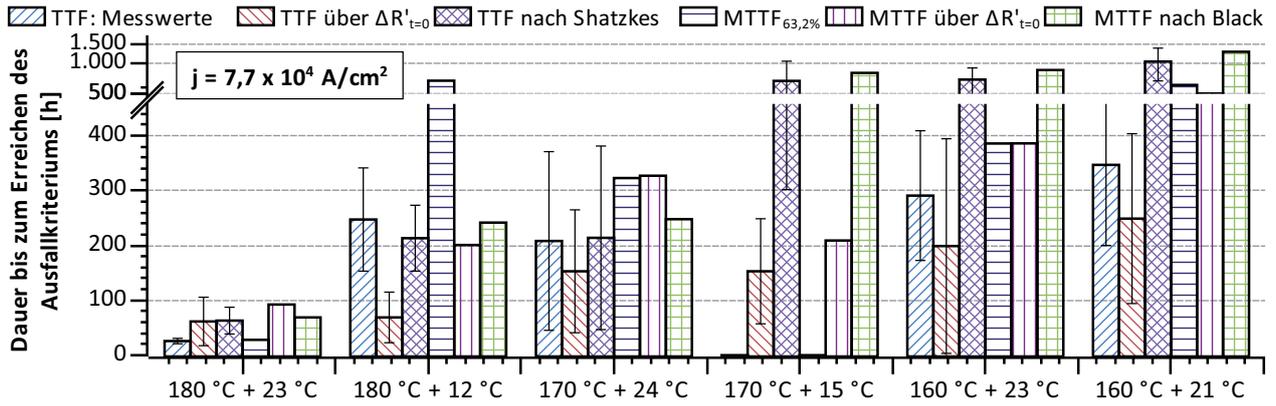
Verfahren ausgewertet, so können sich auch negative Zeiten für die TTF ergeben. Die Steigung der Ausgleichsgeraden wird als $\frac{dR}{dt}|_{t=0}$ bewertet und für die weiteren Berechnungen der TTF genutzt. Zusätzlich werden diese Ausfallzeiten zur Bestimmung einer theoretischen $MTTF_{63,2\%}$ genutzt, um einen Vergleich mit der Black'schen Gleichung durchführen zu können.

Für die Teststruktur zeigen Abbildungen 6.10a, 6.10b, 6.10c einen Vergleich der experimentell ermittelten Mittelwerte der Lebensdauer aller ausgefallenen Strukturen mit den Ergebnissen bei Verwendung der Gleichung des aufgestellten Modells, mit der $MTTF_{63,2\%}$, die aus der Weibull-Verteilung bestimmt wurde, sowie der TTF -Berechnung nach Shatzkes und $MTTF$ -Berechnung nach Black, Kapitel 2.3.1. Der Durchmesser a jeder Lotverbindung wird in den Berechnungen berücksichtigt.

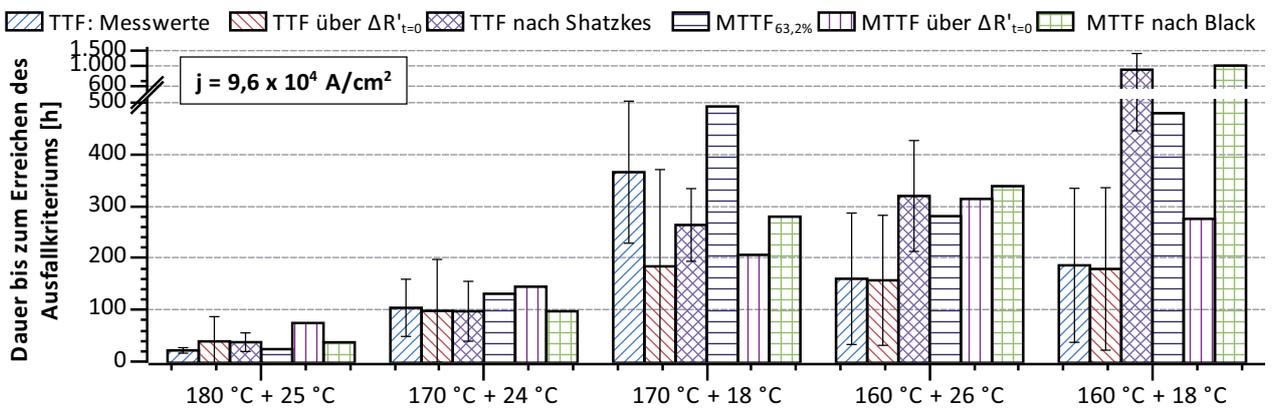
Abbildung 6.11 zeigt die normierten Auswertungen zur Bestimmung der Abweichungen der Modellberechnungen von den Messwerten in zusammengefasster Form. Bei der Berechnung der TTF über den Widerstandsanstieg zeigt sich eine insgesamt verbesserte Abschätzung im Vergleich zur Berechnung nach Shatzkes. Die $MTTF$ -Berechnungen nach Black und über den Widerstandsanstieg liefern vergleichbare Ergebnisse. Eine Überschätzung der Lebensdauer bei Anwendung der Gleichung nach Black insbesondere bei geringer Temperatur deckt sich mit den Erkenntnissen aus Kapitel 2.3.1.

Den Vergleich der gemessenen Widerstandskurven mit den theoretisch berechneten Werten zeigt Abbildung 6.12. Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Gleichung 3.25 zur Bestimmung des ΔR wird mit der Gleichung 2.63 nach Puttlitz für zwei Messwerte bei unterschiedlichen Stromdichten verglichen.

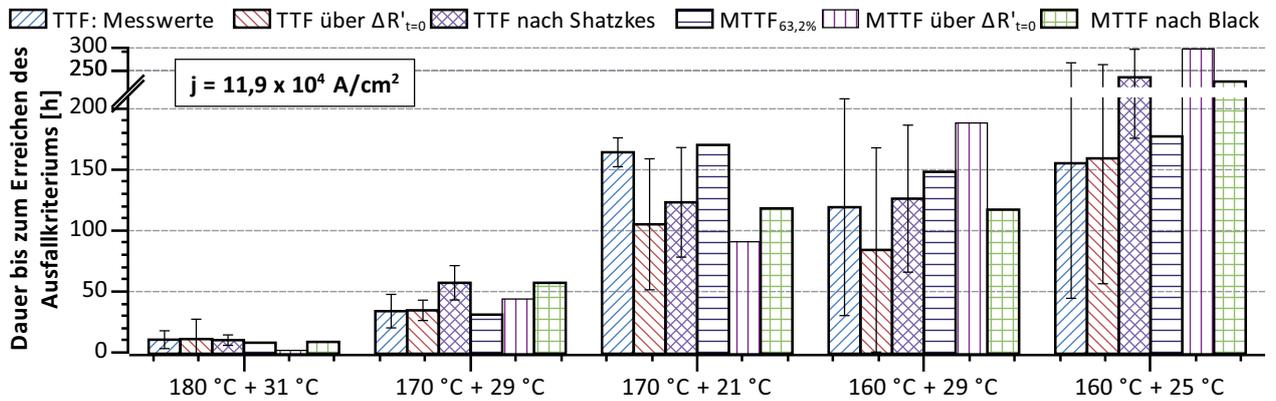
Mit der Gleichung nach Puttlitz und den Proportionalitätsfaktoren α_A mit den Werten $\alpha_A = 0,32$ bzw. $\alpha_A = 0,24$ kann die Messkurve für eine Wider-



(a) $j = 7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, Proben Nr. von links: 51 / 50 / 52 / 69 / 38 / 67



(b) $j = 9,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, Proben Nr. von links: 51 / 52 / 69 / 38 / 67



(c) $j = 11,9 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, Proben Nr. von links: 51 / 52 / 69 / 38 / 67

Abbildung 6.10: Konkave Lotgeometrie: Vergleich der experimentell bestimmten Lebensdauer mit der $MTTF_{63,2\%}$, den Ergebnissen bei Verwendung der Gleichung des aufgestellten Modells sowie den Berechnungen nach Black und Shatzkes für die drei Stufen der Stromdichte j und die jeweiligen Temperaturen inkl. ΔT :

- a) $j = 7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, b) $j = 9,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$,
- c) $j = 11,9 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$

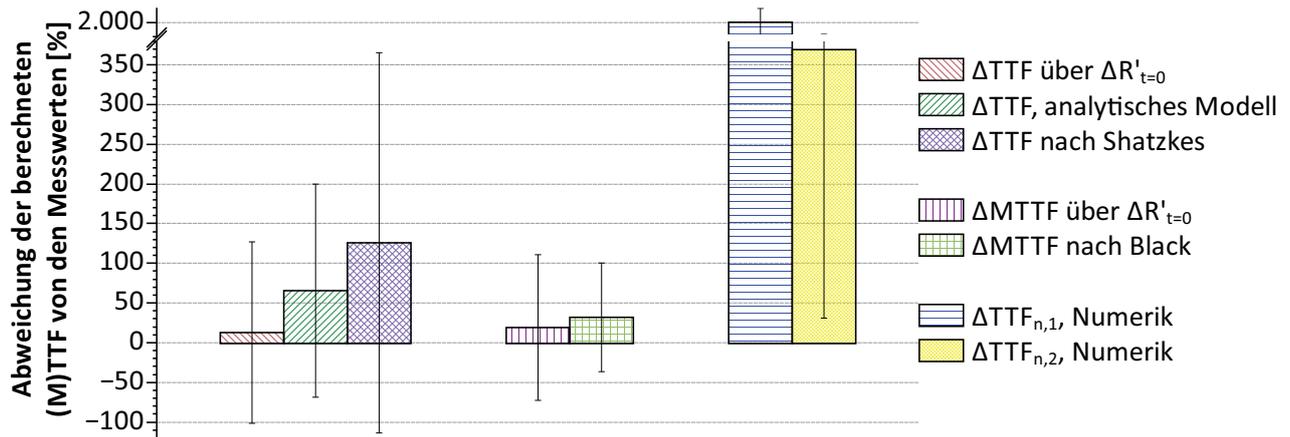


Abbildung 6.11: Prozentuale Abweichungen aller berechneten TTF und $MTTF$ von den ausgewerteten 144 Messwerten, konkave Lotgeometrie

standsänderung bis 50 % abgebildet werden. Der Ausfallzeitpunkt wird für eine Widerstandsänderung von 300 % bestimmt. Die Ausfallzeit kann demnach nur stark fehlerbehaftet bestimmt werden.

Mit dem neu entwickelten Modell kann die Messkurve zu Beginn der Widerstandsänderung ähnlich dem Modell nach Puttlitz abgebildet werden. Zudem wird der exponentiell ansteigende Widerstandsanstieg zum TTF -Zeitpunkt wiedergegeben. Zu berücksichtigen ist, dass bei diesem Modell der gemessene TTF -Zeitpunkt entsprechend Gleichung 3.25 vorgegeben wird, sodass dieser

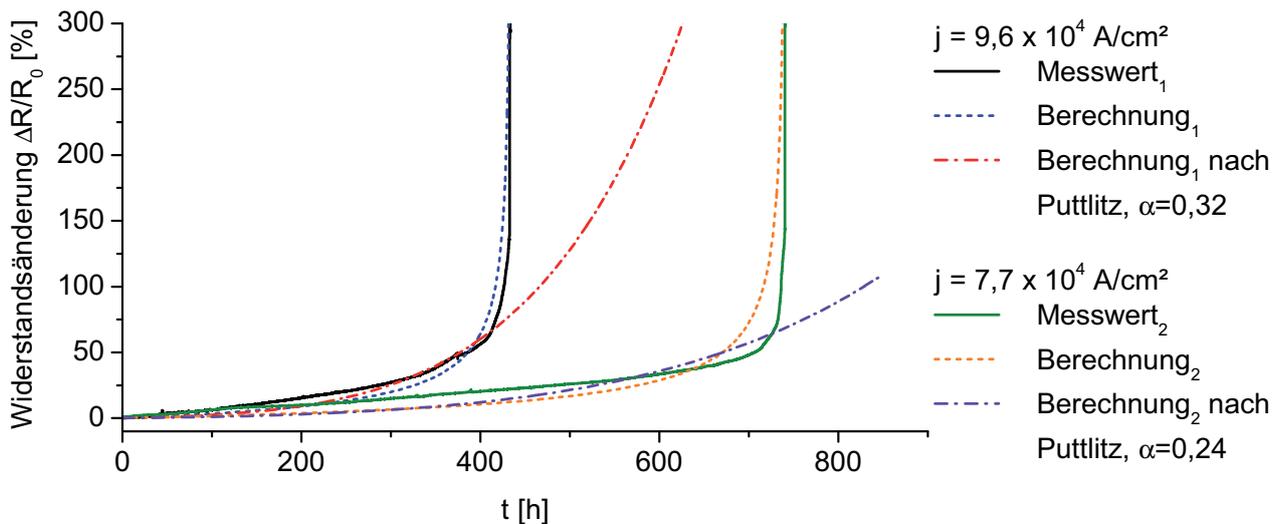


Abbildung 6.12: Vergleich der Widerstandskurven, $T = 160 \text{ }^\circ\text{C}$: Messwert, Berechnung nach Gleichung 3.23 und Literaturgleichung nach Puttlitz, Gleichung 2.63

Wert im Diagramm zwischen der Berechnung und dem Experiment übereinstimmen muss. Der ausgeprägte Kurvenverlauf der zunehmenden Widerstandsänderung ergibt sich jedoch direkt aus dem physikalischen Modell. Es zeigt sich eine insgesamt gute Approximation zwischen den Messwerten und dem neu entwickelten Modell.

6.2 Vergleichende Untersuchung: Indikatorstruktur mit konvexer Lotgeometrie

6.2.1 Prozessschritte und numerische Verifikation der Randbedingungen

Zur Untersuchung des Einflusses von Elektromigration an den Standard-Lotgeometrien wird die in Kapitel 5.1 beschriebene, optimierte Teststruktur mit nicht gezogenen, d.h. konvexen Lotverbindungen untersucht. Alle Werkstoffe der UBM, Ankontaktierungen, Substrate und des Lotwerkstoffs sind identisch zur diskutierten Teststruktur mit verjüngter Geometrie.

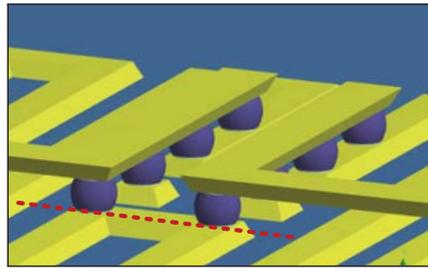
Verglichen mit den bereits diskutierten Prozessschritten nach Abbildung 5.9 wird beim Aufbau der Strukturen lediglich der finale Umschmelz- und Ziehprozess nicht ausgeführt.

Die Simulationsergebnisse der kompletten Struktur für eine Stromstärke von 2 A und eine Temperatur von $T = 160 \text{ }^\circ\text{C}$ sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Es werden die gleichen Materialwerte wie in Kapitel 4.2.2, Tabelle 4.1 verwendet.

