

LEITERPLATTEN UNTER 1000 V SPANNUNG:
EINFLUSS DES LÖTSTOPPLACKS AUF DAS UNTER
FEUCHTE UND HOHEN ELEKTRISCHEN SPANNUNGEN
AUFTRETENDE ANODISCHE MIGRATIONSPHÄNOMEN IN
DER LEITERPLATTE

DISSERTATION

ZUR

ERLANGUNG DES AKADEMISCHEN GRADES

DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)

DER FAKULTÄT FÜR INFORMATIK UND ELEKTROTECHNIK

DER UNIVERSITÄT ROSTOCK

ERSTER GUTACHTER: PROF. DR.-ING. HABIL. MATHIAS NOWOTNICK

EINRICHTUNG: UNIVERSITÄT ROSTOCK

ZWEITER GUTACHTER: PROF. DR.-ING. HABIL. THOMAS ZERNA

EINRICHTUNG: TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

DRITTER GUTACHTER: DR. RER. NAT. LOTHAR HENNEKEN

EINRICHTUNG: ROBERT BOSCH GMBH

VORGELEGT VON

KERSTIN LUX | GEBOREN AM 27. JUNI 1989 IN REUTLINGEN

AUS INGOLSTADT

ROSTOCK | 24. JUNI 2021 (EINREICHUNG) | 16. MÄRZ 2022 (VERTEIDIGUNG)

Inhaltsverzeichnis

DANKSAGUNG.....	V
VERZEICHNIS VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE	VII
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	IX
FORMELZEICHENVERZEICHNIS.....	XI
KURZFASSUNG	XV
ABSTRACT	XVII
I. EINLEITUNG, MOTIVATION UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT	1
II. GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK	5
2.1 AUFBAU UND FUNKTION EINER LEITERPLATTE.....	5
2.2 AUFBAU UND FUNKTION VON LÖTSTOPPLACK	8
2.2.1 Vernetzung des Lötstopplacks.....	10
2.2.2 Füllstoffe und Dispergiermittel.....	11
2.3 MATERIALEIGENSCHAFTEN VON LÖTSTOPPLACK.....	16
2.3.1 Glasübergangstemperatur	16
2.3.2 Feuchteaufnahme	16
2.4 ALLGEMEINE EINFÜHRUNG IN LEBENSDAUERTESTS VON LEITERPLATTEN	18
2.5 ELEKTRISCHE FELDER IN INHOMOGENER MATERIE	20
2.5.1 Elektrischer Durchschlag und Teilentladungen	21
2.6 ELEKTROCHEMISCHE MIGRATIONSPHÄNOMENE	23
III. ALLGEMEINE EINFÜHRUNG IN NEUARTIGE PHÄNOMENE IN DER LEITERPLATTE UNTER HOHER ELEKTRISCHER SPANNUNG UND FEUCHTELAST	27
IV. DURCHFÜHRUNG DER HV-SIR-TESTS VON LEITERPLATTEN ZUR ANALYSE DES AMP	33
4.1 TESTSTRUKTUREN UND HERSTELLUNGSPARAMETER DER TESTLEITERPLATTEN.....	33
4.2 VORBEANSPRUCHUNG DURCH REFLOW UND REINIGUNG DER TESTLEITERPLATTEN.....	36
4.3 VERSUCHSAUFBAU FÜR DIE DURCHFÜHRUNG DER LEBENSDAUERTESTS VON LEITERPLATTEN	37
V. GRUNDLEGENDE CHARAKTERISIERUNG DES LÖTSTOPPLACKSYSTEMS.....	41
5.1 GLASÜBERGANGSTEMPERATUR VON LÖTSTOPPLACK.....	41
5.2 FEUCHTEAUFNAHME VON LÖTSTOPPLACK.....	43
5.2.1 Simulation der Feuchteaufnahme der Leiterplatte.....	43
5.2.2 Durchführung der Feuchteaufnahmemessung von Lötstopplack A1.....	44
5.2.3 Auswertung der Feuchteaufnahme von Lötstopplack	46
5.3 ELEKTRISCHE ALTERUNG VON LÖTSTOPPLACK.....	48
5.3.1 Simulation der elektrischen Felder einer Kammstruktur	48

5.3.2	<i>Untersuchung von Teilentladungseffekten in Lötstopplack</i>	51
5.3.2.1	Durchführung der Teilentladungsmessungen	51
5.3.2.2	Diskussion der Ergebnisse der Teilentladungsmessungen	53
5.4	ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION DER ERGEBNISSE	56
VI.	CHARAKTERISIERUNG DES ANODISCHEN MIGRATIONSPHÄNOMENS IN DER LEITERPLATTE	59
6.1	ANALYSE DER CHEMISCHEN ZUSAMMENSETZUNG DES AMP	59
6.1.1	<i>Allgemeine Vorgehensweise bei der Analyse des AMP-Materials</i>	60
6.1.2	<i>Detaillierte Analyse des oxidierten Materials an der Anode</i>	67
6.1.2.1	Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des oxidierten Materials auf dem Lötstopplack	68
6.1.2.2	Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des im Lötstopplack migrierenden Materials	70
6.1.3	<i>Diskussion der Ausbildung des AMP-Pfads und des AMP-Materials</i>	72
6.1.3.1	Bildung von Cu_2O	74
6.2	UNTERSUCHUNGEN DES AMP IN ABHÄNGIGKEIT VON TESTZEIT, ELEKTRISCHER SPANNUNG UND DER HÖHE DES ELEKTRISCHEN FIELDS	82
6.2.1	<i>Voruntersuchungen mit 500 V und 1000 V elektrischer Spannung</i>	82
6.2.2	<i>Entwicklung Leiterplattenlayout</i>	83
6.2.3	<i>Versuchsdurchführung</i>	86
6.2.4	<i>Versuchsauswertung</i>	89
6.2.4.1	Bestimmung der mittleren AMP-Länge	91
6.2.4.2	Bestimmung der AMP-Anzahl	94
6.2.5	<i>Entwicklung eines Lebensdauermodells für unter hohen elektrischen Spannungen und Feuchtelast betriebene Leiterplatten</i>	98
6.2.5.1	Bestimmung der Parameter α und k	100
6.2.5.2	Ermittlung der Zeit bis zum Ausfall	103
6.2.6	<i>Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse</i>	105
6.3	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER LÖTSTOPPLACKDICKE AUF DAS AMP	107
6.3.1	<i>Beschreibung und Analyse der Ergebnisse</i>	108
6.3.2	<i>Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse</i>	114
6.4	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER LÖTSTOPPLACKAUSHÄRTUNG UND TW-VORBEANSPRUCHUNG AUF DAS AMP	115
6.4.1	<i>Einfluss von Temperaturwechseln auf den SIR-Wert und das AMP</i>	115
6.4.2	<i>Einfluss der Lötstopplackaushärtung</i>	118
6.5	UNTERSUCHUNG DES EINFLUSSES DER REZEPTUR DES LÖTSTOPPLACKS AUF DAS AMP	120
6.5.1	<i>Voruntersuchungen des Einflusses verschiedener Lacke auf das AMP</i>	120
6.5.2	<i>Wirkmodell für das Auftreten des AMP</i>	122
6.5.3	<i>Versuchsparameter und untersuchte Lackvarianten</i>	127
6.5.4	<i>Allgemeine Beschreibung der Ergebnisse</i>	129
6.5.5	<i>Allgemeine Vorgehensweise bei der Analyse der AMP</i>	130
6.5.5.1	Abschätzung der AMP-Längen	130
6.5.5.2	Zuordnung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze zur Migrationsebene	131

6.5.6	Analyse des AMP bei der Ursprungslackvariante A1	132
6.5.7	Analyse und Vergleich der Lackvarianten auf Basis von A1	134
6.5.8	Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse	137
VII.	AUSBLICK	141
VIII.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	143
IX.	ANHANG	147
9.1	VERWENDETE MESSGERÄTE	147
9.2	DETAILLIERTE UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE VERSCHIEDENER LACKVARIANTEN	151
9.2.1	Einfluss von Füllstoffen und Dispergiermittel	151
9.2.2	Einfluss der Füllstoffe in Wechselwirkung mit Dispergiermittel D_A auf das AMP	152
9.2.2.1	Gruppierung der Lötstopplacke	152
9.2.2.2	Tendenz zu Dispergiermittelmangel	154
9.2.2.3	Tendenz zu Dispergiermittelüberschuss	171
9.2.3	Einfluss einer Veränderung der Füllstoff- und Dispergiermittelart auf das AMP	180
9.2.3.1	Veränderung der Füllstoffe	180
9.2.3.2	Veränderung der Dispergiermittel	185
9.2.4	Einfluss einer Veränderung der Beschleuniger- und Epoxidharzmenge auf das AMP	197
9.2.4.1	Tendenz zu vollständig abreagiertem Epoxidanteil	197
9.2.4.2	Tendenz zu unvollständig abreagiertem Epoxidanteil	205
9.2.5	Einfluss der Art des Beschleunigers auf das AMP	213
	LITERATURVERZEICHNIS	219

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Mathias Nowottnick vom Institut für Gerätesysteme und Schaltungstechnik, Lehrstuhl für Zuverlässigkeit und Sicherheit elektronischer Systeme der Universität Rostock. Mit zahlreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen hat er maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Für die Übernahme der Funktion des Zweitgutachters und die Begutachtung der vorliegenden Dissertation bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Zerna vom Institut für Aufbau- und Verbindungstechnik der Elektronik der Technischen Universität Dresden.

Auch Herrn Dr. Lothar Henneken von der Robert Bosch GmbH gilt mein besonderer Dank. Mit seiner hervorragenden Betreuung, dem regelmäßigen fachlichen Austausch sowie seinem persönlichen Einsatz war er mir während der gesamten Doktorandenzeit eine große Unterstützung.

Für die vielen fachlichen Diskussionen und die Unterstützung bei der Durchführung der Lebensdaueruntersuchungen für diese Arbeit möchte ich mich herzlich bei meinem Teamleiter Herrn Dr. Sebastian Maaß bedanken.

Beim Labor-Team der Abteilung AE/EAI der Robert Bosch GmbH, insbesondere bei Herrn Gerald Fischer und Herrn Dirk Makkens, bedanke ich mich für die tolle Unterstützung bei der Durchführung zahlreicher Lebensdauertests im Dauerlaufraum.

Auch meinen Kollegen, Doktorandenkollegen und den Studenten aus der EAI gilt großer Dank für die vielen Fachgespräche, Anregungen und Unterstützung. Durch die angenehme und freundliche Atmosphäre in der Abteilung hat mir die Erstellung der Arbeit stets viel Freude bereitet.

Bedanken möchte ich mich auch bei der Firma Lackwerke Peters GmbH & Co. KG für die fachliche Unterstützung zur Lötstopplackherstellung und -analyse. Insbesondere danke ich Herrn Detlev Schucht für seinen persönlichen Einsatz und die vielen fachlichen Diskussionen. Zu guter Letzt hätte ich diese Arbeit nicht ohne die Unterstützung meiner Freunde und Familie, vor allem der von Christoph und meiner Eltern Karin und Joachim, anfertigen können. Sie haben mir stets den Rücken freigehalten und mich durchweg während meiner Arbeit bestärkt und ermutigt.

Verzeichnis Veröffentlichungen und Vorträge

- K. Lux, L. Henneken, S. Maaß, M. Nowottnick, "Humidity induced failure mechanisms of electronic printed circuit boards (PCBs) during high voltage load", Electronics in Harsh Environments Conference Paper, SMTA Europe, Amsterdam, 2018
- K. Lux, L. Henneken, S. Maaß, M. Nowottnick, "Influence of voltage, electrical field and material ageing on humidity induced failure mechanisms of electronic printed circuit boards (PCBs) during high voltage load", European Corrosion Congress Paper, Krakau, 2018
- K. Lux, L. Henneken, S. Maaß, M. Nowottnick, "Behavior of solder mask and base material of PCBs under harsh environmental conditions and high voltage load", Electronics in Harsh Environments Conference Paper, SMTA Europe, Amsterdam, 2019
- K. Lux, "Humidity induced failure mechanisms of electronic printed circuit boards (PCBs) during high voltage load", Electronics in Harsh Environments Conference Vortrag, SMTA Europe, Amsterdam, 2018
- K. Lux, "High voltage load on PCBs in humid environment", European Corrosion Congress Vortrag, Krakau, 2018
- K. Lux, "PCB materials in high voltage application", Electronics in Harsh Environments Conference Vortrag, SMTA Europe, Amsterdam, 2019

Abkürzungsverzeichnis

ABKÜRZUNG / ELEMENTSYMBOL	BESCHREIBUNG
Al	chemisches Element Aluminium
AMP	<u>A</u> nodisches <u>M</u> igrationsphänomen
At.-%	Atomprozent
Au	chemisches Element Gold
BF-Modus	Hellfeld-Modus am Mikroskop, englisch <u>B</u> right <u>F</u> ield
BM	<u>B</u> asism <u>a</u> terial
BSD	Rückstreudetektor, englisch <u>B</u> ack <u>s</u> cattering <u>D</u> etector
C	chemisches Element Kohlenstoff
CAF	leitfähiges anodisches Filament, englisch <u>C</u> onduc- tive <u>A</u> nodic <u>F</u> ilament
Cl	chemisches Element Chlor
CPS	Zählimpulse pro Sekunde, englisch <u>C</u> ounts <u>p</u> er <u>S</u> ec- ond
CTE	Wärmeausdehnungskoeffizient, englisch <u>C</u> oefficient of <u>T</u> hermal <u>E</u> xpansion
Cu	chemisches Element Kupfer
DF-Modus	Dunkelfeld-Modus am Mikroskop, englisch <u>D</u> ark <u>F</u> ield
ECM	<u>E</u> lektrochemische <u>M</u> igration
EDX	Energie Dispersive Röntgenspektroskopie, englisch <u>E</u> nergy <u>D</u> ispersive <u>X</u> -ray
H	chemisches Element Wasserstoff
HV	Hochspannung, englisch <u>H</u> igh <u>V</u> oltage
iSn	Chemisch Zinn, englisch <u>i</u> mmersion Tin
KOH	Kaliumhydroxid
2K-System	2- <u>K</u> omponenten System
LB	<u>L</u> eiter <u>b</u> ahn
LSL	<u>L</u> ötstop <u>l</u> ack
MFBM	<u>M</u> ultifunktionales <u>B</u> indem <u>i</u> ttel
MW	<u>M</u> ittel <u>w</u> ert

N	chemisches Element Stickstoff
O	chemisches Element Sauerstoff
P	chemisches Element Phosphor
PCB	Leiterplatte, englisch <u>P</u> rinted <u>C</u> ircuit <u>B</u> oard
REM	<u>R</u> asterelektronen <u>m</u> ikroskop
r. h.	Relative Feuchte, englisch <u>r</u> elative <u>h</u> umidity
RT	Raumtemperatur
S	chemisches Element Schwefel
SE	Sekundärelektronendetektor, englisch <u>S</u> econdary <u>E</u> lectron Detector
SIR	Oberflächenwiderstand, englisch <u>S</u> urface <u>I</u> nsulation <u>R</u> esistance
Sn	chemisches Element Zinn
TE	<u>T</u> eilentladungen
T _g	Glasübergangstemperatur
TH-Test	Test unter Temperatur und Feuchte, englisch <u>T</u> em- perature <u>H</u> umidity Test
THB-Test	Test unter Temperatur, Feuchte und elektrischer Spannung, englisch <u>T</u> emperature <u>H</u> umidity <u>B</u> ias Test
TTF	Zeit bis zum Ausfall, englisch <u>T</u> ime <u>T</u> o <u>F</u> ailure
TW	<u>T</u> emperatur <u>w</u> echsel
XPS	Röntgenphotoelektronenspektroskopie, englisch <u>X</u> - Ray <u>P</u> hotoelectron <u>S</u> pectroscopy
XRD	Röntgendiffraktion, englisch <u>X</u> - <u>R</u> ay <u>D</u> iffraction

Formelzeichenverzeichnis

SYMBOL	EINHEIT	BESCHREIBUNG
a	$V^2/\mu m$	Fitparameter für das AMP-Lebensdauermodell
c_{Cl^-}	$mol/m^3 = 10^{-3}M$	molare Konzentration von Chlorionen
$c_{Cl^-,max}$	$mol/m^3 = 10^{-3}M$	maximale Chlorkonzentration an einer Anodenspitze
D	m^2/s	Diffusionskoeffizient
d, d_{LB}	μm	Leiterbahnabstand, Dicke eines Isolators
dm	-	relative Gewichtsänderung von LSL-Proben
E	V/m	elektrische Feldstärke
ε_0	$A \cdot s/(V \cdot m)$	Dielektrizitätskonstante des Vakuums
E_A	J/mol	Aktivierungsenergie
\vec{E}_a	V/m	äußeres elektrisches Feld
$\vec{E}_{a,LB}$	V/m	maximal simulativ ermitteltes elektrisches Feld zwischen den Leiterbahnen
$\vec{E}_{a,S}$	V/m	maximal simulativ ermitteltes elektrisches Feld an der Leiterbahnschleife
E_D	V/m	elektrische Durchschlagsfeldstärke
\vec{E}_{Diel}	V/m	elektrisches Feld im Dielektrikum
ε_r	-	relative Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums
E_{TE}	V/m	elektrische Feldstärke für Teilentladungen
Ext	-	dekadische Extinktion des Lacks
h	μm	Lötstopplackdicke
I	W/m^2	Strahlungsintensität
I_0	W/m^2	Intensität der Strahlung an der Lackoberfläche
k	$\mu m/(V \cdot h)$	Fitparameter für das AMP-Lebensdauermodell
k_B	$m^2 \cdot kg/(s^2 \cdot K)$	Boltzmann-Konstante
λ	nm	Wellenlänge
l	μm	Abstand zwischen anodischen und kathodischen Kupferbalken der Kammstruktur
l_{AMP}	μm	Länge einzelner AMP-Pfade