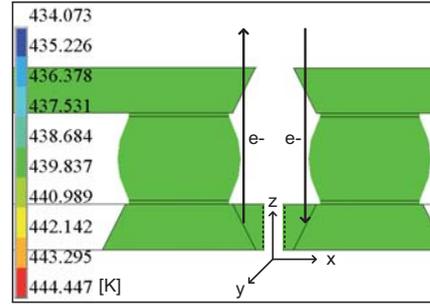
Für die Stromdichte \vec{j} ergibt sich im Übergangsbereich von Lotverbindung zu Ankontaktierung eine lokale Zunahme von 70 %, Abb. 6.13c. Die Temperaturerhöhung beträgt ca. $5 \text{ }^\circ\text{C}$ und ist homogen verteilt im Bereich der Lotverbindung und Leiterbahnen, Abb. 6.13b. Für den Temperaturgradienten ∇T zeigt sich ein Wert $< 40 \text{ K/cm}$, Abb. 6.13f. Zudem liegt das Verhältnis der Materialflussdichten \vec{J}_{EM} zu \vec{J}_{TM} bei $\approx 2,5 \cdot 10^3$, Abb. 6.13d und 6.13g, und das derer Divergenzen bei ≈ 110 , sodass der Fehlermechanismus Thermomigration theoretisch ausgeschlossen werden kann, Abb. 6.13e und 6.13h.

Abhängig von der Belastungsrichtung sollte demnach der Ausfallort mit maximaler Divergenz der Flussdichten im jeweiligen Übergangsbereich der Lotverbindung zu den Leiterbahnen liegen.

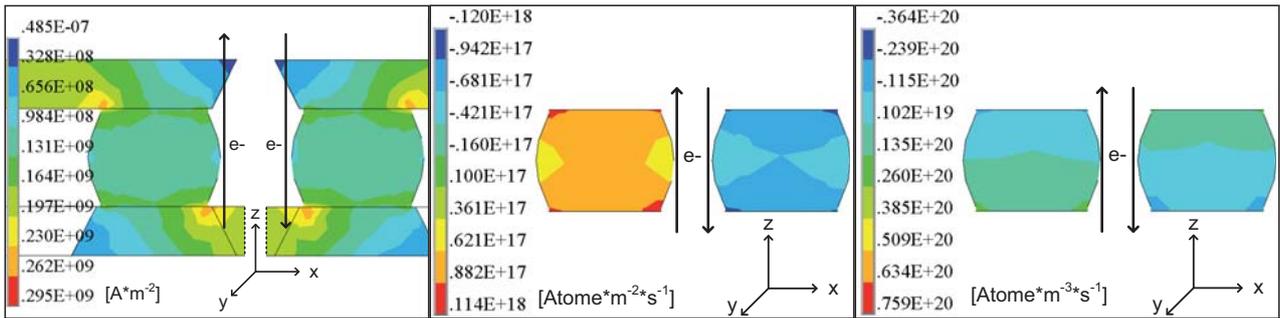
Die Berechnung der *TTF* auf Basis der Simulationswerte erfolgt im Kapitel der Auswertung, um die Messwerte direkt mit den Modellwerten vergleichen zu können.



(a) Betrachtungsebene



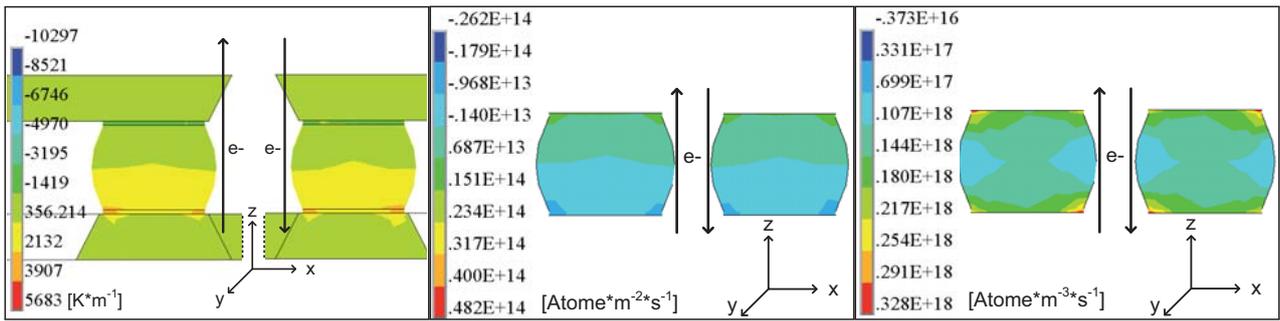
(b) Temperaturverteilung



(c) Stromdichteverteilung

(d) J_{EM}

(e) $\text{div}(J_{EM})$



(f) ∇T

(g) J_{TM}

(h) $\text{div}(J_{TM})$

Abbildung 6.13: Numerische Berechnung der EM-Bump-Reihe mit $I = 2 \text{ A}$, $T = 160 \text{ }^\circ\text{C}$: b) Temperaturverteilung, c) Stromdichteverteilung, d) Materialflussdichte durch EM, e) Divergenz der Materialflussdichte durch EM, f) Temperaturgradient, g) Materialflussdichte durch TM, h) Divergenz der Materialflussdichte durch TM

Die TM-Bumps zeigen ein gleiches Temperaturniveau wie die EM-Bumps. Der Temperaturgradient liegt bei $< 13 \text{ K/cm}$, sodass diese Lotverbindungen als Referenz genutzt werden können, Abb. 6.14.

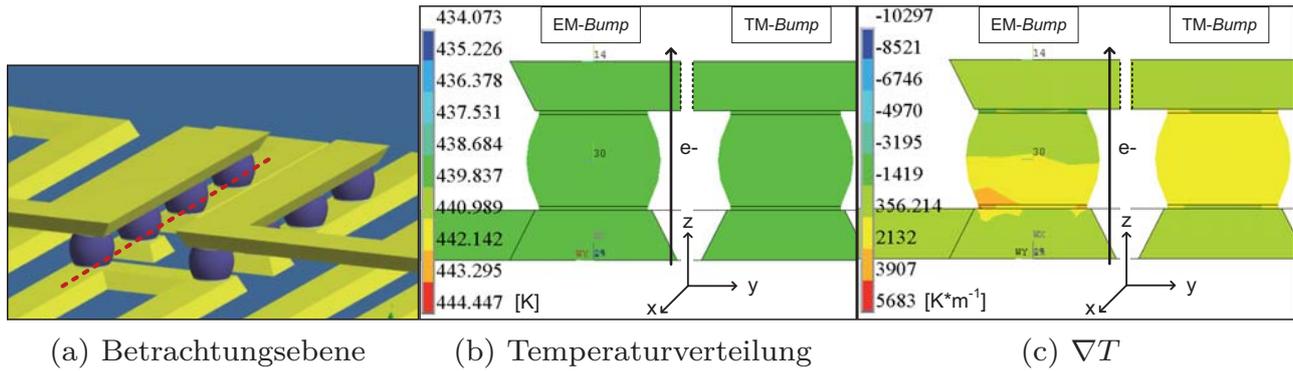


Abbildung 6.14: Numerische Berechnung der *TM-Bump*-Reihe, konvex:
b) Temperaturverteilung, c) Temperaturgradient

6.2.2 Versuchsplanung der vergleichenden Untersuchungen

Die konvexe Geometrie dient dem Vergleich mit der gezogenen, konkaven Struktur. Dabei wird der Einfluss der Stromdichte bei der konvexen Teststruktur nur auf zwei Stufen und die Temperatur auf drei Stufen untersucht.

Die Stromdichte ergibt sich aus der maximalen Stromstärke von 2 A und dem Übergang von Lotverbindung zu Leiterbahn. Höhe und Durchmesser der Öffnung des Lötstopplacks auf der Substratseite beeinflussen diesen Übergang, dessen Durchmesser bei $130 \mu\text{m}$ liegt. Die maximale Zielstromdichte ergibt sich zu $1,5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Die Standardabweichung σ_{sa} des Durchmessers liegt bei maximal 5 %, die der Stromdichte bei 10 %. Der Stufenabstand ergibt sich

Tabelle 6.5: Versuchsplan konvexe Lotgeometrie, optimierte Teststruktur

Proben-Nr.	$T_{Ofen} [^{\circ}\text{C}]$	Stromstärke [A]	Stromdichte Übergang Lot- Ankontaktierung [A/cm^2]
63	180	2,0	$1,5 \cdot 10^4$
19	180	1,6	$1,2 \cdot 10^4$
37	170	2,0	$1,5 \cdot 10^4$
66	170	1,6	$1,2 \cdot 10^4$
54	160	2,0	$1,5 \cdot 10^4$
68	160	1,6	$1,2 \cdot 10^4$

demnach zu $6 \cdot \sigma_{sa} \approx 0,9 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$. Stromdichten kleiner 10^4 A/cm^2 liegen außerhalb des erwarteten Schwellwertes der Elektromigration. Es wird als zweite Stromdichte deshalb eine um 20 % reduzierte Stromdichte von $1,2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ angesetzt, Tabelle 6.5.

6.2.3 Ausfallcharakteristik und Bestimmung der Lebensdauer

Den metallurgisch feinkristallinen Ausgangszustand der konvexen Lotverbindungen zeigt Abbildung 6.15 im Querschliff.

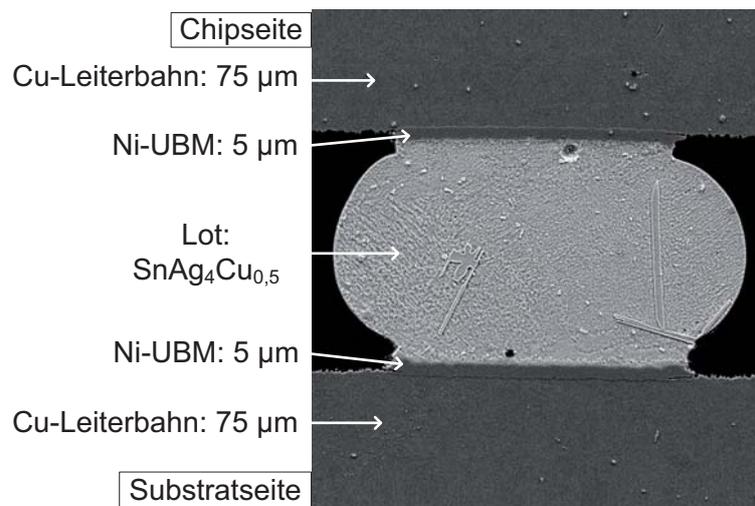


Abbildung 6.15: Konvexe Lotverbindung: Ausgangszustand mit Details der Materialien, REM-Aufnahme eines Querschliffs

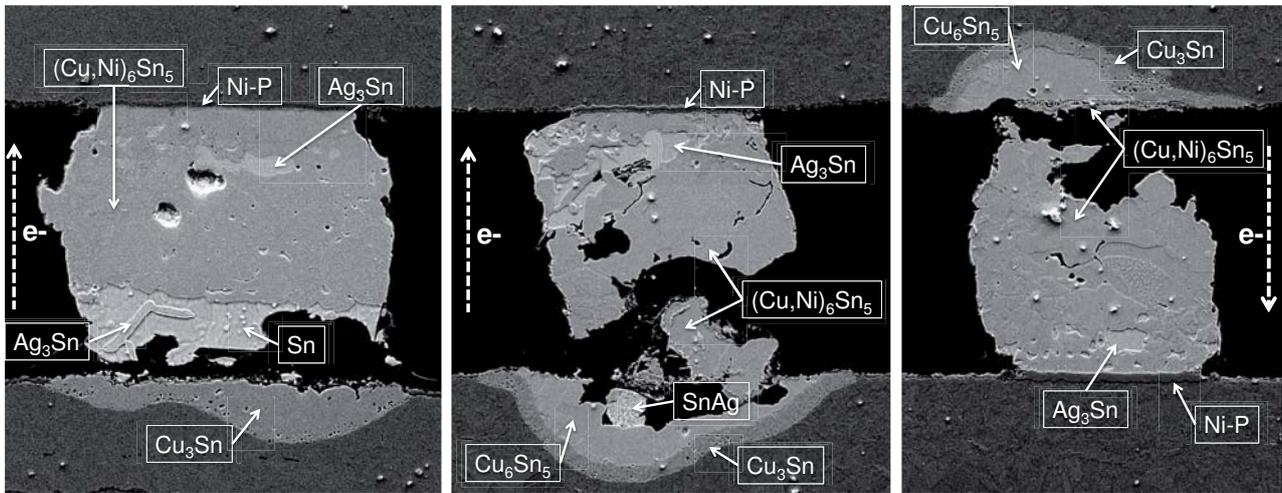
Ähnlich der konkaven Lotgeometrie zeigt sich auch bei den konvexen Lotverbindungen ein von der Strombelastung richtungsabhängiges Ausfallverhalten. Die Poren bilden sich jeweils im Bereich des Materialübergangs von Lot zu Ankontaktierung, Abb. 6.16.

Der Prozess der Elektromigration unterstützt die Phasenbildung. Es wird insbesondere der Fehlermodus 2 beobachtet, d.h. Nickel diffundiert von den Ankontaktierungen durch den Lotwerkstoff und führt zu einer Auflösung der UBM und IMC. Durch die Leiterbahnen mit großem Querschnitt auf Chip- und Substratseite zeigt sich kein von lokalen Stromdichtemaxima abhängiges Ausfallverhalten.

Detailbilder der bei 180 °C ausgelagerten Referenz-*Bumps* zeigt Abbildung 6.17. Die dargestellten TM-*Bumps* liegen entsprechen den Experimenten der verjüngten Lotverbindungen in einem Abstand von 500 µm von den bestromten *Bumps* auf dem gleichen Substrat. An diesen lassen sich zwei Effekte zeigen. Fällt der bestromte *Bump* aus, fließt der Strom automatisch über die



(a) Übersicht der angeschliffenen Ebene eines Chips



(b) Details ausgefallener Lotverbindungen

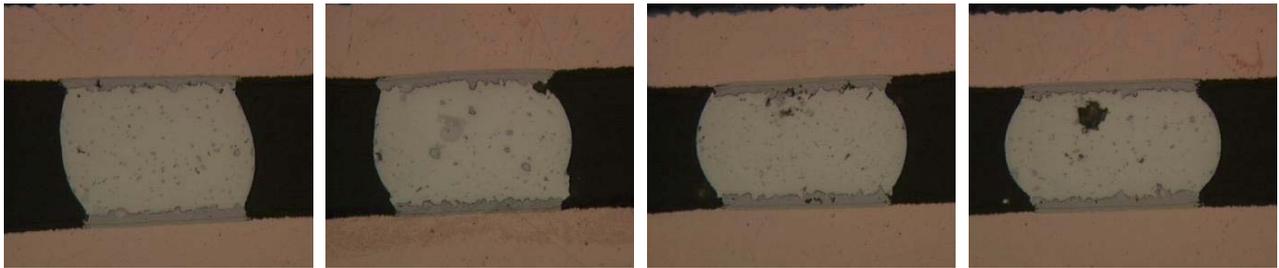
Abbildung 6.16: Ausfallcharakteristik: konvexe Lotverbindung, erweiterte Teststruktur, $T_{Ofen} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$, links: $j = 1,2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, Mitte und rechts: $j = 1,5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$

hinteren Messtechnik-*Bumps*, vgl. Kapitel 5.1. Der Thermomigrations-*Bump* neben dem EM-*Bump* ist nur über die chipseitige Cu-Leiterbahn kontaktiert. Es fließt zu keinem Zeitpunkt ein Strom über diese TM-*Bumps*. Dies geschieht lediglich über die kontaktierte, chipseitige Leiterbahn, wenn der EM-*Bump* ausfällt. Nur dann zeigt sich in dem TM-*Bump* ein Auflösen des Ni/Cu. Fällt der EM-*Bump* nicht aus, fließt oberhalb des EM-*Bumps* kein Strom in der Cu-Leiterbahn und die Ni-UBM wird metallurgisch nicht verändert. Die Simulation zeigt, dass sich die Temperatur in dem TM-*Bump* auch bei ausgefallenem EM-*Bump* nur um $< 0,4 \text{ }^\circ\text{C}$ verändert. Der Temperaturgradient ist deutlich kleiner als 1000 K/cm . Das Auflösen des Ni wird demzufolge durch den oberhalb fließenden Strom eingeleitet.