l'_{AMP}	-	skalierte Längen einzelner AMP-Pfade
l_m	μm	mittlere Länge der AMP-Pfade
$l_{m,ges}$	-	normierte mittlere Gesamtlänge der AMP-Pfade
l_{max}	μm	maximal gemessene AMP-Länge
l'_{max}	$\mu\text{m}/\text{V}^2$	skalierte maximale AMP-Länge
m_{Cl^-}	mg	Gewicht der Chlorionen
m_{LSL}	mg	Gewicht des Lötstopplacks
m_{Probe}	kg	Gewicht der Proben
m_t	kg	Trockengewicht der Proben
N	-	Leiterbahnanzahl
n_{Cl^-}	-	Anzahl Chlorionen
$n_{n,g}$	-	Anzahl AMP einer Gruppe
$n_{n,ges}$	-	Anzahl AMP auf 1000 μm LB-Länge
$n'_{n,g}$	-	normierter Anteil AMP einer Gruppe
$N_{n,g}$	-	über die Testzeit aufsummierte, normierte und eingruppierte AMP-Anzahl
\vec{P}	$\text{A} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	Polarisierung des Materials
ρ_{LSL}	g/cm^3	Dichte des Lötstopplacks
R_{ges}	Ω	gemessener Isolationswiderstand einer Teststruktur
R_K	Ω	elektrischer Isolationswiderstand einer Kammstruktur
R_N	Ω	skalierter elektrischer Isolationswiderstand einer Teststruktur
R_{TW}	Ω	elektrischer Isolationswiderstand einer Teststruktur auf Leiterplatten mit TW
R_V	Ω	elektrischer Vorwiderstand
s	μm	Breite Kupferbalken einer Kammstruktur
t	h, min, s	Zeit
t'	$\text{V} \cdot \text{s}/\mu\text{m}$	gewichtete Zeit
T	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
TE	pC	Teilentladungshöhe
TTF, t_f	s	Zeit bis zum Ausfall

t_M	s	Dauer Messfenster
U	V	elektrische Spannung
u	kg	atomare Masseneinheit
U_D	V	Durchschlagspannung
U_E	V	Teilentladungsaussetzspannung
U_i	V	Teilentladungseinsetzspannung
$U_{i,peak}$	V	Scheitelspannung
V	μm^3	Volumen
v_1	kV/s	Spannungssteigerungsgeschwindigkeit
v_2	kV/s	Spannungsabfallgeschwindigkeit
x	μm	Abstand Leiterbahnspitze zum Kupferbalken einer Kammstruktur
$[X]_{\text{TOT}}$	mol/kg	Gehalt an Element X in einer Lösung
y	μm	Leiterbahnbreite
z	μm	Längen- und Breitenangabe der Füllstoffe

Kurzfassung

Der weltweite Trend zur Elektromobilität führt dazu, dass in den letzten Jahren auch Neuentwicklungen im Bereich der Elektronik in den Fokus gerückt sind. Stand heute (Juni 2020) sind bereits 60 elektrisch angetriebene Fahrzeugmodelle deutscher Hersteller auf dem Markt [1].

Die Weiterentwicklung elektrischer Antriebe stellt Automobilhersteller und deren Zulieferer vor neue Herausforderungen.

Da diese Anwendungen höhere Spannungen - im Bereich von 470-1200 V- als die aktuellen elektronischen Systeme in Kraftfahrzeugen benötigen, ist es von großer Wichtigkeit, das Verhalten der Komponenten unter diesen erhöhten Lasten weiter zu untersuchen.

Dem Verhalten von Leiterplatten (PCB) als mechanischem Träger und elektrischem Verbindungselement der elektronischen Bauelemente und ihren verschiedenen Materialien unter Hochspannung und Feuchtelast kommt dabei eine zentrale Bedeutung zu. Das Verhalten dieser PCB unter den erhöhten Lasten von ausgedehnter Betriebsdauer, Hochspannung und kritischem Feuchteklima ist derzeit Gegenstand intensiver Untersuchungen.

In diesem Zusammenhang werden in der vorliegenden Arbeit Materialuntersuchungen an Leiterplatten mit speziell entworfenen Testlayouts beschrieben und Wirkmodelle zu beobachteten Fehlermechanismen abgeleitet. Mit diesem Verständnis können Maßnahmen zur Zuverlässigkeitssteigerung ergriffen werden.

Der Fokus liegt auf dem Einfluss des Lötstopplacks auf die Hochspannungsfestigkeit der Leiterplatte und einem in dieser Arbeit aufgedeckten, neuartigen, leitfähigen anodischen Migrationsphänomen (AMP). Dieses kann sich unter hohen elektrischen Spannungen unter gleichzeitiger Feuchtelast hauptsächlich im Lötstopplack, aber auch im Basismaterial der Leiterplatte, zwischen gegenpolig geladenen Leiterbahnen ausbilden. Die potenziellen Folgen sind Kurzschlüsse und damit Ausfall der HV-Leiterplatte unter bestimmten Betriebsbedingungen. Diese Arbeit beinhaltet eine detaillierte Beschreibung des neuartigen Phänomens und zeigt Einflussgrößen auf, die die Ausprägung und Intensität des AMP beeinflussen. Sie leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur Definition von Maßnahmen, die das Auftreten von AMP signifikant reduzieren und somit die Zuverlässigkeit der Schaltungen weiter erhöhen.

Zunächst werden einige wichtige Eigenschaften von Leiterplatten und Lötstopplack erläutert, die wesentlich sind für das spätere Verständnis des untersuchten Ausfallmechanismus. Die Durchführung von Lebensdauertests wird besprochen. Es wird ein kurzer Überblick über bereits aus der Literatur bekannte elektrochemische Migrationsphänomene, wie die klassische elektrochemische Migration (ECM) oder das Conductive Anodic Filament (CAF), gegeben. Im

Anschluss werden das neuartige AMP und weitere, im Rahmen der Hochspannungstests von Leiterplatten entdeckte Phänomene vorgestellt. Der experimentelle Grundlagenteil behandelt die in dieser Arbeit untersuchten Leiterplattenstrukturen, ihre Vorbehandlung und den Versuchsaufbau für die durchgeführten HV-SIR-Tests.

Im Ergebnisteil dieser Arbeit werden zunächst Analyseresultate am Lötstopplack vorgestellt. Die Glasübergangstemperatur und Feuchteaufnahme des Lötstopplacks werden ebenso wie dessen elektrische Alterung diskutiert. Simulationen der im Lötstopplack durch die Leiterbahngeometrie vorherrschenden elektrischen Feldstärken sowie Teilentladungsmessungen im Lötstopplack stellen die Grundlage für die weitere Analyse der Einflussfaktoren für die Ausbildung des AMP dar.

Als weiteres Ergebnis der Untersuchungen werden verschiedene Einflussfaktoren auf das AMP diskutiert und analysiert. Aus den chemischen Reaktionsmechanismen und der Materialzusammensetzung des AMP wird ein erstes grundlegendes Modell, das dessen Ausbildung beschreibt, abgeleitet.

Anschließend wird eine detaillierte Untersuchung der AMP in Abhängigkeit von Testzeit, elektrischer Spannung und Höhe des elektrischen Felds durchgeführt.

Aus den abgeleiteten Ergebnissen wird ein Lebensdauermodell für Leiterplatten, die hohen elektrischen Spannungen und Feuchte ausgesetzt sind, aufgestellt. Dieses erlaubt eine theoretische Vorhersage des Ausfallzeitpunkts einer Leiterplatte aufgrund von AMP.

Anhand von Analysen der Feuchteaufnahme, die am Lötstopplack durchgeführt wurden, kann der Einfluss der Lackdicke auf Intensität und Ausprägung des AMP gezeigt werden. Ebenso wird der Einfluss der Lackaushärtung, Temperaturwechselbelastung und Lötstopplackrezeptur auf das AMP besprochen. Auf Basis der Ergebnisse zur Variation der Lackinhaltsstoffe wird ein Wirkmodell aufgestellt, das den Einfluss der Lackinhaltsstoffe auf die Ausbildung des AMP beschreibt.

In einer Zusammenfassung werden aus den Untersuchungen konkrete Empfehlungen abgeleitet, wie die Zuverlässigkeit von Leiterplatten in modernen Anwendungsfällen der Elektromobilität weiter gesteigert werden kann.

Abstract

In recent years, new developments in the field of electronics have become more prominent due to the global trend towards electromobility. As of today (June 2020), 60 models of electrically powered vehicles produced by German manufacturers are already available [1].

The continuous development of electric drives brings new challenges for automotive manufacturers and their suppliers.

Such applications use voltages in the range of 470 V to 1200 V, higher than in the current electronic systems in motor vehicles, making a further investigation of the properties of the components used under these increased loads a priority. A topic of major importance are the properties of the PCB as mechanical carrier and electric interconnection of the components and of its various materials under high voltage and moisture load. Currently, the performance of PCBs under high voltage, critical humid climate conditions and with extended operating time is subject to intensive investigations.

In this context, the work at hand describes studies on PCB materials with specially designed test layouts and develops models for the observed failure mechanisms. The results can be used to derive measures for an increase of HV-PCB reliability.

This work focusses on the analysis of the influence of the solder resist on the high voltage strength of the PCBs and it investigates a conductive anodic migration phenomenon (AMP) which was discovered in the context of the investigations performed. An AMP forms under high electric voltage and simultaneous moisture load between oppositely charged conductive tracks. It is found mainly in the solder resist but also in the base material of the printed circuit board. Potential consequences are short circuits and in consequence failure of the HV printed circuit board. This work contains a detailed description of this new phenomenon and presents variables that influence the characteristics and intensity of the AMP. Therefore, it is an essential contribution to the definition of measures for a significant reduction of the occurrence of AMP and for the further improvement of electronic circuit reliability.

At first, some important properties of PCBs and solder resist essential for the subsequent understanding of the examined failure mechanism are explained. Lifetime tests are discussed. A brief overview of known electrochemical migration phenomena in literature like the classical electrochemical migration (ECM) or the conductive anodic filament (CAF) is given. Subsequently, the new AMP as well as other phenomena discovered during high voltage testing of printed circuit boards are presented. The basic experimental part covers the PCB structures investigated in this work, their pre-treatment and the experimental setup for the performed HV-SIR tests.

Analytical results obtained on the solder resist are presented. The glass transition temperature and moisture absorption of the solder resist as well as its electrical aging are discussed. Simulations of the electric field strengths in the solder resist due to the conductor path geometry as well as partial discharge measurements in the solder resist provide the basis for a further analysis of the factors influencing the formation of the AMP.

As an additional result of the examinations, various factors influencing the AMP are discussed and analyzed. A first basic model describing AMP formation is derived from the chemical reaction mechanisms and the material composition found.

Subsequently, the dependency of AMP formation on test time, electric voltage and electric field strength is investigated.

From the results derived, a lifetime model for printed circuit boards exposed to high electrical voltages and humidity is established. This allows a prediction of the time to failure of a PCB due to AMP.

The influence of resist thickness on the intensity and expression of the AMP is shown based on moisture absorption analyses of solder resist. Likewise, the influence of resist curing, thermal cycling and solder resist formulation on AMP is discussed. A model describing the influence of the resist ingredients on the formation of AMP is derived from the investigation of resist ingredient variations.

The summary describes, based on the investigations, concrete recommendations for a further increase of the reliability of printed circuit boards in modern electromobility application.

I. EINLEITUNG, MOTIVATION UND ZIELSETZUNG DER ARBEIT

Die Automobilindustrie befindet sich im Wandel und steht vor neuen Herausforderungen. Klimaschutz, die Abkehr von fossilen Brennstoffen und die Verringerung des CO₂-Ausstoßes sind in den letzten Jahren in den Fokus der Entwicklung zukünftiger Mobilitätssysteme gerückt. Damit sind nicht nur die Automatisierung und Digitalisierung, sondern zusätzlich die Elektrifizierung des Fahrzeugantriebs ein erklärtes Ziel der Automobilindustrie.

Ein Vorteil in der Verwendung eines Elektromotors gegenüber dem klassischen Verbrennungsmotor ist die deutlich höhere Energieeffizienz [2]. Hinzu kommt eine Verringerung des lokalen CO₂-Fußabdrucks, beispielsweise wird in Innenstädten mit großer Verkehrsdichte weniger CO₂ freigesetzt. Eine verminderte Lärmbelastung und eine gesteigerte Fahrleistung gehören ebenfalls zu den Vorteilen eines elektrifizierten Fahrzeugantriebs.

Nach Zahlen des Bundesministeriums für Wirtschaft sind Stand Juni 2020 bereits 60 elektrische Fahrzeugmodelle deutscher Hersteller auf dem Markt, wobei erwartet wird, dass diese Zahl weiter zunimmt [1]. Nach aktuellen Prognosen [3] werden im Jahr 2030 bereits 55 % der in der EU neuzugelassenen Fahrzeuge vollständig elektrifiziert sein.

Für die Realisierung des elektrischen Antriebs müssen im Fahrzeug höhere Leistungen als bisher bereitgestellt werden. Dies erfordert eine Erhöhung der elektrischen Spannung der im Fahrzeug verbauten Batterie auf bis zu 1200 V, um den Leitungsquerschnitt der Kabel im Fahrzeug gering zu halten, Wärmeverluste zu verringern und Gewicht und Volumen einzusparen.

Die im Elektrofahrzeug verbauten Systeme, wie der DC-DC-Wandler, Antriebs-Leistungselektroniken oder das Batteriesteuergerät, und damit auch die enthaltenen Leiterplatten und ihre Materialien müssen den gestiegenen Spannungsanforderungen gerecht werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein tieferes Verständnis des Verhaltens der Leiterplatten in diesen Systemen und der verwendeten Materialien unter Hochspannungs- (HV) und Feuchtelast zu entwickeln.

Für die Untersuchungen der HV-Zuverlässigkeit werden die Leiterplatten mit Gleichspannungen zwischen 250 V und 1000 V für bis zu 2000 h in beschleunigten Lebensdauertests beaufschlagt. Der Schwerpunkt der Untersuchungen liegt auf der Analyse des Einflusses von Lötstopplack auf die HV-Zuverlässigkeit. Als Teststrukturen werden Leiterbahngeometrien auf der Außenlage gewählt, die, wie später auch im Produkt, vollständig mit Lötstopplack abgedeckt werden. Mit den erzielten Ergebnissen legt die vorliegende Arbeit den Grundstein für eine

Standardisierung zukünftiger HV-Zuverlässigkeitstests in der Automobilindustrie, welche in den aktuellen Normen noch nicht definiert sind.

Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein neuartiges elektrochemisches Migrationsphänomen entdeckt. Bei dem anodischen Migrationsphänomen (AMP) bildet sich eine dendritenähnliche Struktur von der anodischen Leiterbahn in Richtung der kathodischen aus. Überwindet sie den Leiterbahnabstand, kann dies zu Kurzschlüssen und damit zum Ausfall des Systems führen. Damit ist das AMP ein entscheidend die HV-Zuverlässigkeit beeinflussender Faktor. Es tritt unabhängig vom jeweiligen Hersteller bei diversen Lötstopplack- und Basismaterialkombinationen auf.

Die vorliegende Arbeit gibt zunächst einen Überblick über bereits aus der Literatur bekannte elektrochemische Migrationsphänomene. Die Theorie ihrer Ausbildung wird detailliert besprochen. Die Neuheit des in dieser Arbeit erstmalig untersuchten elektrochemischen anodischen Migrationsphänomens AMP wird herausgearbeitet und grundlegende Eigenschaften, die zwingend für seine Ausbildung erfüllt sein müssen, werden diskutiert.

Anschließend folgt eine detaillierte Charakterisierung des AMP. Hierzu gehört eine Materialanalyse sowie eine Diskussion der für die Ausbildung des AMP nötigen Randbedingungen und chemischen Zusammenhänge. Ein Modell wird entwickelt, das die verschiedenen Schritte, die zur Ausbildung des elektrochemischen Migrationsphänomens AMP nötig sind, vorstellt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden detailliert verschiedene, die AMP-Ausbildung entscheidend beeinflussende Faktoren untersucht. Hierzu gehören grundlegende Eigenschaften wie die Glasübergangstemperatur des Lacks zur Bestimmung des Vernetzungsgrads, die Feuchteaufnahme sowie Untersuchungen und Simulationen zur Isolationsfestigkeit des Lötstopplackmaterials. Lackeigenschaften wie die Lackdicke und ein möglicher Einfluss der Vorbeanspruchung der Leiterplatten durch Temperaturwechsel oder verschiedene Aushärtetemperaturen werden ebenfalls besprochen.

Die Ausbildung des AMP in Abhängigkeit von Testzeit, Testspannung und elektrischer Feldstärke wird untersucht. Statistische, die AMP-Ausbildung beschreibende Daten, wie die AMP-Dichte entlang einer Leiterbahn oder die Länge werden bewertet. Ein Lebensdauermodell, das den Einfluss von AMP auf die Leiterplattenzuverlässigkeit beschreibt und die Vorhersage des Ausfallzeitpunkts der Leiterplatte ohne zeitaufwändige Lebensdauertestst erlaubt, wird aufgestellt.

Für die Analyse des Einflusses der Lötstopplackrezeptur auf das AMP werden gezielt einzelne Lackinhaltsstoffe variiert und anschließend die veränderte Lackrezeptur unter Hochspannung und Feuchtelast getestet. Ein Modell zur Beschreibung und Bewertung der Auswirkungen der einzelnen Lackinhaltsstoffe auf den Lötstopplack und das AMP wird erstellt. Die Untersuchungen sind entscheidend für die Entwicklung zukünftiger AMP-resistenter Leiterplattenmaterialien. Empfehlungen für einen AMP-resistenten Lack werden abgeleitet.