Die statistische Analyse der experimentell ermittelten Werte erfolgt analog zur Auswertung der Lotverbindungen mit verjüngter Geometrie über die Weibull-Verteilungsfunktion nach Gleichung A.1.

Die zur Bestimmung der Aktivierungsenergie E_a und des Exponenten der Stromdichteabhängigkeit n grafisch aufgearbeiteten Messkurven der Ausfallverteilungen befinden sich im Anhang A. Die Statistik beruht auf 127 von 219 ausgewerteten Messwerten.

Der Mittelwert für den Exponenten n über die sechs vermessenen Teststruk-



(a) Der zugehörige EM-Bump ist nicht vor Versuchsende ausgefallen

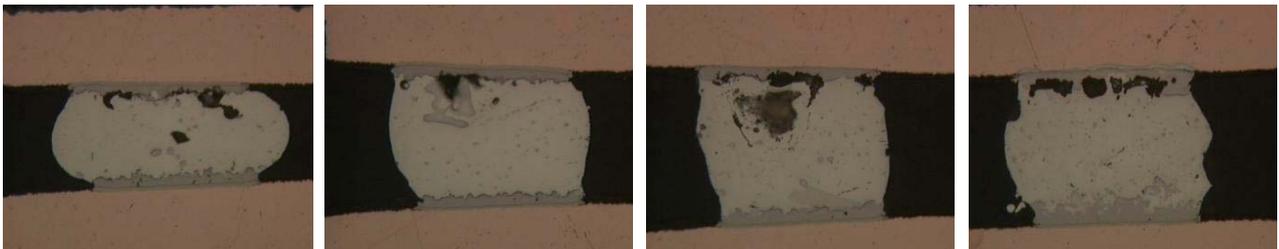
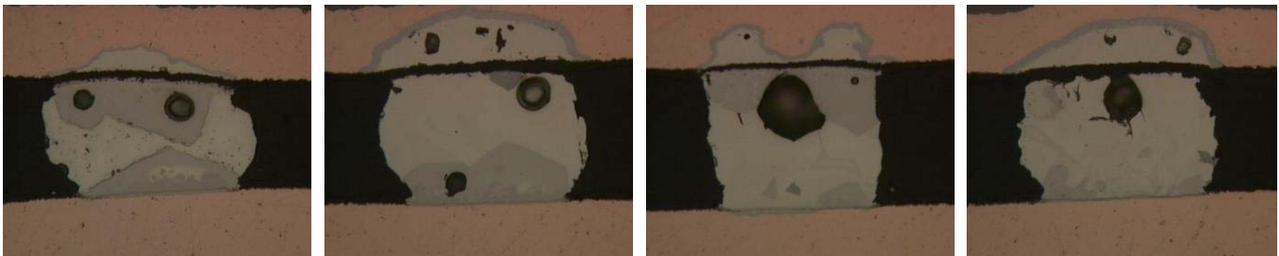
(b) Der zugehörige EM-Bump ist $< 100 h$ vor Versuchsende ausgefallen(c) Der zugehörige EM-Bump ist $> 100 h$ vor Versuchsende ausgefallen

Abbildung 6.17: Referenz-Bumps zur Ermittlung des Einflusses der Temperatur, $T = 180 \text{ }^\circ\text{C}$: a) die vorgelagerten EM-Bumps sind nicht ausgefallen, b) die EM-Bumps sind innerhalb von max. $100 h$ vor dem Versuchsende ausgefallen, c) die EM-Bumps sind innerhalb einer Zeit $> 100 h$ vor dem Versuchsende ausgefallen

turen liegt bei 4,70, Tabelle 6.6.

Tabelle 6.6: Gemessene Werte für den Exponenten n , konvexe Lotgeometrie

T [$^\circ\text{C}$]	Exponent n	Ausfälle / Gesamtzahl
180	4,71	47 / 60
170	4,38	54 / 80
160	5,02	26 / 79
Mittelwert	4,70	

In Tabelle 6.7 sind die aus dem Experiment abgeleiteten Statistiken der $MTTF_{63,2\%}$ für die unterschiedlichen Belastungen zusammengefasst.

Tabelle 6.7: Statistische Auswertung der Temperaturen, Messwerte und $MTTF$ -Zeiten zur Berechnung der Aktivierungsenergie, konvexe Lotgeometrie

Proben-Nr.	\bar{j} [$10^4 \frac{A}{cm^2}$]	$T + \Delta T$ [°C]	Messwerte	β	$MTTF_{63,2\%}$ [h]
63	1,5	180 + 8	38 / 40	3,9	256
19	1,2	180 + 6	9 / 20	1,9	733
37	1,5	174 + 8	26 / 40	2,7	388
66	1,2	174 + 6	28 / 40	2,5	1019
54	1,5	160 + 8	21 / 39	1,6	956
68	1,2	160 + 6	5 / 40	1,5	2932

Als Mittelwert der Aktivierungsenergien für die unterschiedlichen statistischen Betrachtungen ergibt sich für die Standard-Betrachtung, nach der 63,2 % der Teststrukturen ausgefallen sind, ein $E_a = 1,18 \text{ eV}$ und für $MTTF_{10\%}$ ein Wert von $0,66 \text{ eV}$, Tabelle 6.8.

Die Ableitung der zu berücksichtigenden Porenhöhe c ergibt einen Wert zwischen der Abmessung der Pore von $14 \mu m$ und der *Bump*-Höhe von $100 \mu m$, Abb. 6.18. Der Modellparameter des Durchmessers a entspricht der UBM-Öffnung von $130 \mu m$.

Für den Vorfaktor A der Black'schen Gleichung ergibt sich ein Mittelwert über alle $MTTF_{63,2\%}$ -Messwerte von $A = 1,75 \cdot 10^{10} \text{ h} \cdot (A/cm^2)^{4,70}$ mit einer Standardabweichung σ_{sa} von $2,05 \cdot 10^9 \text{ h} \cdot (A/cm^2)^{4,70}$.

Tabelle 6.8: Mittelwerte der Aktivierungsenergie E_a für die unterschiedlichen statistischen Betrachtungen der $MTTF$, konvexe Lotgeometrie

Betrachtete Statistik	Stromdichte \bar{j} [$10^4 \frac{A}{cm^2}$]		Mittelwert
	1,2	1,5	
$E_{a_{63,2\%}}$ [eV]	1,22	1,15	$1,18 \pm 0,05$
$E_{a_{10\%}}$ [eV]	0,87	0,48	$0,66 \pm 0,30$
$E_{a_{50\%}}$ [eV]	1,16	1,03	$1,10 \pm 0,07$

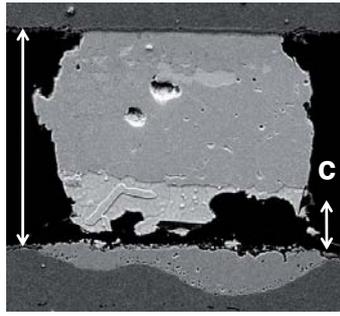


Abbildung 6.18: Ableitung der sich ausbildenden Porenhöhe c , konvexe Lotgeometrie im Querschliff, REM-Aufnahme

Für den Vorfaktor B der Formel nach Shatzkes ergibt sich ein Mittelwert von $B = 1,89 \cdot 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{h}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$ mit einer Standardabweichung σ_{sa} von $8,21 \cdot 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{h}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K}^2)$.

6.2.4 Vergleich der experimentell ermittelten Werte mit den Modellen

Den Vergleich der TFF von Experiment, analytischem Modell und Simulation für die unterschiedlichen Stromdichten und Temperaturen zeigen die Abbildungen 6.19 und 6.20. Die Eigenerwärmungen innerhalb der konvexen Lotverbindungen werden bei der Auswertung berücksichtigt. Entsprechend Kapitel 6.1.3 wird die Aktivierungsenergie für die analytische und numerische Berechnung der TFF angepasst. Für eine Aktivierungsenergie E_a von $1,00 \text{ eV}$ im Modell

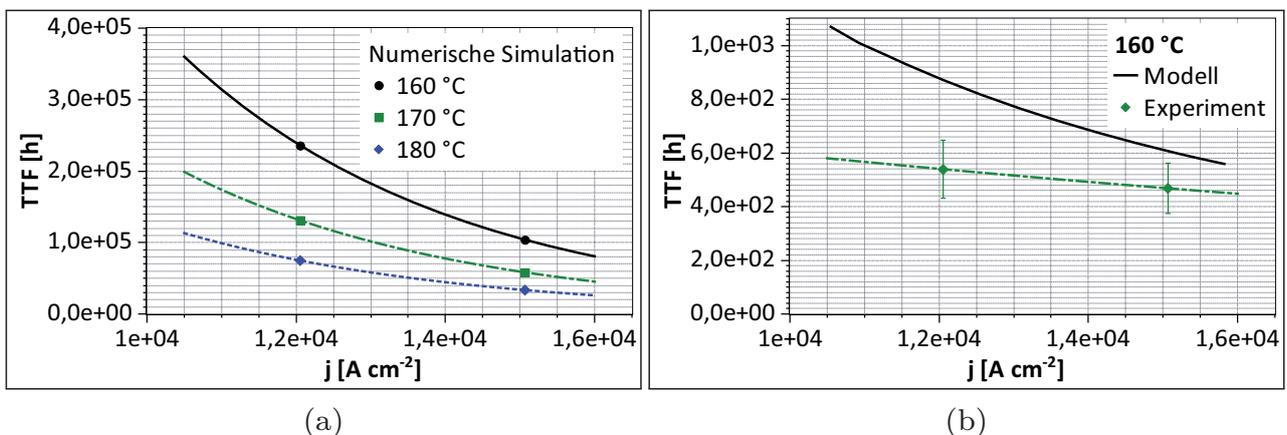


Abbildung 6.19: Konvexe Lotgeometrie: Vergleich der Messwerte mit den Werten der Simulation und des Modells: a) Numerische Berechnung; b) 160 °C ; $E_a = 1,00 \text{ eV}$

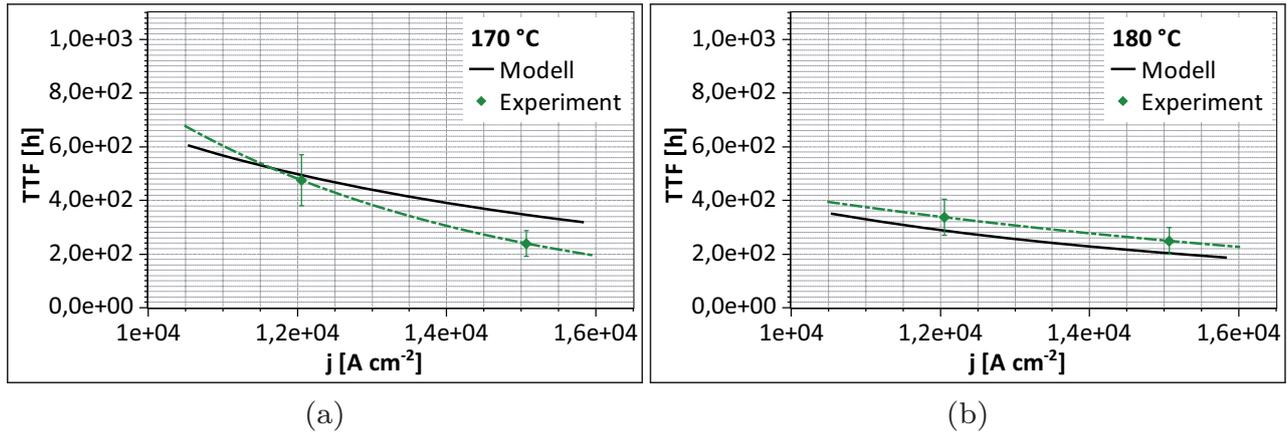


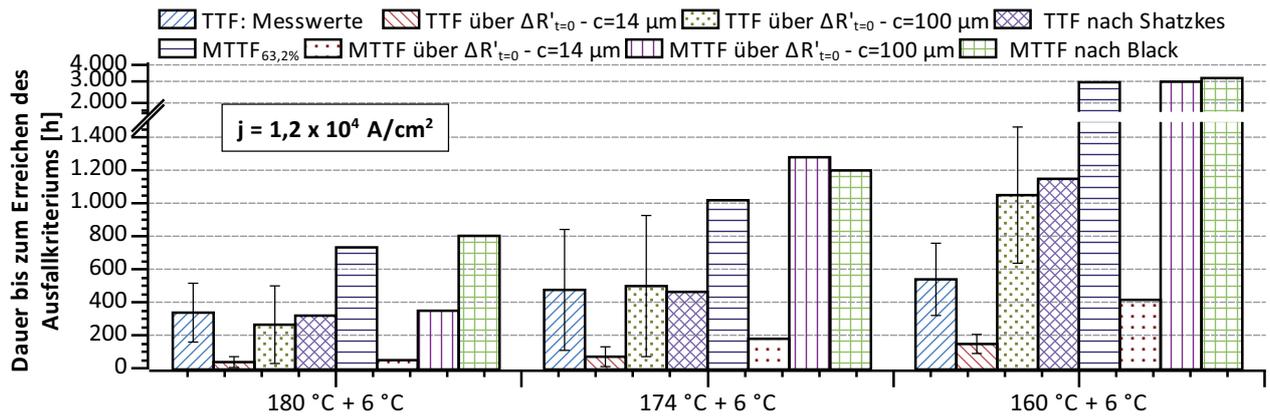
Abbildung 6.20: Konvexe Lotgeometrie: Vergleich der Messwerte mit den Werten des Modells: a) 170 °C, b) 180 °C; $E_a = 1,00$ eV

können die TTF -Messwerte mit dem Modell berechnet werden. Bei Berücksichtigung der theoretischen Aktivierungsenergie für die Zinn-Eigendiffusion $E_a = 1,11$ eV, vgl. Kapitel 6.1.3, liegen die theoretisch und experimentell bestimmten Ausfallzeiten etwa zwei Größenordnungen weiter auseinander.