Durch die vorliegende Arbeit wird das die Leiterplattenzuverlässigkeit unter HV und Feuchtelast entscheidend beeinflussende elektrochemische anodische Migrationsphänomen aufgedeckt und detailliert charakterisiert. Verschiedene, die AMP-Ausbildung fördernde oder unterdrückende Einflüsse wie Materialeigenschaften des Lötstopplacks und der Einfluss von Belastungsparametern wie der elektrischen Spannung und Feldstärke werden untersucht und beschrieben. Damit kann die Leiterplatte HV-resistent gestaltet werden um beispielsweise elektrische Feldüberhöhungen zu vermeiden. Die vorliegende Arbeit legt einen Grundstein für die Weiterentwicklung HV-resistenter Leiterplatten und ihrer Materialien. Die Entwicklungszeit neuer Systeme kann somit deutlich reduziert werden.

II. GRUNDLAGEN UND STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel werden einige wichtige Grundlagen eingeführt. Dazu gehört eine allgemeine Einführung in die Funktion und Herstellung von Leiterplatte und Lötstopplack in Abschnitt 2.1 beziehungsweise Abschnitt 2.2. In Abschnitt 2.3 werden einige wichtige Grundlagen zu Materialeigenschaften wie der Feuchteaufnahme und Glasübergangstemperatur von Leiterplattenmaterialien beschrieben. Anschließend wird in Abschnitt 2.4 eine kurze Einführung in Lebensdauertests von Leiterplatten gegeben. In Abschnitt 2.5 folgt eine Beschreibung der elektrischen Feldausbildung in Materie mit besonderem Schwerpunkt auf Teilentladungseffekten. Zum Abschluss dieses Grundlagenkapitels werden elektrochemische Migrationsphänomene besprochen sowie bereits aus der Literatur bekannte elektrochemische Migrationsphänomene in der Leiterplatte vorgestellt.

2.1 Aufbau und Funktion einer Leiterplatte

Leiterplatten (PCBs, kurz für englisch Printed Circuit Boards) werden in den meisten elektronischen Geräten verwendet, um Bauelemente sowohl mechanisch zu fixieren als auch elektrisch untereinander zu verbinden. Sie bestehen aus einem Trägermaterial mit einer oder mehreren Verdrahtungsebenen. In der Automobilindustrie finden sie Anwendung in elektronischen Steuergeräten. **Abbildung 1** zeigt beispielhaft die bestückte Leiterplatte eines Motorsteuergeräts.



Abbildung 1: Bestückte Leiterplatte eines Motorsteuergeräts.

Ziel ist es, die verschalteten Bauelemente auf möglichst kleinem Raum unterzubringen, was viele eng beieinander liegende Leiterbahnen bedingt. Eigenschaften, Merkmale und die Herstellung von Leiterplatten sind in zahlreichen Lehrbüchern [4] [5] [6] [7] beschrieben und sollen nachfolgend kurz zusammengefasst werden.

Erfunden wurde die Leiterplatte Anfang des 20. Jahrhunderts. Seitdem wird sie stetig weiterentwickelt, um den steigenden technologischen Anforderungen gerecht zu werden. Beispiele

hierfür sind die stetige Miniaturisierung und die steigenden Anforderungen an die Produktlebensdauer. Aber auch immer höheren elektrischen Leistungen muss die Leiterplatte gerecht werden. Hierzu gehören im Automobilbereich die höheren elektrischen Spannungen und Ströme durch die Elektrifizierung des Fahrzeugantriebs.

Leiterplatten sind Träger elektrischer und elektronischer Bauelemente und stellen die elektrische Verbindung zwischen den Bauelementen her. Bei einer Single-Layer PCB sind nur auf eine Leiterplattenoberfläche, bei einer Double-Layer PCB auf beiden Seiten der Leiterplatte elektrisch leitfähige Strukturen aufgebracht. Werden innerhalb der Leiterplatte auf weiteren Innenlagen elektrisch leitfähige Verbindungen eingefügt, so spricht man von einer Multi-Layer PCB oder auch Mehrlagenleiterplatte. In **Abbildung 2** ist beispielhaft eine Standard 6-Lagen Leiterplatte im Querschnitt skizziert.



Abbildung 2: Standard Multi-Layer Leiterplatte mit 6 Lagen und beidseitig aufgetragenem Lötstopplack im Querschnitt. Die einzelnen Komponenten werden im Text erläutert.

Die unterschiedlichen Verdrahtungsebenen mit den Kupferleiterbahnen sind durch das elektrisch isolierende Basismaterial voneinander getrennt. Um die Leiterbahnen auf den Außenlagen vor Oxidation, Umwelteinflüssen und während des Lötprozesses zu schützen, sind sie mit Lötstopplack abgedeckt.

Im Nachfolgenden werden einzelne Prozessschritte der Leiterplattenherstellung beschrieben. Man unterscheidet zwei Herstellungsarten [8], die Panel- und die Pattern-Plating Technik. Im Folgenden wird der Herstellungsprozess beispielhaft für die Panel-Plating Technik erläutert. Das für die Herstellung der Leiterplatte benötigte Basismaterial liegt dem Leiterplattenhersteller zu Beginn des Herstellungsprozesses in zwei Materialformen vor, dem sogenannten Core- und dem Prepreg-Material (vorimprägniertes Material, englisch pre impregnated laminate). Das Core-Material besteht aus glasfaserverstärktem Epoxidharz mit Füllstoffen und wird vollständig ausgehärtet beidseitig kupferkaschiert geliefert, meist mit 17,5 µm oder 35 µm Nominalkupferdicke.

Das Prepreg-Material besteht meist aus demselben elektrisch isolierenden Material wie der Core, wird aber nicht vollständig ausgehärtet geliefert. Es dient zum späteren Verkleben der Core-Materialien unter Druck und Temperatur um die Leiterplatte aus den verschiedenen Lagen aufzubauen.

Zu Beginn der Leiterplattenherstellung wird das Lochbild in den Core gebohrt und mit einer elektrisch leitfähigen Schicht überzogen. Über das Lochbild werden später die elektrischen Verbindungen zwischen den Leiterbahnen auf den verschiedenen Leiterplattebenen hergestellt und außenliegende Bauelemente elektrisch an innenliegende Leiterbahnen angeschlossen. Nach dem Bohren des Lochbilds wird in einem chemischen Prozess Kupfer galvanisch auf die Kupferkaschierung und in das Lochbild abgeschieden. Anschließend wird das Kupfer des Cores strukturiert. Hierzu wird die Leiterplatte beidseitig mit einem lichtempfindlichen Foto-Resist beschichtet, auf den anschließend der das spätere Leiterbahnbild enthaltende Negativ-Film aufgebracht wird. Durch die im nächsten Schritt durchgeführte Belichtung mit UV-Licht wird so nur der Resist belichtet, der auch das spätere Leiterbahnbild enthält. Der belichtete Foto-Resist schützt die Leiterbahnstruktur im nachfolgenden Ätzprozess, in welchem die nicht-belichteten Bereiche des Foto-Resists sowie das darunterliegende Kupfer entfernt werden. Durch den Belichtungs- und Ätzprozess der Kupferleiterbahnen entsteht der typische Leiterbahnquerschnitt mit der Ätzkante, skizziert in **Abbildung 3**.

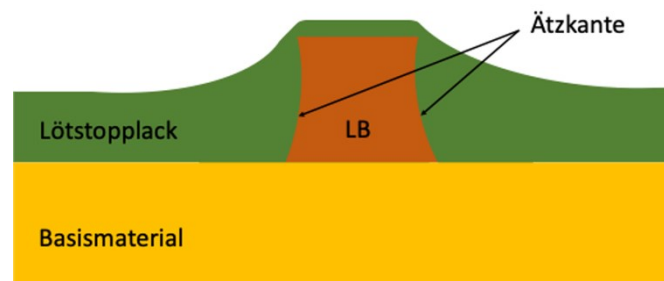


Abbildung 3: Skizzierte Leiterbahn (LB) auf Basismaterial, abgedeckt mit Lötstopplack im Querschnitt. Markiert ist die Ätzkante.

Nach dem Ätzprozess wird der Foto-Resist entfernt. Handelt es sich um eine Mehrlagenleiterplatte, wird anschließend unter Druck und Temperatur über je eine zwischenliegende Prepregschicht der nächste beidseitig kupferkaschierte Core aufgebracht. Handelt es sich bei dem strukturierten Core um die Außenlage der Leiterplatte, wird Lötstopplack aufgebracht.

Damit die darüberliegende Schicht eine gute Haftung zum Core aufweist, wird die Kupferoberfläche zuvor entweder mechanisch oder chemisch angeraut.

Nach Aufbringen des Lötstopplacks werden nicht mit Lötstopplack abgedeckte Kupferoberflächen üblicherweise über einen Chemisch-Zinn-Prozess verzinnt. Dieses dient als Oxidationsschutz und Lötfläche für die nach der Leiterplattenfertigung aufgebrachten Bauelemente.