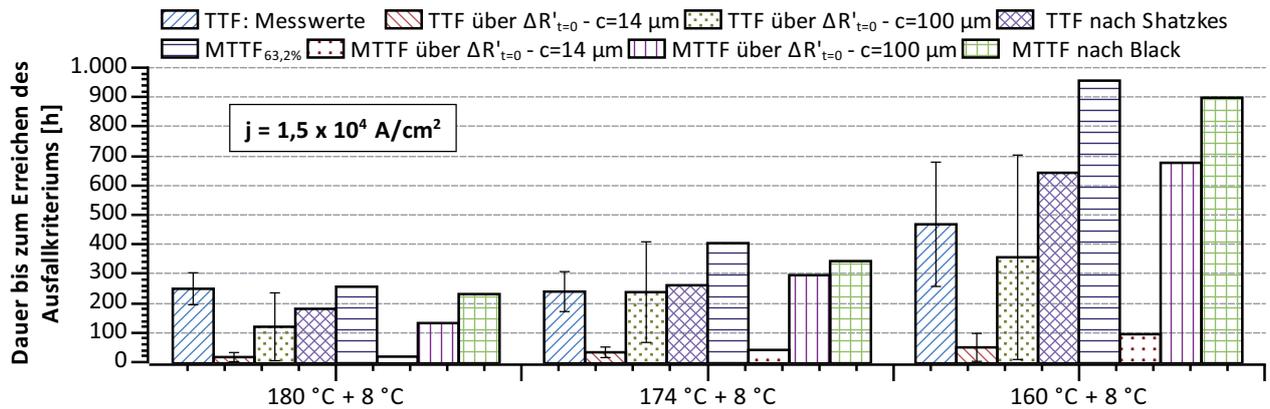
Die numerische Berechnung der TTF mit dem Ansatz $TTF_{n,1}$ der konkaven Lotverbindung, Gleichung 5.1, zeigt eine Abweichung von den Messwerten in einem Bereich von zwei bis drei Größenordnungen, Abb. 6.19a. Bei Berücksichtigung der $TTF_{n,2}$ nach Gleichung 5.2 muss die Randbedingung $c = 2 \cdot a$, die für die verjüngte Lotgeometrie gilt, abgeändert werden zu $c = 14 \mu\text{m} \approx 0,1 \cdot a$. Für das Verhältnis der numerisch berechneten TTF gilt dann $TTF_{n,1} = \ln(10)/10 \cdot TTF_{n,2} = 0,23 \cdot TTF_{n,2}$, d.h. die Abweichung von den Messwerten wäre dementsprechend höher. Für die konvexe Lotgeometrie ist die numerische Bewertung der Lebensdauer demnach stark fehlerbehaftet. Es zeigt sich, dass das für die verjüngte Lotgeometrie entwickelte Modell nur bedingt auf die Standard-Lotgeometrie angewandt werden kann. Bei der konvexen Geometrie müssten die überlagerten Effekte, die bei der verjüngten Struktur minimiert werden, zusätzlich im Modell berücksichtigt werden.

Die Modelle zur Bestimmung der TTF aus dem Widerstandsanstieg im Vergleich mit den experimentellen Messwerten für die konvexe Lotgeometrie zeigen die Abbildungen 6.21a und 6.21b entsprechend der Auswertung der konkaven Lotgeometrie.

Eine zusammengefasste Darstellung der Abweichungen der berechneten TTF und $MTTF$ von den Messwerten zeigt Abbildung 6.22. Mit dem Modell nach Kapitel 3.2 ergibt sich eine Abweichung der TTF bei Anwendung der Porenweite $c = 14 \mu\text{m}$ von ca. 80 %. Nach Anpassung von $c_{max} = 100 \mu\text{m}$ kann die pro-



(a) $j = 1,2 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, Proben-Nr. von links: 19 / 66 / 68



(b) $j = 1,5 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$, Proben-Nr. von links: 63 / 37 / 54

Abbildung 6.21: Konvexe Lotgeometrie: Vergleich der experimentell bestimmten Lebensdauer mit der $MTTF_{63,2\%}$, den Ergebnissen bei Verwendung der Gleichung des aufgestellten Modells sowie den Berechnungen nach Black und Shatzkes

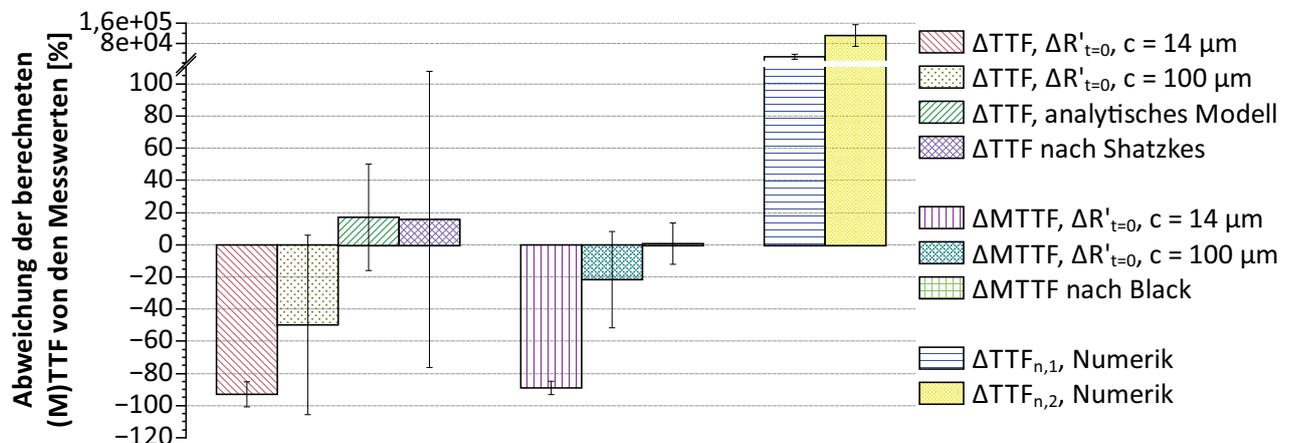


Abbildung 6.22: Prozentuale Abweichungen der berechneten $(M)TTF$ von den ausgewerteten 119 Messwerten, konvexe Lotgeometrie

zentuale Abweichung auf einen Wert $< 50\%$ reduziert werden. $c_{max} = 100\ \mu m$ entspricht der Gesamthöhe der Lotverbindung. Für die neue Modellvorstellung müssen demnach nicht praxisnahe Parameter verwendet werden, um eine realitätsnahe TTF für die konvexe Lotgeometrie bestimmen zu können. Die Gleichung nach Shatzkes zeigt bei größerer Streuung eine geringere Überschätzung von ca. 20% .

Entsprechend der TTF -Berechnung verhält sich die Abweichung bei der Betrachtung der $MTTF$ mit der Modellvorstellung bei separierten Effekten. Die Anwendung der Black'schen Gleichung zur Berechnung der $MTTF$ zeigt hingegen eine Abweichung vom Messwert kleiner 2% mit einer Standardabweichung von 15% und gibt die Lebensdauer für die konvexe Lotgeometrie am besten wieder, Abb. 6.22.

6.3 Zusammenfassung der Ergebnisse von Modell und Experiment

Die Experimente zur Untersuchung der Elektromigration im reinen Lotwerkstoff von Lotverbindungen wurden an neuartigen Teststrukturen durchgeführt. Überlagerte Effekte werden durch die lokale Ausfallregion, die sich mittig in der Lotverbindung als Verjüngung ausbildet, minimiert. Insbesondere die Einflüsse der UBM, Materialübergänge und IMC können in den Untersuchungen vernachlässigt werden. Die Teststruktur wurde mit einem optimierten Temperaturmanagement konzipiert. Dabei werden sowohl die Joule'sche Erwärmung als auch der Fehlermechanismus Thermomigration stark reduziert. Es zeigt sich, dass bei Minimierung der Temperatureffekte im *Flip-Chip*-Aufbau sehr hohe Stromdichten im Bereich von $7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$ nötig sind, um einen Ausfall durch Elektromigration zu provozieren. Zusätzlich muss eine entsprechend hohe Versuchstemperatur gewählt werden. Die vergleichenden Experimente an den konvexen Lotverbindungen zeigen eine Porenbildung durch Elektromigration im Bereich der UBM. Die Stromdichte innerhalb des Übergangsbereichs Lotverbindung zu Ankontaktierung ist bei den konkaven im Vergleich zu den konvexen Lotverbindungen um 50 % reduziert. Würde insbesondere der Einfluss der UBM die Lebensdauer einer Lotverbindung bestimmen, so müsste sich ein ähnliches Ausfallverhalten beider Lotgeometrien im Bereich der UBM ergeben. Die konkave Geometrie würde dann aufgrund der geringeren Stromdichte eine längere *TTF* aufweisen. Die *TTF* der konkaven Lotverbindung ist bei geringerer Stromdichte im Übergangsbereich der UBM jedoch kürzer, sodass sich der Ausfall allein durch die Porenbildung im Lotmaterial der Verjüngung ergibt.

Die Verifizierung der in dieser Arbeit hergeleiteten *TTF*-Berechnungen wurde eingehend diskutiert. Zusammenfassend zeigt sich, dass Ausgangs- und Endzustand der Teststruktur in der Auswertung separat berücksichtigt werden müssen. Analytisches und numerisches Modell bauen auf den Randbedingungen des Ausgangszustands auf, sodass die entsprechenden Parameter zur Bewertung der Lebensdauer anzuwenden sind. Die Messwerte und auf diesen aufbauende Auswertungen berücksichtigen hingegen die zunehmenden, aus der Kornrotation und Bambus-Struktur resultierenden Effekte. Bei diesen Auswertungen müssen demnach die messtechnisch erfassten Parameter in den Berechnungen verwendet werden. In Tabelle 6.9 sind die Modellwerte zusammengefasst und mit Literaturwerten verglichen.

Das Modell wurde für die Randbedingung aufgestellt, dass lediglich der Effekt der Elektromigration zu einer Porenbildung führt. Die berücksichtigte

Tabelle 6.9: Zusammenfassung der Modell-, Mess- und Literaturwerte für die Untersuchungen an konkaven und konvexen Lotverbindungen

	Modell / Simulation	Messwert	Modell / Simulation	Messwert	Literatur- wert*
Geometrie	konkav	konkav	konvex	konvex	konvex
E_a [eV]	1,11	1,71 - 2,38	1,00	1,18	1,28
Exponent n von j	1,00	2,47	1,00	4,70	2,75
A-Faktor, Black		$7,34 \cdot 10^{-12}$ $(\frac{A}{cm^2})^{2,47} h$		$1,75 \cdot 10^{10}$ $(\frac{A}{cm^2})^{4,70} h$	$7,86 \cdot 10^5$ $(\frac{A}{cm^2})^{2,75} h$
B-Faktor, Shatzkes		$9,58 \cdot 10^{-20}$ $(\frac{A \cdot h}{cm^2 \cdot K^2})$		$1,89 \cdot 10^{-8}$ $(\frac{A \cdot h}{cm^2 \cdot K^2})$	

*: Mittelwertbildung nach Tabelle 2.1

Theorie der EM baut auf einem einfachen, ballistischen Modell des Impulsübertrags von Leitungselektronen auf thermisch aktivierte Ione auf. Es werden nicht die im Experiment nachgewiesenen Einflüsse der Kornrotation und Gefügeveränderungen mit betrachtet. Diese führen demnach bei zunehmend miniaturisierten Lotverbindungen zu einem signifikanten Anstieg der Aktivierungsenergie für das Auftreten der EM. Der Diffusionsmechanismus kann auf eine Volumendiffusion zurückgeführt werden.

Zudem berücksichtigt das analytische Modell die Stromdichteabhängigkeit bei der Berechnung der TTF nur direkt antiproportional. Mit steigender Stromdichte j nimmt die Erwärmung ΔT der Teststruktur zu und führt somit indirekt zu einer exponentiellen Abhängigkeit der TTF von j . Es zeigt sich, dass die Messwerte diese Abhängigkeit sowohl für die konkaven als auch konvexen Lotgeometrien bestätigen. In der Berechnung der TTF wurde der bei Versuchsbeginn gemessene, stationäre Temperaturanstieg berücksichtigt. Die berechnete TTF würde sich mit Berücksichtigung der bei zunehmender Schädigung ansteigenden Temperatur verkürzen, sodass eine stärkere Unterschätzung mit den diskutierten Modellen die Folge wäre.

Bei der Berechnung der TTF über die numerisch ermittelten Werte wird die Temperaturzunahme über die Divergenz der Materialflussdichte berücksichtigt. Die aufgebaute, parametrisierte Simulationsumgebung mit implementierten benutzerdefinierten Gleichungen erlaubt die Bestimmung der Ausfallregion abhängig vom Design der Lotverbindung. Die sich ausbildende Geometrie kann

zudem theoretisch bestimmt und praxisnah in die Simulation eingebunden werden. Eine numerische Signifikanzanalyse der Auswirkungen der zu betrachtenden Effekte kann durchgeführt werden, um deren Einfluss auf die Lebensdauer zu bestimmen. Bei der Berechnung der TTF über die Divergenz der Materialflussdichte zeigen sich Abweichungen vom Experiment mit einem Faktor von $\approx 2,3$ bis $6,5$ für die Experimente mit separierten Effekten. Bei den konvexen Lotverbindungen liegt diese Abweichung bei bis zu drei Größenordnungen. Im Vergleich zu Literaturwerten, vgl. Kapitel 2.3.2, konnte eine Optimierung der TTF -Berechnung durch den zusätzlichen Quotienten $\frac{E_{del}}{E_{ges}}$ erzielt werden.

Die Berechnung der TTF über den Widerstandsanstieg zu Beginn der Experimente kann für die entwickelte Ausfallregion der verjüngten Lotgeometrie bestätigt werden. Bei der konvexen Lotgeometrie führt diese Ableitung zu einer starken Unterschätzung der TTF und eignet sich somit nicht für diese nicht gezogene Struktur.

Ein Phasenwachstum der IMC wird abhängig von den separierten Effekten sichtbar. Es konnten die in der Literatur diskutierten Modi der Schädigung bestätigt werden. Modus 1 entspricht einem Transport von schnell diffundierenden Materialien durch die Körner des Lots, Modus 2 einer stark verlangsamten Eigendiffusion der Lotmaterialien. Es wurde beobachtet, dass eine sich ausbildende IMC innerhalb der Lotverbindung, die sich von der Chip- zur Substratseite fortbildet, die Beständigkeit der Struktur gegenüber der Elektromigration stärkt.

Im Ergebnis konnten neue analytische und numerische Ansätze für ein Modell zur Lebensdauerabschätzung bei Betrachtung des Fehlermechanismus Elektromigration für den Fall separierter Effekte abgeleitet und experimentell bestätigt werden. Die entwickelte Lotgeometrie ist jedoch nicht geeignet, die Lebensdauer von Standard-*Bumps* mit konvexer Lotgeometrie vorherzusagen, da mit zunehmender Miniaturisierung die Ausbildung einer Bambus-Kornstruktur sowie eine Kornrotation beobachtet werden.