2.2 Aufbau und Funktion von Lötstopplack

Das Lötstopplackhandbuch IPC-HDBK-840 [9] definiert die Lötstopmmaske als schützendes Coating, das viele unterschiedliche Funktionen in der Leiterplattenherstellung und dem finalen Leiterplattenprodukt erfüllt. Eine der Hauptaufgaben besteht darin, die Leiterbahnen während des Bestückens und Lötens der Leiterplatte vor Wechselwirkung mit dem Lot zu schützen. Eine weitere Anforderung an den Lötstopplack abseits des Lötprozesses besteht darin, das Laminat, Durchkontaktierungen und Leiterbahnen vor Verschmutzungen und Materialalterung zu schützen. Des Weiteren wirkt die Lötstopmmaske zwischen Komponenten und Leiterbahnen als Isolator mit definierten dielektrischen Eigenschaften. So weist Lötstopplack mit $\sim 10^8 \text{ V/m}$ eine weit höhere elektrische Durchbruchfeldstärke auf als Luft mit $\sim 10^6 \text{ V/m}$ [10]. Die IPC-SM-840E [11] definiert im Detail die Anforderungen, denen die Lötstopmmaske gerecht werden muss.

Dort wird unter anderem gefordert, dass das Lötstopppmaterial elektro(chemische) Migration und andere Formen von schädlichem oder leitfähigem Wachstum verzögern muss.

Alle in dieser Arbeit untersuchten Lötstopplacke basieren auf einem Epoxidharz-Acrylatgemisch. Jeder Lötstopplacklieferant besitzt seine eigene geheime Rezeptur, die für unterschiedliche Anwendungsfälle optimiert und angepasst wird. In diesem Abschnitt wird beispielhaft für die in dieser Arbeit verwendeten Lackvarianten die allgemeine Zusammensetzung sowie der Vernetzungs- und Aushärtungsprozess von Lötstopplack beschrieben. Alle in dieser Arbeit betrachteten Lötstopplacke sind Zweikomponenten-Systeme mit Inhaltsstoffen wie in **Tabelle 1** aufgeschlüsselt. Die Basisformulierung des Lötstopplacks wird nachfolgend als Typ X beschrieben.

Tabelle 1: Allgemeine Übersicht der Inhaltsstoffe der A- und B-Komponente eines 2K-Lacksystems vom Typ X [12] [13].

	A-KOMPONENTE	B-KOMPONENTE
INHALT	<ul style="list-style-type: none">- multifunktionales Bindemittel- Beschleuniger- Photoinitiatoren- Füllstoffe- Dispergiermittel- Mattierungsmittel- sonstige Additive (z.B. Entschäumer)	<ul style="list-style-type: none">- Epoxidharz

Die Prozessschritte bei der Herstellung, Belichtung und Aushärtung sind in ihrer zeitlichen Reihenfolge in **Abbildung 4** aufgeführt. Optional vor oder nach dem Einbrennen kann mit UV-Licht, dem sogenannten UV-Bump, die Lackoberfläche versiegelt und die ionische Kontamination verringert werden. Lacktyp X ist ein photostrukturierbarer Lötstopplack, der thermisch sowie unter UV-Strahlung vernetzt.

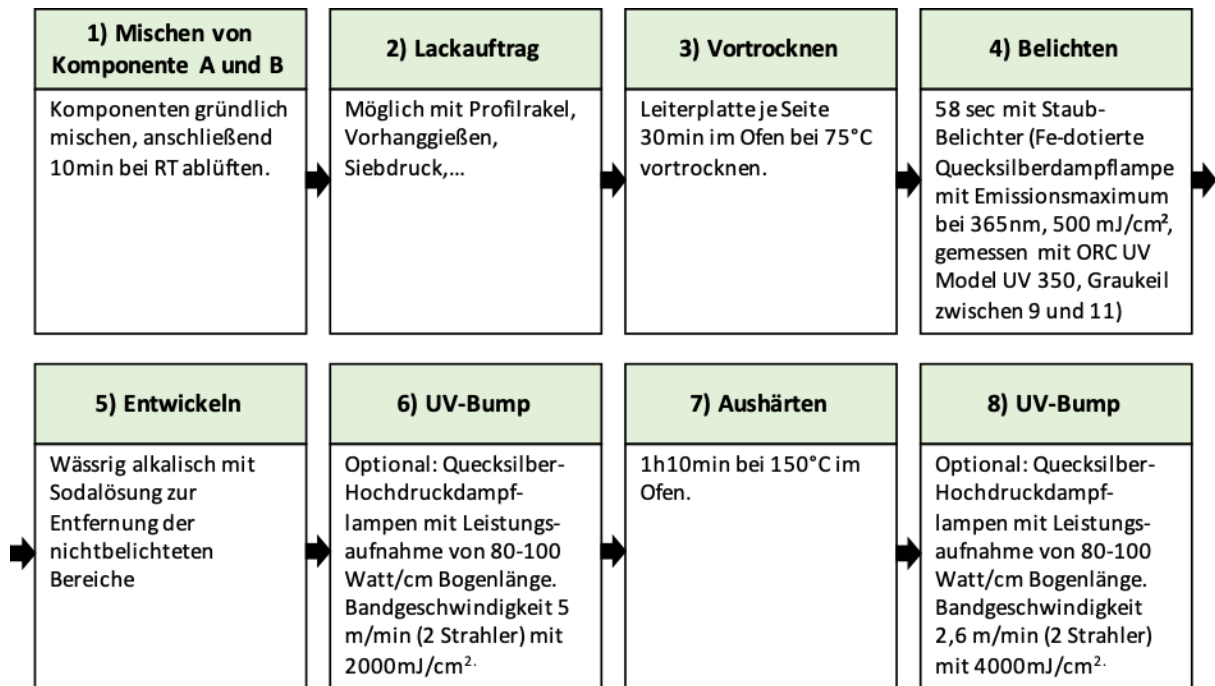


Abbildung 4: Prozessschritte für die Belichtung und Aushärtung von Lötstopplack des Typs X [13] [94].

Das multifunktionale Bindemittel in der A-Komponente, skizziert in **Abbildung 5**, besitzt eine Epoxidgruppe mit angehängter Carboxylgruppe sowie eine Acrylgruppe mit polymerisierbarer Doppelbindung. Die Acrylgruppe ist für Vernetzung unter UV, die Carboxylgruppe für die thermische Vernetzung verantwortlich. Die einzelnen Vernetzungsreaktionen werden im Folgenden beschrieben.

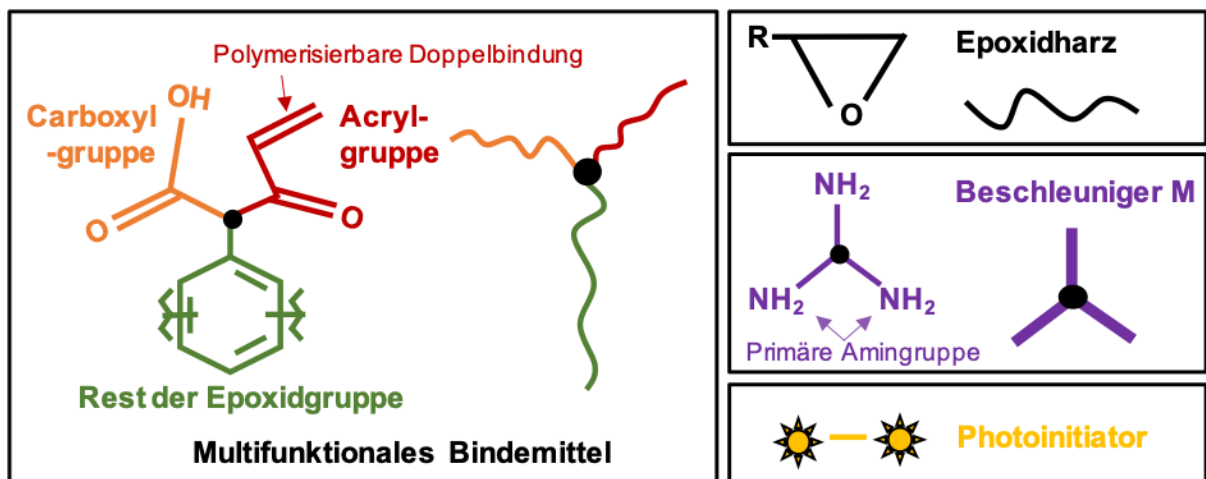


Abbildung 5: Modell der sich während der Aushärtung des Lötstopplacks vom Typ X vernetzenden Komponenten aus Tabelle 1 jeweils als vereinfachte Strukturformel und Prinzipdarstellung. Es sind lediglich die an der Vernetzungsreaktion teilhabenden funktionalen Gruppen verzeichnet. Mit R ist der Rest verzeichnet, der schwarze Punkt in der Molekülmitte steht stellvertretend für weitere Molekülteile, die aber nicht an der Vernetzungsreaktion teilhaben.

2.2.1 Vernetzung des Lötstopplacks

Für die UV-Belichtung des Lacks wird auf den auf die Leiterplatte aufgetragenen Lötstopplack ein lichtempfindlicher Negativfilm aufgebracht. Durch Photomaskentechnik lassen sich Bereiche definieren, die auf der Leiterplatte lötstoppmaskenfrem verbleiben sollen. Durch den lichtdurchlässigen Bereich einer Photomaske wird der Lack durch UV-Bestrahlung belichtet und vernetzt sich. In den lichtundurchlässigen Bereichen bleibt der Lack unbelichtet und unvernetzt. Durch die Bestrahlung mit UV-Licht werden die Photoinitiatoren homolytisch gespalten und es entstehen, wie in **Abbildung 6** in Schritt 1 gezeigt, zwei Radikale.