6.4 Ausblick

Die erzielten Ergebnisse zum Aufbau einer Teststruktur mit reduzierten Fehlermechanismen können zur Charakterisierung von neuartigen Lotmaterialien und -geometrien hinsichtlich der Zuverlässigkeit bei hohen Stromdichten genutzt werden. Auswirkungen von Nanopartikeln auf eine mögliche Steigerung der Zuverlässigkeit hinsichtlich der EM werden genauso bewertbar wie Unterschiede der Prozessierung von Lotverbindungen. Eine Optimierung der Prozesssicherheit der Lotstruktur kann in aufbauenden Arbeiten mit den be-

schriebenen Verfahren diskutiert werden. Die beobachtete Gefügeveränderung durch Kornrotation bei kleiner werdenden Querschnitten der Lotverbindungen muss zudem weiter untersucht und bei der Zuverlässigkeitsbewertung berücksichtigt werden.

Mit der aufgebauten parametrisierten Finite-Elemente-Simulationsumgebung kann eine Schwachstellenanalyse hinsichtlich einer Elektromigration im Entwicklungsprozess durchgeführt und Designentscheidungen können unterstützt werden. Diese kann leicht um weitere analytische Gleichungen erweitert werden, die weitere überlagerte Effekte beschreiben sollen. Mit dem aufgestellten Modell kann eine Bewertung der Zuverlässigkeit von Lotverbindungen bei Belastung mit hohen Stromdichten durchgeführt werden. Das Modell ist physikalisch begründet und ermöglicht die frühzeitige Abschätzung der Lebensdauer anhand des Widerstandsverlaufs im Experiment. Mit der dargestellten Herangehensweise zur Bewertung der Porenbildung ist gewährleistet, dass die Theorie keinen Einfluss auf die Lösung der Differentialgleichung hat. Es kann in aufbauenden Arbeiten eine der diskutierten erweiterten Theorien aus Kapitel 2.2.3.6 auf eine mögliche Eignung untersucht werden. Zudem können weitere Effekte wie die Ausbildung der IMC zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Formveränderung einer konkaven Lotgeometrie kann als Marker der Migration genutzt werden. Mit fortschreitender Versuchsdauer verändert sich die Geometrie durch Porenbildung und Kornrotation. Eine unter Berücksichtigung der dargelegten Randbedingungen aufgebaute Struktur kann als Monitorstruktur für den Fehlermechanismus Elektromigration eingesetzt werden.

A Anhang

A.1 Auswertung der Messwerte zur Bestimmung der Modellparameter

Die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Modellparameter basieren auf einer statistischen Auswertung der entsprechenden Messwerte. Über die Gleichung 2.45 nach Kapitel 2.3.1 wird die Aktivierungsenergie E_a und über die Gleichung 2.44 der Exponent n der Stromdichte bestimmt.

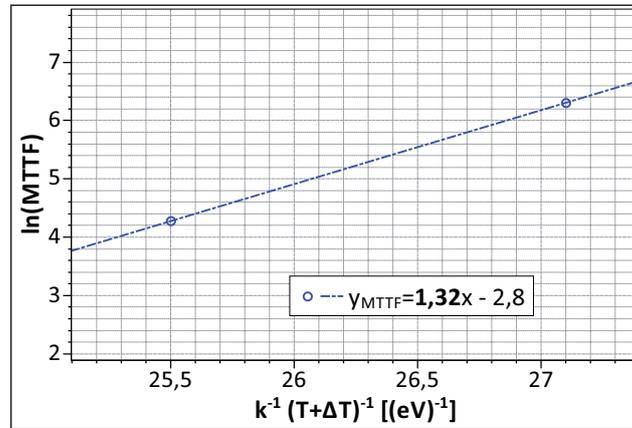
Die Weibull-Verteilungsfunktion, Gl. A.1, wird zur Auswertung der Lebensdauerwerte genutzt, [114].

$$F(t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{MTTF} \right)^\beta \right] \quad (\text{A.1})$$

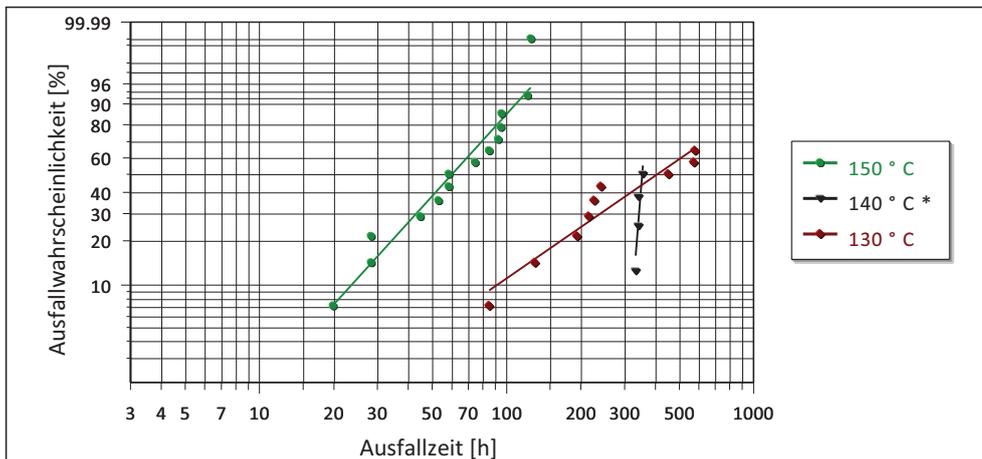
Der Parameter $MTTF$ beschreibt die charakteristische Lebensdauer bis 63,2 % der Proben ausgefallen sind, t die Zeit und der Formfaktor β die Charakteristik der Ausfallverteilung. Ein Wert für $\beta < 1$ beschreibt eine fallende Ausfallrate aufgrund von Frühausfällen, ein Wert für $\beta > 1$ eine steigende Rate bedingt durch Alterungsausfälle und ein Wert von 1 zufällige Ausfälle. Nach Umstellen von Gleichung A.1 erhält man Gleichung A.2. Bei entsprechender Auftragung der Verteilungsfunktion entspricht β der Steigung der resultierenden Geradengleichung, [114].

$$\ln \left[\ln \left(\frac{1}{1 - F(t)} \right) \right] = \beta \cdot \ln(t) - \beta \cdot \ln(MTTF) \quad (\text{A.2})$$

Vorbetrachtung: *Flip-Chip*-Struktur mit konkaven Lotverbindungen



(a)



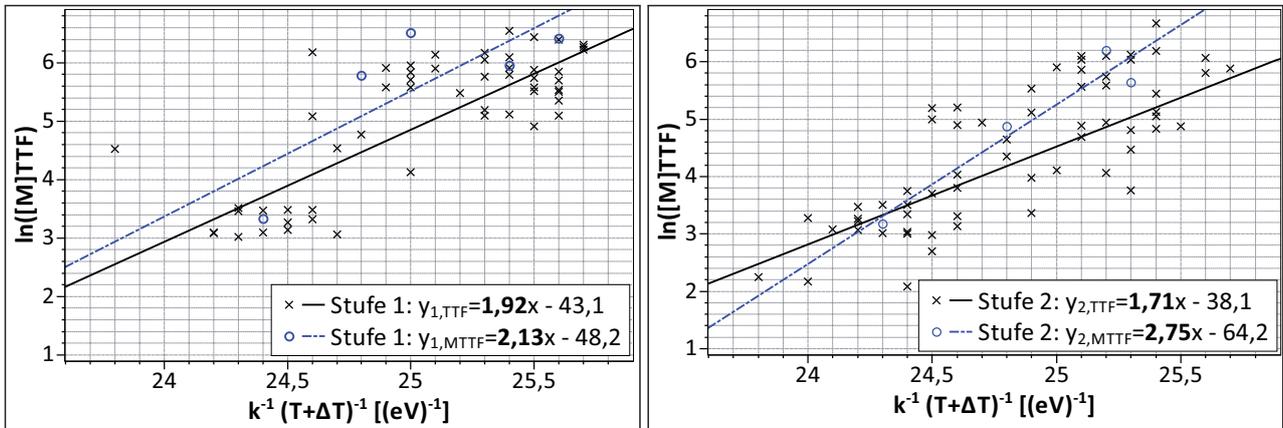
(b)

Abbildung A.1: Konkave Lotgeometrie, Vorversuch, $j = 7,8 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$:

a) Ableitung der Aktivierungsenergie E_a aus der Steigung m_x der Geradengleichung $y = m_x \cdot x_x + n_x$ unter Berücksichtigung der $MTTF$ [h] und der Temperatur T mit Eigenerwärmung ΔT , k : Boltzmann-Konstante.

b) Statistische Weibull-Verteilung der experimentell ermittelten Ausfallzeiten. Die Verteilungsfunktion mit der Kennzeichnung '*' wurde bei den entsprechenden Berechnungen der Modellparameter nicht berücksichtigt.

Optimierte Indikatorstruktur: Konkave Lotverbindungen


(a) $j = 7,7 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$

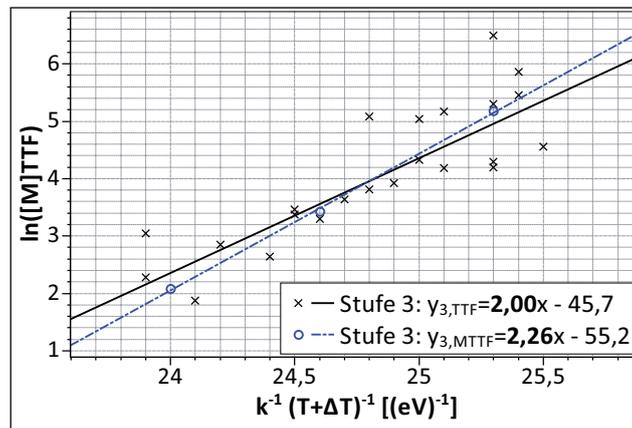
(b) $j = 9,6 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$

(c) $j = 11,9 \cdot 10^4 \text{ A/cm}^2$

Abbildung A.2: Indikatorstruktur mit konkaver Lotgeometrie: Ableitung der Aktivierungsenergie E_a aus der Steigung m_x der Geradengleichung $y = m_x \cdot x_x + n_x$ unter Berücksichtigung der $MTTF$ [h] sowie der TTF [h] und der entsprechenden Temperatur mit Eigenerwärmung ΔT . Die drei Stufen der Stromdichte j sind jeweils einzeln aufgetragen (a - c), k : Boltzmann-Konstante.

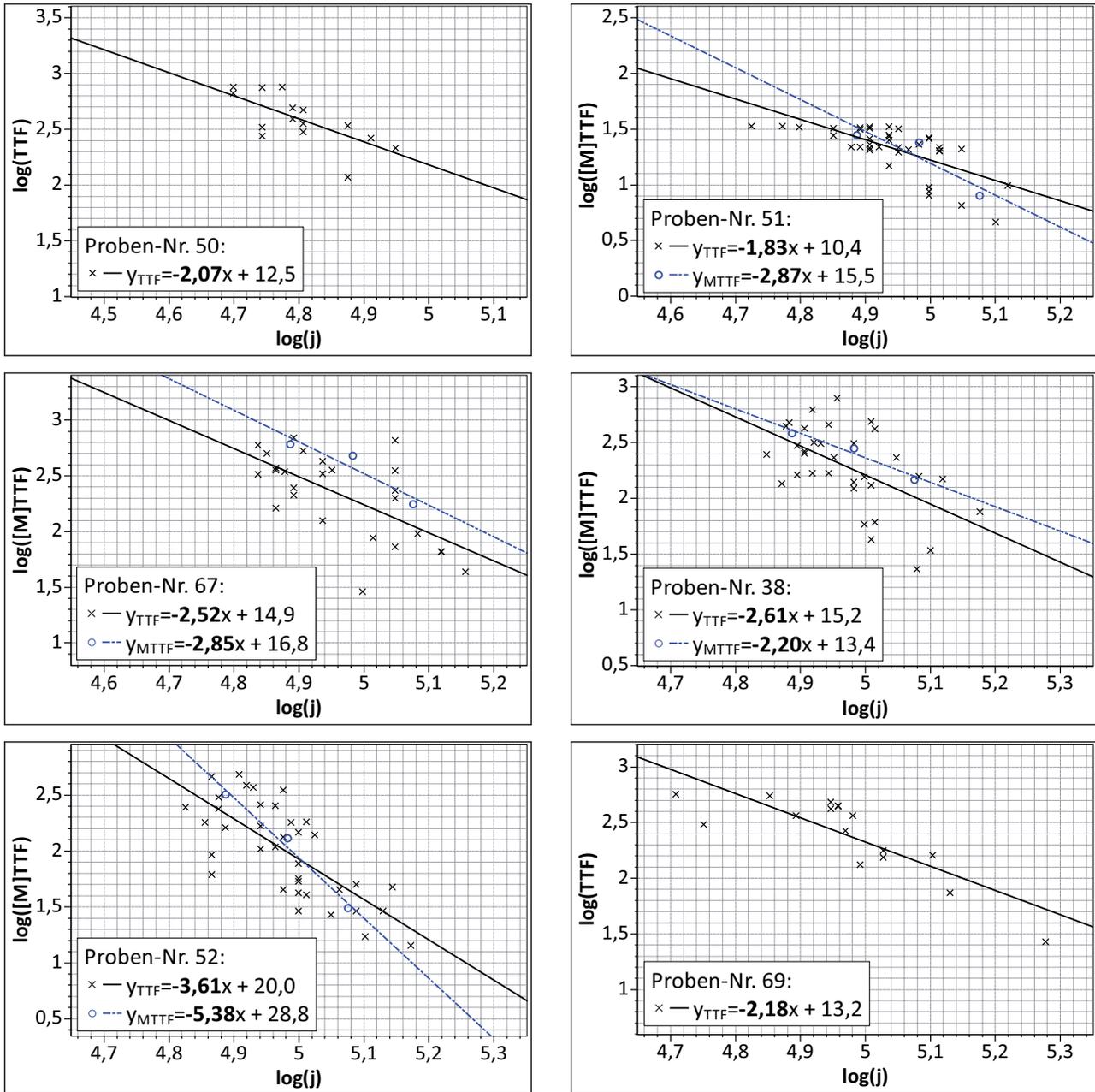
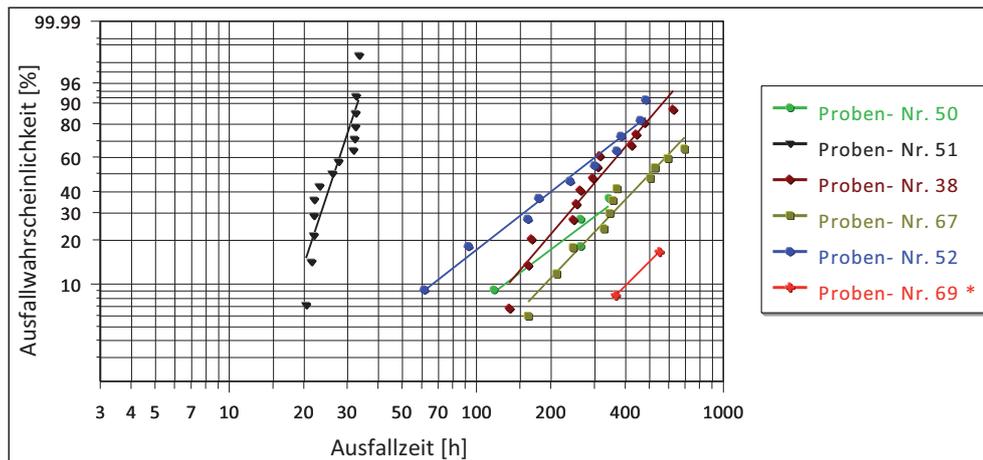
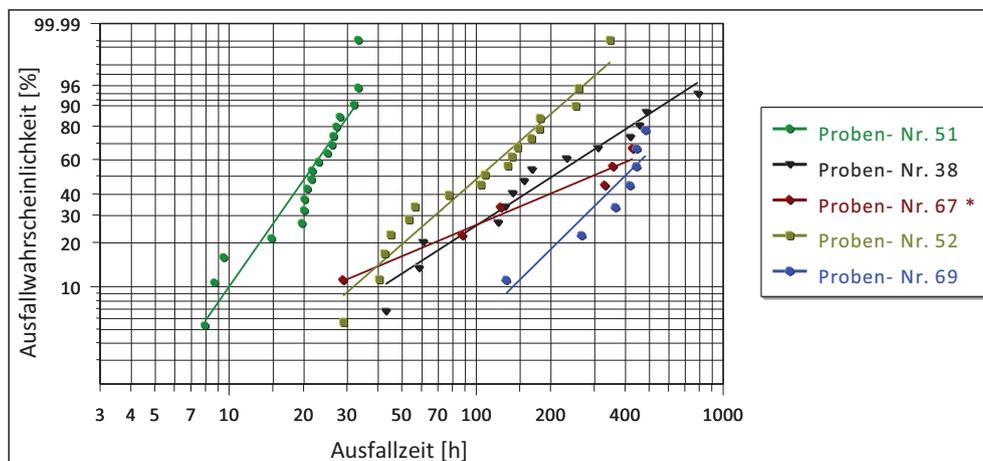


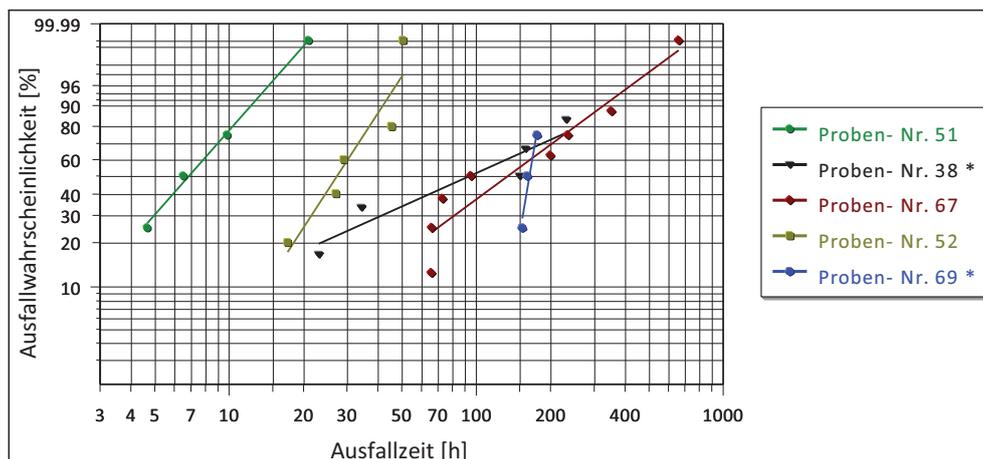
Abbildung A.3: Indikatorstruktur mit konkaver Lotgeometrie: Ableitung des Exponenten n zur Ermittlung der Stromdichteabhängigkeit aus der Steigung m_x der Geradengleichung $y = m_x \cdot x_x + n_x$ unter Berücksichtigung der $MTTF$ [h] sowie der TTF [h] und der entsprechenden Stromdichten j [A/cm²]. Die Messwerte sind für einzelnen Teststrukturen und somit Versuchstemperaturen separat aufgetragen.



(a) $j = 7,7 \cdot 10^4 A/cm^2$



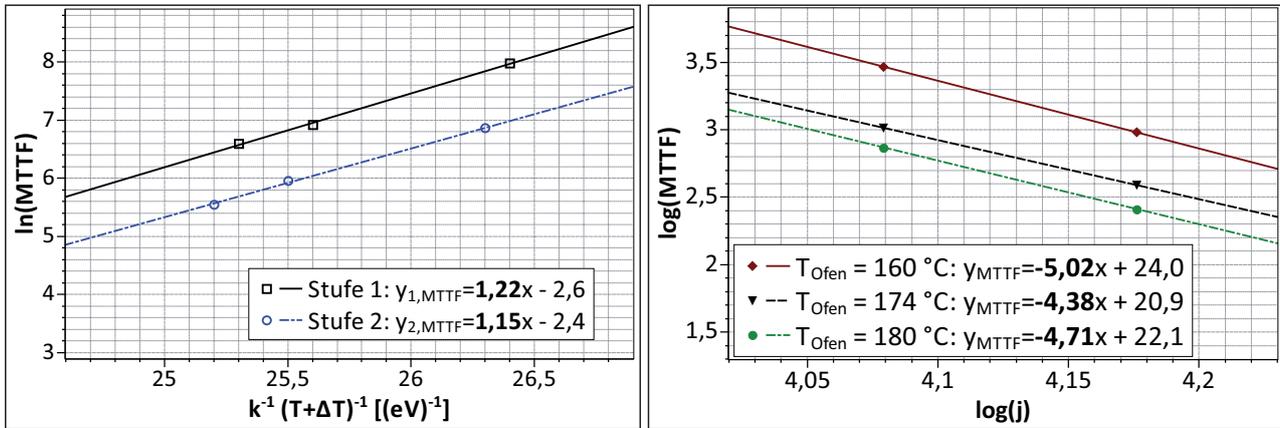
(b) $j = 9,6 \cdot 10^4 A/cm^2$



(c) $j = 11,9 \cdot 10^4 A/cm^2$

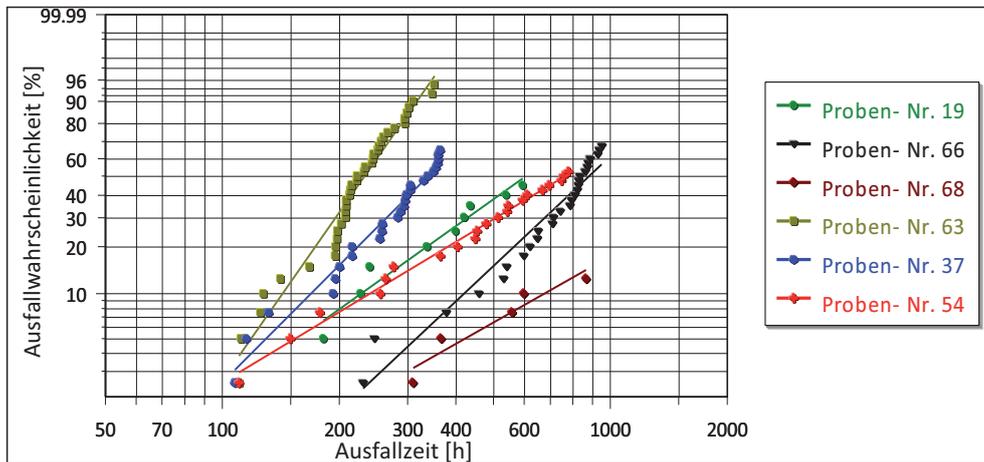
Abbildung A.4: Indikatorstruktur mit konkaver Lotgeometrie: Statistische Weibull-Verteilung der experimentell ermittelten Ausfallzeiten für die drei Stufen der Stromdichte. Die Verteilungsfunktionen mit der Kennzeichnung ’*’ wurden bei den entsprechenden Berechnungen der Modellparameter nicht berücksichtigt.

Optimierte Indikatorstruktur: Konvexe Lotverbindung



(a)

(b)



(c) $j_1 = 1,2 \cdot 10^4\text{ A/cm}^2$, $j_2 = 1,5 \cdot 10^4\text{ A/cm}^2$

Abbildung A.5: Konvexe Lotgeometrie, vergleichende Untersuchung:

- Ableitung der Aktivierungsenergie E_a aus der Steigung m_x der Geradengleichung $y = m_x \cdot x_x + n_x$ unter Berücksichtigung der $MTTF$ [h] und der entsprechenden Temperatur mit Eigenerwärmung ΔT für die zwei Stufen der Stromdichte mit $j_1 = 1,2 \cdot 10^4\text{ A/cm}^2$ und $j_2 = 1,5 \cdot 10^4\text{ A/cm}^2$, k : Boltzmann-Konstante.
- Ableitung des Exponenten n zur Ermittlung der Stromdichteabhängigkeit aus der Steigung m_x der Geradengleichung $y = m_x \cdot x_x + n_x$ unter Berücksichtigung der $MTTF$ [h] und der entsprechenden Stromdichten j [A/cm^2] für die drei Stufen der Versuchstemperatur.
- Statistische Weibull-Verteilung der experimentell ermittelten Ausfallzeiten für die zwei Stufen der Stromdichte.

Verzeichnis der Publikationen im Rahmen der vorliegenden Dissertation

- JAESCHKE, J., J. KLEFF, W.H. MÜLLER, N.F. NISSEN und H. REICHL: *Evaluating the effects of electromigration by using adjustable solder joints of concave shape*. In: *Electronics Packaging Technology Conference, EPTC, 11th*, Seiten 395–400. IEEE, 2009.
- JAESCHKE, J., W.H. MÜLLER, N.F. NISSEN und H. REICHL: *Employing Solder Joints of Concave Shape for Monitoring Electromigration Independently of Material Interfaces*. In: *Electronics System Integration Technology Conferences, ESTC, 3rd*, IEEE, 2010.

Literaturverzeichnis

- [1] *European Lead-free Technology Roadmap*, Februar 2002.
- [2] ABDULHAMID, M.F., C. BASARAN und Y.-S. LAI: *Thermomigration Versus Electromigration in Microelectronics Solder Joints*. *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, 32(3):627–635, 2009.
- [3] AMAGAI, M., M. WATANABE, M. OMIYA, K. KISHIMOTO und T. SHIBUYA: *Mechanical characterization of Sn-Ag-based lead-free solders*. *Microelectronics Reliability*, 42(6):951–966, 2002.
- [4] ARZT, E., O. KRAFT, W.D. NIX und J.E. SANCHEZ: *Electromigration failure by shape change of voids in bamboo lines*. *Journal of Applied Physics*, 76(3):1563–1571, 1994.
- [5] ASTM: *F1259M-96(2003): Guide for Design of Flat, Straight-Line Test Structures for Detecting Metallization Open-Circuit or Resistance-Increase Failure Due to Electromigration*, 1996.
- [6] ASTM: *F1260M-96(2003): Standard Test Method for Estimating Electromigration Median Time-To-Failure and Sigma of Integrated Circuit Metallizations [Metric]*, 1996.
- [7] BALKAN, H., D. PATTERSON, G. BURGESS, C. CARLSON, P. ELENIUS, M. JOHNSON, B. ROONEY, J. SANCHEZ, D. STEPNIAK und J. WOOD: *Flip chip reliability: comparative characterization of lead free (Sn/Ag/Cu) and 63Sn/Pb eutectic solder*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 52nd*, Seiten 1263–1269. IEEE, 2002.
- [8] BALZER, R. und H. SIGVALDASON: *Equilibrium vacancy concentration measurements on tin single crystals*. *Physica Status Solidi (b)*, 92(1):143–147, 1979.
- [9] BATH, J.S.: *Lead-free Soldering*. Springer Verlag, 2007.
- [10] BERGMANN, W.: *Werkstofftechnik, Teil1, Grundlagen*. Fachbuchverlag Leipzig, 2003.
- [11] BÖHM, J.: *Legierungseinflüsse auf die Elektromigration in Submikrometer Aluminium-Leiterbahnen*. Diplomarbeit, Max-Planck-Institut für Intelligente Systeme; Institut für Materialwissenschaft der Universität Stuttgart, 2001.
- [12] BLACK, J.R.: *Mass transport of aluminum by momentum exchange with conducting electrons*. In: *Reliability Physics Symposium, Sixth*, Seiten 148–159. IEEE, 1967.
- [13] BLACK, J.R.: *Electromigration - A brief survey and some recent results*. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 16(4):338–347, 1969.

-
- [14] BLACK, J.R.: *Electromigration failure modes in aluminum metallization for semiconductor devices*. Proceedings of the IEEE, 57(9):1587–1594, 1969.
- [15] BLACK, J.R.: *Physics of electromigration*. In: *Reliability Physics Symposium, 12th*, Seiten 142–149. IEEE, 1974.
- [16] BLECH, I.A.: *Electromigration in thin aluminum films on titanium nitride*. Journal of Applied Physics, 47(4):1203–1208, 1976.
- [17] BLECH, I.A. und C. HERRING: *Stress generation by electromigration*. Applied Physics Letters, 29(3):131–133, 1976.
- [18] BOCHOW-NESS, O., T. ECKERT, J. JAESCHKE, A. MIDDENDORF, N. NISSEN und H. REICHL: *Condition Monitoring of Microsystems Supporting Sustainability*. In: *Electronics Goes Green*, Seiten 219–224, 2008.
- [19] BOSVIEUX, C. und J. FRIEDEL: *Sur l'électrolyse des alliages métalliques*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 23(1-2):123 – 136, 1962.
- [20] BRAKKE, K.A.: *The surface evolver*. Experimental Mathematics, 1(2):141–165, 1992.
- [21] BRAKKE, K.A.: *The Surface Evolver Version 2.30*. <http://www.susqu.edu/brakke/evolver/evolver.html>, Januar 2008.
- [22] BRANDENBURG, S. und S. YEH: *Electromigration studies of flip chip bump solder joints*. In: *Surface Mount International Conference Proceedings*, Seiten 337–344, 1998.
- [23] BROFMAN, P.J., P.A. COICO, M.G. COURTNEY, S. FAROOQ, L.S. GOLDMANN, R.A. JACKSON, D.C. LINNELL, G.B. MARTIN, F.L. POMPEO, K.A. STALTER et al.: *Ceramic ball grid array using in-situ solder stretch*, November 2 1999. US Patent 5,975,409.
- [24] CHAE, S.H., X. ZHANG, K.H. LU, H.L. CHAO, P.S. HO, M. DING, P. SU, T. UEHLING und L.N. RAMANATHAN: *Electromigration statistics and damage evolution for Pb-free solder joints with Cu and Ni UBM in plastic flip-chip packages*. Lead-Free Electronic Solders, Seiten 247–258, 2007.
- [25] CHAN, Y.C. und D. YANG: *Failure mechanisms of solder interconnects under current stressing in advanced electronic packages*. Progress in Materials Science, 55(5):428–475, 2010.
- [26] CHAO, B., S.H. CHAE, X. ZHANG, K.H. LU, M. DING, J. IM und P.S. HO: *Electromigration enhanced intermetallic growth and void formation in Pb-free solder joints*. Journal of Applied Physics, 100:084909, 2006.
- [27] CHAO, B., S.H. CHAE, X. ZHANG, K.H. LU, J. IM und P.S. HO: *Investigation of diffusion and electromigration parameters for Cu-Sn intermetallic compounds in Pb-free solders using simulated annealing*. Acta Materialia, 55(8):2805–2814, 2007.
- [28] CHAO, B.H.L., X. ZHANG, S.H. CHAE und P.S. HO: *Recent advances on kinetic analysis of electromigration enhanced intermetallic growth and damage formation in Pb-free solder joints*. Microelectronics Reliability, 49(3):253–263, 2009.