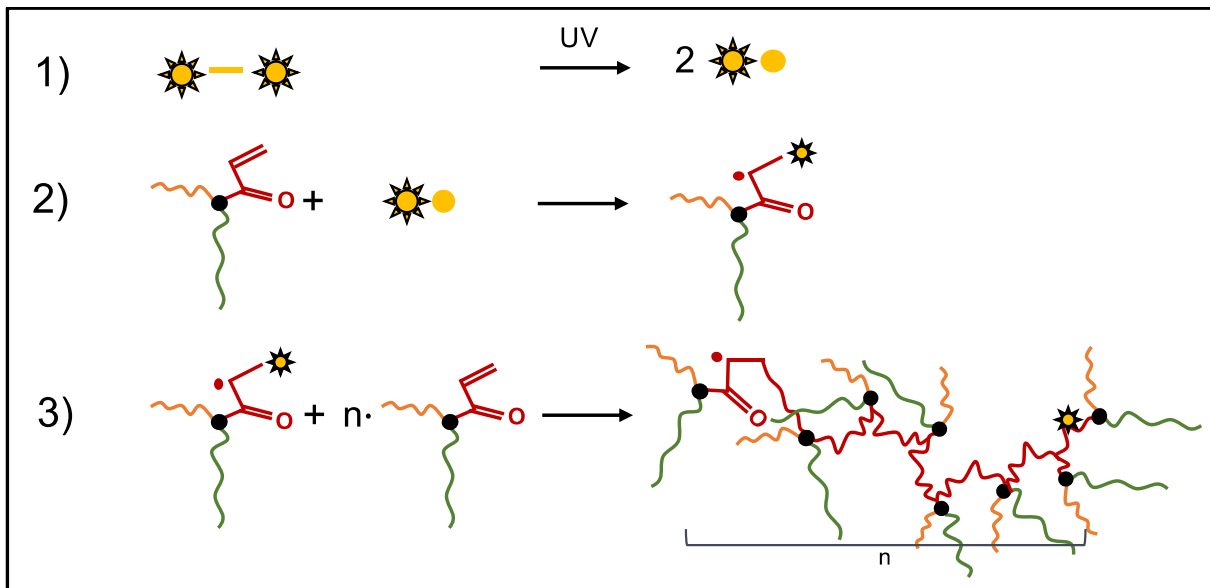


Abbildung 6: Modell der Vernetzungsreaktion des Lötstopplacks vom Typ X [95] unter UV-Bestrahlung in Prinzipdarstellung. Die skizzierten Einzelkomponenten können Abbildung 5 entnommen werden.

Das Photoinitiatorradikal reagiert im nachfolgenden Schritt 2 mit der Acrylgruppe des multifunktionalen Bindemittels und radikalisiert diese. Dadurch kann diese weitere Acrylgruppen radikalisieren und sich mit diesen vernetzen. Die Radikalreaktion stoppt erst, wenn zwei bereits radikalisierte Acrylgruppen aufeinandertreffen. Die Photoinitiatoren haben nur eine sehr geringe Radikalisierungsreichweite von etwa 1 nm [14]. In Bereichen, die nicht mit UV-Strahlung aktiviert wurden, findet daher keine Radikalisierung der Acrylgruppen statt und somit auch keine Vernetzungsreaktion. Nach der Belichtung wird der Lack mit wässrig alkalischer SodaaLösung (Na_2CO_3) entwickelt. Die SodaaLösung reagiert nur mit den Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels in unvernetzten Bereichen. Die vernetzten Bereiche sind hingegen dicht polymerisiert und erlauben kein Eindringen der SodaaLösung. Der Lötstopplack wird wasserlöslich in Bereichen, in welchen die SodaaLösung mit den Carboxylgruppen reagiert, und im nachfolgenden Schritt durch Spülen entfernt.

Nach der Belichtung des Lacks wird er thermisch ausgehärtet. Die während der thermischen Aushärtung des Lacks, der sogenannten Endhärtung, stattfindenden Vernetzungsreaktionen

sind **Abbildung 7** zu entnehmen. Das Epoxidharz in Komponente B reagiert als Härter mit den Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels in Komponente A. Parallel dazu findet die in **Abbildung 7** in Vorgang 4.2 gezeigte Reaktion statt, in welcher das Epoxidharz in Komponente B mit dem Beschleuniger in Komponente A über die primären Amingruppen reagiert. Dabei liegt der Reaktionsschwerpunkt auf Seiten der Carboxylgruppen, da die Reaktion des Beschleunigers M mit dem Epoxidharz langsamer erfolgt.

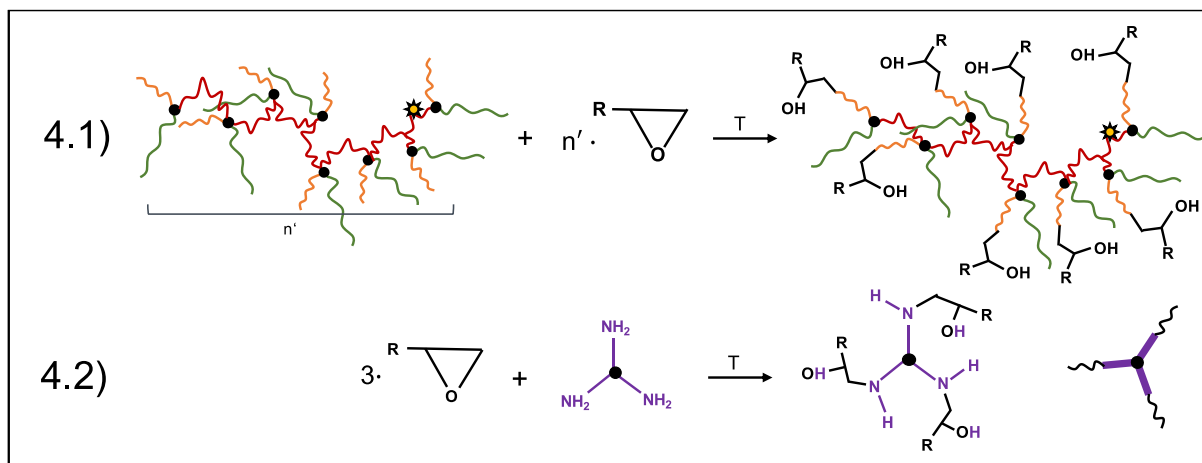


Abbildung 7: Modell der Vernetzungsreaktion der thermischen Aushärtung (T) des Lötstopplacks vom Typ X [95] als vereinfachte Strukturformel und Prinzipdarstellung. Die Vorgänge 4.1 und 4.2 geschehen parallel. Die Molekülreste R enthalten ebenfalls reaktionsfähige Gruppen und können so für eine weitere Vernetzung des Lacks sorgen. Die skizzierten Einzelkomponenten können **Abbildung 5** entnommen werden.

2.2.2 Füllstoffe und Dispergiermittel

In diesem Abschnitt werden die Funktionsweise eines Dispergiermittels im Lötstopplack sowie die Eigenschaften und die Zusammensetzung von Füllstoffen im Lötstopplack erklärt.

Unter Dispergieren wird im Allgemeinen das homogene Verteilen der Füllstoffpartikel im Epoxy-Acrylat verstanden. Das Epoxy-Acrylat wird im Folgenden auch als Bindemittel bezeichnet. Für eine homogene Verteilung der Füllstoffe müssen die Haftkräfte der Füllstoffe zueinander, beispielsweise die Van-der-Waals-Kräfte, überwunden werden, was durch Verrühren der Füllstoffe im Lack erreicht wird [15]. Um eine erneute Flokkulation der Füllstoffe zu vermeiden, werden sogenannte Dispergieradditive beigegeben. Diese haften an der Oberfläche der Füllstoffe und verhindern so das erneute Agglomerieren der Füllstoffe nach dem Verrühren. Des Weiteren setzen sie die Oberflächenspannung des Epoxy-Acrylats soweit herunter, dass eine Benetzung des Füllstoffs mit dem Polymer erfolgen kann.

Dispergiermittel sind chemische Verbindungen mit hydrophilen und lipophilen Eigenschaften, sogenannte Tenside. Man unterscheidet zwischen kontrolliert flokkulierenden und deflokkulierenden Dispergiermitteln. Kontrolliert flokkulierende Dispergiermittel wirken viskositätsreduzierend, deflokkulierende viskositätssteigernd. Da die Dispergieradditive D_A, D_B und D_C, die später

in dieser Arbeit im Rahmen von Versuchen eingesetzt werden (Abschnitt 6.5), alle eine deflokkulierende Wirkung haben, wird nachfolgend nur diese Wirkungsweise erläutert.