- [29] CHEN, C., E.C. YEH und K. TU: *Process for protecting solder joints and structure for alleviating electromigration and joule heating in solder joints*, Februar 2006. US Patent App. 20,060/027,933.
- [30] CHEN, K., N. TAMURA und K.N. TU: *In-situ study of electromigration-induced grain rotation in Pb-free solder joint by synchrotron microdiffraction*. 2009.
- [31] CHIU, S.H. und C. CHEN: *Investigation of void nucleation and propagation during electromigration of flip-chip solder joints using x-ray microscopy*. Applied Physics Letters, 89:262106, 2006.
- [32] CHIU, T.C. und K.L. LIN: *The growth of Sn whiskers with dislocation inclusion upon electromigration through a Cu/Sn₃. 5Ag/Au solder joint*. Scripta Materialia, 60(12):1121–1124, 2009.
- [33] CHOI, W.J., E.C.C. YEH und K.N. TU: *Mean-time-to-failure study of flip chip solder joints on Cu/Ni(V)/Al thin-film under-bump-metallization*. Journal of Applied Physics, 94:5665–5671, 2003.
- [34] CHRISTOU, A.: *Electromigration and Electronic Device Degradation*. Wiley-Interscience, 1994.
- [35] CLEMENT, J.J.: *Electromigration modeling for integrated circuit interconnect reliability analysis*. Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on, 1(1):33–42, 2001.
- [36] CLEMENT, J.J. und J.R. LLOYD: *Numerical investigations of the electromigration boundary value problem*. Journal of Applied Physics, 71(4):1729–1731, 1992.
- [37] CLEMENT, J.J. und C.V. THOMPSON: *Modeling electromigration-induced stress evolution in confined metal lines*. Journal of Applied Physics, 78(2):900–904, 1995.
- [38] DALLEAU, D.: *3-D time-depending simulation of void formation in metallization structures*. Doktorarbeit, Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2003.
- [39] DALLEAU, D. und K. WEIDE-ZAAGE: *Three-Dimensional Voids Simulation in chip Metallization Structures: a Contribution to Reliability Evaluation*. Microelectronics Reliability, 41:1625–1630, 2001.
- [40] DATENBLATT: *Keithley Instruments, Inc, Integra Series Technical Data*, www.keithley.com, Zugriff: 28.02.2011.
- [41] DATENBLATT: *Keithley Instruments, Inc, Series 2400 SourceMeter Line*, www.keithley.com, Zugriff: 28.02.2011.
- [42] DATENBLATT: *Rogers Corporation, Data Sheet RO4000 Series High Frequency Circuit Materials*, 04 2006.
- [43] DATENBLATT: *Heraeus Holding GmbH, Thermo Scientific Heating and Drying Ovens, Series 6000*, 2007.

- [44] DAUKSHER, W.J. und D.H. EATON: *Trace Design to Minimize Electromigration Damage to Solder Bumps*, Februar 2008. US Patent App. 20,080/042,271.
- [45] DING, M., G. WANG, B. CHAO, P.S. HO, P. SU und T. UEHLING: *Effect of contact metallization on electromigration reliability of Pb-free solder joints*. Journal of Applied Physics, 99:094906, 2006.
- [46] EATON, D.H., J.D. ROWATT und W.J. DAUKSHER: *Geometry Effects on the Electromigration of Eutectic SnPb Flip-Chip Solder Bumps*. In: *44th International Reliability Physics Symposium*, Seiten 243–249, 2006.
- [47] EBERSBERGER, B., R. BAUER und L. ALEXA: *Reliability of Lead-Free SnAg Solder Bumps: Influence of Electromigration and Temperature*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 55th*, Seiten 1407–1415. IEEE, 2005.
- [48] EBERSBERGER, B. und C. LEE: *Cu pillar bumps as a lead-free drop-in replacement for solder-bumped, flip-chip interconnects*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 58th*, Seiten 59–66. IEEE, 2008.
- [49] FIELDS, R. J., S.R. LOW und G.K. LUCEY, JR: *Physical and Mechanical Properties of Intermetallic Compounds Commonly Found in Solder Joints*. In: *Proceedings of TMS Symposium, Metal Science of Joining*, Seiten 165–174, 1991.
- [50] FLIPCHIP INTERNATIONAL LCC: *Bumping Design Guide*, 05 2009.
- [51] GLASOW, A.: *Zuverlässigkeitsaspekte von Kupfermetallisierungen in integrierten Schaltungen*. Doktorarbeit, Universitätsbibliothek der TU München, 2005.
- [52] GREIG, W.J.: *Integrated circuit packaging, assembly and interconnections*. Springer Verlag, 2007.
- [53] GUSAK, A.M., T.V. ZAPOROZHETS, Y.O. LYASHENKO, S.V. KORNIENKO, M.O. PASICHNYY und A.S. SHIRINYAN: *Diffusion-controlled solid state reactions: in alloys, thin-films, and nanosystems*. Wiley-VCH, 2011.
- [54] HILLERINGMANN, U.: *Mikrosystemtechnik: Prozessschritte, Technologien, Anwendungen*. Springer, 2006.
- [55] HO, T.H.: *Ball grid array having reduced mechanical stress*, Januar 1997. US Patent 5,598,036.
- [56] HSU, Y.-H., C.-K. CHOU, P.C. LIU, C. CHEN, D.J. YAO, T. CHOU und K.N. TU: *Electromigration in Pb-free SnAg_{3.8}Cu_{0.7} Solder Stripes*. Journal of Applied Physics, 98, No. 3:033523–033523–6, 2005.
- [57] HUANG, B. und N.C. LEE: *Solder bumping via paste reflow for area array packages*. In: *Electronics Manufacturing Technology Symposium, IEMT, 27th*, Seiten 1–17. IEEE, 2002.
- [58] HUANG, M.L., T. LOEHER, A. OSTMANN und H. REICHL: *Role of Cu in dissolution kinetics of Cu metallization in molten Sn-based solders*. Applied Physics Letters, 86:181908, 2005.

- [59] HUNTINGTON, H.B. und A.R. GRONE: *Current-Induced Marker Motion in Gold Wires*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 20(1-2):76–87, 1961.
- [60] IPC: *J STD 005: Requirements for Soldering Pastes includes Amendment 1*, 1995.
- [61] IPC: *2221A: Generic Standard on Printed Board Design*, 05 2003.
- [62] IPC: *9701A: Performance Test Methods and Qualification Requirements for Surface Mount Solder Attachments*, 2006.
- [63] ITRS: *International Technology Roadmap for Semiconductors*, <http://www.itrs.net/>, Zugriff: 11.02.2010, 2009.
- [64] JEDEC, STANDARD: *JESD61: Isothermal Electromigration Test Procedure*, 1997.
- [65] JEDEC, STANDARD: *JESD63: Standard Method for Calculating the Electromigration Model Parameters for Current Density and Temperature*, 1998.
- [66] JEDEC, STANDARD: *JESD87: Standard Test Structures for Reliability Assessment of AlCu Metallizations with Barrier Materials*, 2001.
- [67] JEDEC, STANDARD: *JEP154: Guideline for Characterizing Solder Bump Electromigration under Constant Current and Temperature Stress*, 2008.
- [68] JEN, M.-H. R., L.-C. LIU und Y.-S. LAI: *Electromigration on void formation of Sn3Ag1.5Cu FCBGA solder joints*. Microelectronics Reliability, 49, No. 7:734–745, 2009.
- [69] JOO, Y.C. und C.V. THOMPSON: *Electromigration-induced transgranular failure mechanisms in single-crystal aluminum interconnects*. Journal of Applied Physics, 81:6062, 1997.
- [70] KHOSLA, A. und H.B. HUNTINGTON: *Electromigration in tin single crystals*. Journal of Physics and Chemistry of Solids, 36(5):395–399, 1975.
- [71] KLEIN, M., H. OPPERMAN, R. KALICKI, R. ASCHENBRENNER und H. REICHL: *Single chip bumping and reliability for flip chip processes*. Microelectronics Reliability, 39(9):1389–1397, 1999.
- [72] KLEPPMANN, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung. Produkte und Prozesse optimieren*. Hanser Fachbuchverlag, 2008.
- [73] KNORR, D.B. und K.P. RODBELL: *The role of texture in the electromigration behavior of pure aluminum lines*. Journal of Applied Physics, 79(5):2409–2417, 1996.
- [74] KORHONEN, M.A., P. BØRGESEN, K.N. TU und C.Y. LI: *Stress evolution due to electromigration in confined metal lines*. Journal of Applied Physics, 73(8):3790–3799, 1993.
- [75] KORIES, R. und H. SCHMIDT-WALTER: *Taschenbuch der Elektrotechnik: Grundlagen und Elektronik*. Harri Deutsch Verlag, 2008.
- [76] KRAFT, O. und E. ARZT: *Electromigration mechanisms in conductor lines: void shape changes and slit-like failure*. Acta Materialia, 45(4):1599–1611, 1997.

- [77] KÖTTER, T.: *Gefügeeinfluß auf das Elektromigrationsverhalten von Kupferleitbahnen für höchstintegrierte Schaltungen*. Doktorarbeit, TU Dresden, Fakultät Maschinenwesen, 2002.
- [78] LABIE, R., T. WEBERS, E. BEYNE, R.P. MERTENS und J. VAN HUMBEECK: *A modified electromigration test structure for flip chip interconnections*. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 29(3):508–511, 2006.
- [79] LAI, Y.-S. und C.-L. KAO: *Calibration of Electromigration Reliability of Flip-Chip Packages by Electrothermal Coupling Analysis*. Journal of Electronic Materials, 35, No. 5:972–977, 2006.
- [80] LAI, Y.S., K.M. CHEN, C.W. LEE, C.L. KAO und Y.H. SHAO: *Electromigration reliability of Sn-37Pb and Sn-3Ag-1.5 Cu/Sn-3Ag-0.5 Cu composite flip-chip solder bumps with Ti/Ni (V)/Cu under bump metallurgy*. In: *Electronic Packaging Technology Conference, EPTC, 7th*, Band 2, Seite 6. IEEE, 2005.
- [81] LAI, Y.S. und Y.T. CHIU: *Failure Mechanism of Sn-Ag-Cu Flip-chip Solder Joints with Different Cu Weight Contents Under Comparatively Low Current Stressing*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 57th*, Seiten 1462–1466. IEEE, 2007.
- [82] LAI, Y.S., S. SATHE, C.L. KAO und C.W. LEE: *Integrating Electrothermal Coupling Analysis in the Calibration of Experimental Electromigration Reliability of Flip Chip Packages*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 55th*, Seiten 1421–1426. IEEE, 2005.
- [83] LAKRITZ, M.N., J. ORDONEZ und P.J. TUBIOLA: *Method for forming elongated solder connections between a semiconductor device and a supporting substrate*, Oktober 8 1985. US Patent 4,545,610.
- [84] LANDAUER, R.: *Residual resistivity dipoles*. Zeitschrift für Physik B Condensed Matter, 21:247–254, 1975.
- [85] LANDAUER, R.: *Spatial carrier density modulation effects in metallic conductivity*. Physical Review B, 14(4):1474–1479, 1976.
- [86] LANDAUER, R.: *Comment on Lodder's exact electromigration theory*. Solid State Communications, 72(9):867 – 868, 1989.
- [87] LANDAUER, R. und J.W.F. WOO: *Driving force in electromigration*. Physical Review B, 10(4):1266–1271, Aug 1974.
- [88] LEE, I., G. KIM, S. JEONG, S. PARK et al.: *Solder bump structure for flip chip package and method for manufacturing the same*, September 2007. US Patent App. 20,070/205,512.
- [89] LEE, J.H., Y.D. LEE, Y.B. PARK, S.T. YANG, M.S. SUH, Q.H. CHUNG und K.Y. BYUN: *Joule Heating Effect on the Electromigration Lifetimes and Failure Mechanisms of Sn3,5Ag Solder Bump*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 57th*, Seiten 1436–1441. IEEE, 2007.

- [90] LEE, K., K.S. KIM, Y. TSUKADA, K. SUGANUMA, K. YAMANAKA, S. KURITANI und M. UESHIMA: *Influence of crystallographic orientation of Sn–Ag–Cu on electromigration in flip-chip joint*. Microelectronics Reliability, 51(12):2290–2297, 2011.
- [91] LEE, T.Y., K.N. TU und D.R. FREAR: *Electromigration of eutectic SnPb and SnAg₃.₈Cu_{0.7} flip chip solder bumps and under-bump metallization*. Journal of Applied Physics, 90:4502–4508, 2001.
- [92] LEE, T.Y.T., T.Y. LEE und K.N. TU: *A study of electromigration in 3-D flip Chip Solder joint using numerical Simulation of heat flux and current density*. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 27(3):472–479, 2004.
- [93] LERCH, R.: *Elektrische Messtechnik: Analoge, digitale und computergestützte Verfahren*. Springer, 2007.
- [94] LI, W. und C.M. TAN: *Enhanced finite element modelling of Cu electromigration using ANSYS and matlab*. Microelectronics Reliability, 47(9-11):1497–1501, 2007.
- [95] LI, W., C.M. TAN und Y. HOU: *Dynamic simulation of electromigration in polycrystalline interconnect thin film using combined Monte Carlo algorithm and finite element modeling*. Journal of Applied Physics, 101:104314, 2007.
- [96] LIANG, S.W., Y.W. CHANG und C. CHEN: *Three-dimensional thermoelectrical simulation in flip-chip solder joints with thick underbump metallizations during accelerated electromigration testing*. Journal of Electronic Materials, 36(2):159–167, 2007.
- [97] LIANG, S.W., Y.W. CHANG, T.L. SHAO, C. CHEN und K.N. TU: *Effect of three-dimensional current and temperature distributions on void formation and propagation in flip-chip solder joints during electromigration*. Applied Physics Letters, 89:022117, 2006.
- [98] LIN, Y.H., C.M. TSAI, Y.C. HU, Y.L. LIN und C.R. KAO: *Electromigration-induced failure in flip-chip solder joints*. Journal of Electronic Materials, 34(1):27–33, 2005.
- [99] LIU, X., S. XU, G.Q. LU und D.A. DILLARD: *Stacked solder bumping technology for improved solder joint reliability*. Microelectronics Reliability, 41(12):1979–1992, 2001.
- [100] LIU, Y.: *Finite Element Modeling of Electromigration in Solder Bumps of a Package System*. In: *Electronics Packaging Technology Conference, EPTC, 10th, Short Course*. IEEE, 2008.
- [101] LIU, Y., L. LIANG, S. IRVING und T. LUK: *3D Modeling of electromigration combined with thermal-mechanical effect for IC device and package*. Microelectronics Reliability, 48(6):811–824, 2008.
- [102] LIU, Y., Y. ZHANG und L. LIANG: *Prediction of Electromigration Induced Voids and Time to Failure for Solder Joint of a Wafer Level Chip Scale Package*.

- Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on, 33(3):544–552, 2010.
- [103] LLOYD, J.R.: *Electromigration induced resistance decrease in Sn conductors*. Journal of Applied Physics, 94(10):6483–6486, 2003.
- [104] LODDER, A.: *Electromigration theory unified*. EPL (Europhysics Letters), 72(5):774, 2005.
- [105] LU, M., P. LAURO, D.Y. SHIH, R. POLASTRE, C. GOLDSMITH, D.W. HENDERSON, H. ZHANG und M.G. CHO: *Comparison of electromigration performance for Pb-free solders and surface finishes with Ni UBM*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 58th*, Seiten 360–365. IEEE, 2008.
- [106] LU, M., D.Y. SHIH, P. LAURO, C. GOLDSMITH und D.W. HENDERSON: *Effect of Sn grain orientation on electromigration degradation mechanism in high Sn-based Pb-free solders*. Applied Physics Letters, 92:211909, 2008.
- [107] LYNCH, B. und P. O'BRIEN: *Process for making an interconnect bump for flip-chip integrated circuit including integral standoff and hourglass shaped solder coating*, November 1995. US Patent 5,466,635.
- [108] MANESSIS, D., R. PATZELT, A. OSTMANN, R. ASCHENBRENNER, H. REICHL, J. WIESE und C. MODES: *Accomplishments in Lead-Free Flip Chip Wafer Bumping using Stencil Printing Technology*. IMAPS, 2004.
- [109] MANESSIS, D., M. WHITMORE, M. STADDON, A. OSTMANN, R. ASCHENBRENNER und H. REICHL: *Implementation of advanced ball printing technology for high yield bumping of wafer chip scale packages*. In: *Electronic Packaging Technology Conference, EPTC, 7th*, Band 1, Seiten 298–303. IEEE, 2005.
- [110] MENON, S., J. FAZEKAS, J. VON HAGEN, L. HEAD, C.H. ELLENWOOD und H.A. SCHAFFT: *Impact of test-structure design and test methods for electromigration testing*. In: *Integrated Reliability Workshop Final Report*, Seiten 46–53. IEEE, 1999.
- [111] MESSELHÄUSER, J.: *Plasmaanwendungen in der Leiterplattenfertigung*. Productronic, 12, 2008.
- [112] MILLER, L.F.: *Controlled collapse reflow chip joining*. IBM Journal of Research and Development, 13(3):239–250, 1969.
- [113] NAH, J.W., K. CHEN, J.O. SUH und K.N. TU: *Electromigration study in flip chip solder joints*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 57th*, Seiten 1450–1455. IEEE, 2007.
- [114] O'CONNOR, P.D.T., D. NEWTON und R. BROMLEY: *Practical reliability engineering*. John Wiley & Sons Inc, 2002.
- [115] ORIO, R.L. DE, H. CERIC und S. SELBERHEER: *Physically based models of electromigration: From Black's equation to modern TCAD models*. Microelectronics Reliability, Vol. 50, No. 6:775–789, 2010.

- [116] OU, S. und K.N. TU: *A study of electromigration in Sn3. 5Ag and Sn3. 8Ag0. 7Cu solder lines*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 55th*, Seiten 1445–1450. IEEE, 2005.
- [117] OUYANG, F.Y., K. CHEN, K.N. TU und Y.-S. LAI: *Effect of current crowding on whisker growth at the anode in flip chip solder joints*. *Applied Physics Letters*, 91:231919, 2007.
- [118] PATRA, S.K. und Y.C. LEE: *Modeling of self-alignment mechanism in flip-chip soldering. II. Multichip solder joints*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 41st*, Seiten 783–788. IEEE, 1991.
- [119] PUTTLITZ, K. J. und K. A. STALTER: *Handbook of Lead-Free Solder Technology for Microelectronic Assemblies*. Marcel Dekker Ltd, Februar 2004.
- [120] RAJOO, R., S.S. LIM, E.H. WONG, W.Y. HNIN, S.K.W. SEAH, A.A.O. TAY, M. IYER und R.R. TUMMALA: *Development of Stretch Solder Interconnections for Wafer Level Packaging*. *Advanced Packaging, IEEE Transactions on*, 31(2):377–385, 2008.
- [121] RAJOO, R., E.H. WONG, S.S. LIM, W.Y. HNIN, S.K.W. SEAH, A.A.O. TAY, M. IYER und R.R. TUMMALA: *Super stretched solder interconnects for wafer level packaging*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 56th*, Seiten 1227–1232. IEEE, 2006.
- [122] RAMANATHAN, L.N., T.Y.T. LEE, J.W. JANG, S.H. CHAE und P.S. HO: *Current Carrying Capability of Sn0. 7Cu Solder Bumps in Flip Chip Modules for High Power Applications*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 57th*, Seiten 1456–1461. IEEE, 2007.
- [123] REICHL, H.: *Direktmontage*. Springer Verlag, 1998.
- [124] REICHL, H., A. SCHUBERT und M. TÖPPER: *Reliability of flip chip and chip size packages*. *Microelectronics Reliability*, 40(8-10):1243–1254, 2000.
- [125] RICHLING, W.P., W.J. DAUKSHER und W.S. GRAUPP: *Routing design to minimize electromigration damage to solder bumps*, August 2006. US Patent App. 20,060/170,100.
- [126] RZEPKA, S., E. MEUSEL, M.A. KORHONEN und C.Y. LI: *3-D finite element simulator for migration effects due to various driving forces in interconnect lines*. In: *AIP Conference Proceedings*, Band 491, Seite 150, 1999.
- [127] SARYCHEV, M.E., Y.V. ZHITNIKOV, L. BORUCKI, C.L. LIU und T.M. MAKHVILADZE: *General model for mechanical stress evolution during electromigration*. *Journal of Applied Physics*, 86(6):3068–3075, 1999.
- [128] SCHAFFT, H.A., T.C. STATON, J. MANDEL und J.D. SHOTT: *Reproducibility of electromigration measurements*. *Electron Devices, IEEE Transactions on*, 34(3):673–681, 1987.
- [129] SCHREIBER, H.U.: *Activation energies for the different electromigration mechanisms in aluminum*. *Solid-State Electronics*, 24(6):583–589, 1981.

-
- [130] SCORZONI, A., M. IMPRONTA, I. DE MUNARI und F. FANTINI: *A proposal for a standard procedure for moderately accelerated electromigration tests on metal lines*. *Microelectronics and Reliability*, 39(5):615–626, 1999.
- [131] SEITZ, F. und D. TURNBULL: *Solid State Physics: Advances in Research and Applications*, Band 22. Academic Press Inc., 1969.
- [132] SHAO, T.L., Y.H. CHEN, S.H. CHIU und C. CHEN: *Electromigration failure mechanisms for SnAg3. 5 solder bumps on Ti/ Cr-Cu/ Cu and Ni (P)/ Au metallization pads*. *Journal of Applied Physics*, 96:4518, 2004.
- [133] SHATZKES, M. und J.R. LLOYD: *A model for conductor failure considering diffusion concurrently with electromigration resulting in a current exponent of 2*. *Journal of Applied Physics*, 59(11):3890–3893, 1986.
- [134] SHINGUBARA, S., T. OSAKA, S. ABDESLAM, H. SAKUE und T. TAKAHAGI: *Void formation mechanism at no current stressed area*. In: *AIP Conference Proceedings*, Band 418, Seite 159, 1998.
- [135] SIEWERT, T., S. LIU, D.R. SMITH und J.C. MADENI: *Database for solder properties with emphasis on new lead-free solders*. NIST & Colorado School of Mines, Release, 4, 2002.
- [136] SORBELLO, R.S.: *A pseudopotential based theory of the driving forces for electromigration in metals*. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 34(6):937–950, 1973.
- [137] STRACKE, E. und C. HERZIG: *Electromigration, thermomigration, and solubility of copper in lead*. *Physica Status Solidi (a)*, 47(2):513–521, 1978.
- [138] SYLVESTRE, J. und A. BLANDER: *Large-scale correlations in the orientation of grains in lead-free solder joints*. *Journal of Electronic Materials*, 37(10):1618–1623, 2008.
- [139] TAMMARO, M.: *Investigation of the temperature dependence in Black's equation using microscopic electromigration modeling*. *Journal of Applied Physics*, 86:3612, 1999.
- [140] TAN, C.M.: *Finite Element Modeling of Electromigration in ULSI Interconnections*. In: *Electronics Packaging Technology Conference, EPTC, 10th, Short Course*. IEEE, 2008.
- [141] TAN, C.M. und A. ROY: *Electromigration in ULSI interconnects*. *Mater. Sci. and Eng. R*, 58, No. 1-2:1–75, 2007.
- [142] TAN, C.M., G. ZHANG und Z. GAN: *Dynamic study of the physical processes in the intrinsic line electromigration of deep-submicron copper and aluminum interconnects*. *Device and Materials Reliability, IEEE Transactions on*, 4(3):450–456, 2004.
- [143] TU, K.-N.: *Electronic Thin-film Reliability*. Cambridge University Press, 2011.
- [144] TU, K.N.: *Solder Joint Technology, Materials, Properties, and Reliability*. Springer Science (New York), 2007.

- [145] TU, K.N., J.W. MAYER und L.C. FELDMAN: *Electronic thin film science: for electrical engineers and materials scientists*. Prentice Hall, 1992.
- [146] VERBRUGGEN, A.H.: *Fundamental questions in the theory of electromigration*. IBM Journal of Research and Development, 32(1):93–98, 1988.
- [147] WANG, S.N., L. LIANG, Y. LIU, S. IRVING und T. LUK: *Solder Joint Reliability under Electromigration and Thermal-Mechanical Load*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 57th*, Seiten 1074–1083. IEEE, 2007.
- [148] WANG, W., Z. SUO und T.H. HAO: *A simulation of electromigration-induced transgranular slits*. Journal of Applied Physics, 79(5):2394–2403, 1996.
- [149] WEIDE, K.: *Untersuchung von Stromdichte-, Temperatur- und Massenflußverteilungen in Viastrukturen integrierter Schaltungen*. VDI Verlag, Reihe 9, Elektronik, Nr. 184, 1994.
- [150] WEIDE-ZAAGE, K., D. DALLEAU und X. YU: *Static and dynamic analysis of failure locations and void formation in interconnects due to various migration mechanisms*. Materials Science in Semiconductor Processing, 6(1-3):85–92, 2003.
- [151] WEIDE-ZAAGE, K., H. FREMONT und L. WANG: *Simulation of migration effects in PoP*. In: *International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems, EuroSimE*, Seiten 1–7. IEEE, 2008.
- [152] WIESER, M.E. und T.B. COPLEN: *Atomic weights of the elements 2009*. Pure and Applied Chemistry, 83(2):359–396, 2011.
- [153] WONG, E.H., R. RAJOO, P.S. TEO et al.: *Wafer level super stretch solder*, Mai 2005. US Patent 6,890,795.
- [154] WU, A.T., A.M. GUSAK, K.N. TU und C.R. KAO: *Electromigration-induced grain rotation in anisotropic conducting beta tin*. Applied Physics Letters, 86(24):241902, 2005.
- [155] WU, A.T. und Y.C. HSIEH: *Direct observation and kinetic analysis of grain rotation in anisotropic tin under electromigration*. Applied Physics Letters, 92(12):121921, 2008.
- [156] WU, A.T., K.N. TU, J.R. LLOYD, N. TAMURA, B.C. VALEK und C.R. KAO: *Electromigration-induced microstructure evolution in tin studied by synchrotron x-ray microdiffraction*. Applied Physics Letters, 85:2490, 2004.
- [157] XU, L., J.H.L. PANG und K.N. TU: *Effect of electromigration-induced back stress gradient on nanoindentation marker movement in SnAgCu solder joints*. Applied Physics Letters, 89:221909, 2006.
- [158] YE, H., C. BASARAN und D.C. HOPKINS: *Damage mechanics of microelectronics solder joints under high current densities*. International Journal of Solids and Structures, 40(15):4021–4032, 2003.

- [159] YE, H., C. BASARAN und D.C. HOPKINS: *Thermomigration in Pb–Sn solder joints under joule heating during electric current stressing*. Applied Physics Letters, 82:1045, 2003.
- [160] YE, H., C. BASARAN, D.C. HOPKINS und M. LIN: *Modeling deformation in microelectronics BGA solder joints under high current density. Part I. Simulation and testing*. In: *Electronic Components and Technology Conference, ECTC, 55th*, Seiten 1437–1444. IEEE, 2005.
- [161] YE, S., M. HUANG, L. CHEN und X. LIU: *Electromigration of 300 μm diameter Sn-3.0 Ag-0.5 Cu lead-free bumps in flip chip package*. In: *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, ICEPT-HDP, 11th*, Seiten 1132–1137. IEEE, 2010.
- [162] YEH, D.C. und H.B. HUNTINGTON: *Extreme fast-diffusion system: Nickel in single-crystal tin*. Physical Review Letters, 53(15):1469–1472, 1984.
- [163] ZHANG, L., S. OU, J. HUANG, K.N. TU, S. GEE und L. NGUYEN: *Effect of current crowding on void propagation at the interface between intermetallic compound and solder in flip chip solder joints*. Applied Physics Letters, 88(1):012106, 2006.
- [164] ZHAO, J., V. GUPTA und K. ZENG: *Electromigration-Resistant Flip-Chip Solder Joints*, Oktober 2008. US Patent App. 20,080/251,927.

In dieser Arbeit werden die überlagerten Fehlermechanismen innerhalb von Lotverbindungen zur Bewertung der Zuverlässigkeit bei Elektromigration untersucht und modelliert.

Das bestehende theoretische Verständnis wird durch eine isolierte Betrachtung überlagerter Einflussgrößen erweitert. Ein physikalisch begründetes Modell wird abgeleitet und die nicht ausreichend quantifizierten und qualifizierten Zusammenhänge werden aufgezeigt.

In einem aufgebauten numerischen Modell können Modellvorstellungen bei variierenden Randbedingungen abgebildet werden.

Zur Ermittlung von für Elektromigration anfälligen Lokalisationen werden die Grenzwerte für das Auftreten dieses Fehlermechanismus' in Abhängigkeit der Randbedingungen Design, Belastung und Materialien bestimmt. Eine Schwachstellenanalyse im Entwicklungsprozess elektronischer Systeme kann durchgeführt und Designentscheidungen können unterstützt werden.

Eine Teststruktur wird entwickelt, die reproduzierbar hergestellt werden kann, zu einem Ausfall durch Elektromigration im Lotmaterial führt und somit einen Vergleich von Lotsystemen in Abhängigkeit der sich ändernden Randbedingungen Temperatur, Stromdichte, Material und Geometrie ermöglicht.

ISBN 978-3-8396-0431-1



9 783839 604311