Dispergiermittel sind auf die Eigenschaften der zu benetzenden Füllstoffe angepasst [16]. Sie adsorbieren an der Oberfläche des Füllstoffs und bilden so eine Brücke zwischen Bindemittel und Füllstoff. Die drei möglichen Wirkungsweisen der deflokkulierenden Dispergiermittel sind in **Abbildung 8** skizziert. Die Modelle für die Wirkungsweise der in dieser Untersuchung verwendeten Dispergiermittel sind den Quellen [17] [14] [15] [18] [19] und den Broschüren verschiedener Hersteller [20] [21] [22] [23] entnommen.

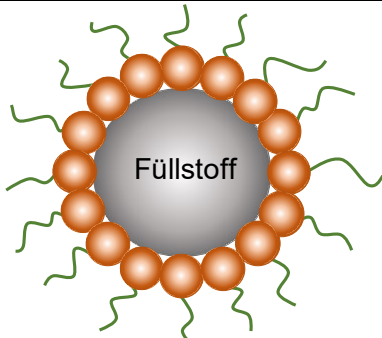
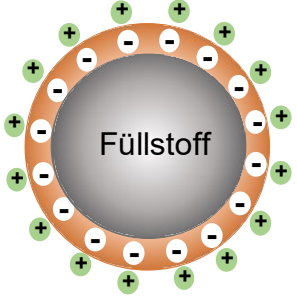
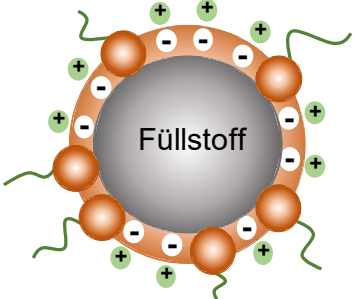
STERISCHE STABILISIERUNG	ELEKTROSTATISCHE STABILISIERUNG	ELEKTROSTERISCHE STABILISIERUNG
		

Abbildung 8: Wirkungsweisen der deflokkulierenden Dispergiermittel. Sterische, elektrostatische und elektrosterische Stabilisierung.

Man unterscheidet elektrostatische Stabilisierung, sterische Stabilisierung und eine Kombination der beiden, die elektrosterische Stabilisierung. In lösemittelhaltigen oder polymeren Systemen wie im Falle des Lötstopplacks wird das System der sterischen Stabilisierung verwendet. Diese, welche auch die Dispergieradditive D_A , D_B und D_C nutzt, soll im Folgenden näher erläutert werden.


HAFTGRUPPE/ ANKERGRUPPE	SOLVATISIERBARES MOLEKÜLSEGMENT
	

Abbildung 9: Aufbau eines sterisch wirkenden Dispergieradditivs.

Abbildung 9 zeigt den Aufbau des sterisch stabilisierenden Additivs mit Tensidcharakter. Es besteht aus einer Haftgruppe, auch Ankergruppe genannt, und einem solvatisierbaren Molekülsegment. Die Haftgruppe besitzt eine funktionale Gruppe mit Affinität zur Füllstoffoberfläche, die Art der Füllstoffoberfläche gibt die Art der Haftgruppe vor. Für eine optimale Stabilisierung besteht ein Additiv oft aus einem solvatisierbaren Molekülsegment mit mehreren Haftgruppen. Die Dispergiermittel D_A und D_B verfügen über Haftgruppen mit Carboxylgruppen, wodurch sie einen sauren Charakter aufweisen. Das Dispergiermittel D_C hat einen aminischen, also eher basischen Charakter. Das solvatisierbare Molekülsegment besteht aus einer bindemittelverträglichen Polymerkette. Es ist dabei auch möglich, dass an der Haftgruppe mehr als ein solvatisierbares Molekülsegment haftet. Die Polymerkette sollte möglichst weit ins Bindemittel ragen, um die Annäherung eines anderen Füllstoffs zu verhindern. Sie sollte sich auch nicht in der Nähe der Füllstoffe verknoten, da dies zu Instabilitäten führt und die Füllstoffe nicht mehr stabil dispergiert sind (möglich unter anderem durch Mischen mit falschem Lösemittel [15]). Das Lackbindemittel kann mit dem solvatisierten Molekülsegment in Wechselwirkung treten und so die Adsorptionsschicht verstärken. Das Bindemittel und das solvatisierbare Molekülsegment müssen gut miteinander verträglich sein, was bedeutet, dass beide über eine ähnliche Polarisierung und ähnliche Löslichkeitsparameter verfügen sollten [19].

Reicht die Menge des beigegebenen Dispergiermittels nicht aus, oder wird ein unpassendes Dispergiermittel verwendet, kann es zur Bildung von Agglomeraten, das heißt lokalen Füllstoffanhäufungen, kommen.

Im Folgenden werden typische in Lötstopplack eingesetzte Füllstoffe beispielhaft für Lackvariante A1 vorgestellt und ihre Eigenschaften erläutert. Lackvariante A1 enthält im Ursprungszustand Talkum und Quarz als Füllstoffe. Zusätzlich wird dem Lack Quarz als Mattierungsmittel beigegeben. Bariumsulfat wurde dem Lack für die Untersuchungen in Abschnitt 6.5 beigegeben und wird aus diesem Grund ebenfalls vorgestellt.

Talkum ist chemisch inert, weist eine niedrige Mohssche Härte auf und wird Lacken häufig aufgrund seiner Barrierewirkung beigegeben. Durch die lamellar geformten Füllstoffe werden die Diffusionswege durch den Lack verlängert und Korrosionsvorgänge können so verzögert oder verhindert werden [17]. Die Beigabe von Talkum erhöht darüber hinaus die Hydrophobie und die Haftung des Lötstopplacks auf beispielsweise metallischen Substraten, was zum weiteren Korrosionsschutz beiträgt.

Quarz ist wie Talkum chemisch inert, besitzt aber eine hohe Mohssche Härte. Aus diesem Grund wird es dem Lack oftmals beigegeben um ihn kratzfester zu gestalten.

Bariumsulfat ist ebenfalls chemisch inert. Im Bereich der mineralischen Füllstoffe besitzt es die größte Dichte. Durch seine im Vergleich zu Talkum und Quarz niedrige Ölzahl hat Bariumsulfat einen niedrigen Bindemittelbedarf, wodurch es zu verminderter Lackverdickung kommt. Details zu Ölzahlen und den Füllstoffdichten sind in **Tabelle 31** im Anhang IX aufgeführt.

Die Füllstoffe Talkum und Quarz und das Mattierungsmittel wurden auf ihre Größenverteilung und Zusammensetzung im Anlieferzustand, wie sie auch in Lackvariante A1 vorkommen, mit dem REM-EDX mit dem Sekundärelektronendetektor unter Hochvakuum untersucht. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 10** und **Abbildung 11** aufgeführt, in **Abbildung 12** werden die Füllstoffe im Harzverbund von Lackvariante A1 gezeigt.

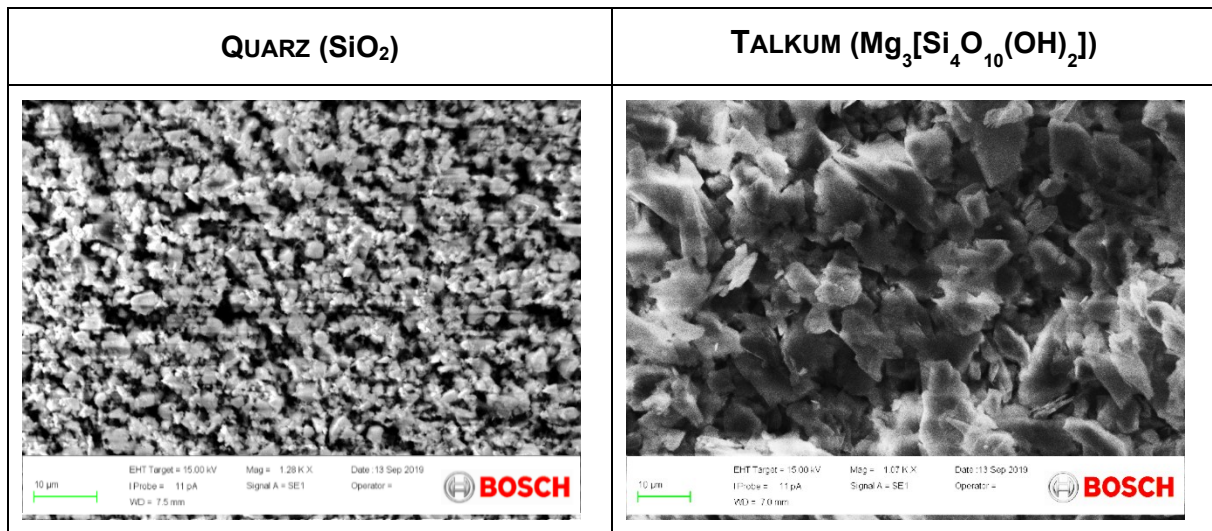


Abbildung 10: REM-Aufnahmen der in der Lackvariation auf Basis von Lackvariante A1 verwendeten Füllstoffe Quarz und Talkum mit dem Sekundärelektronendetektor.

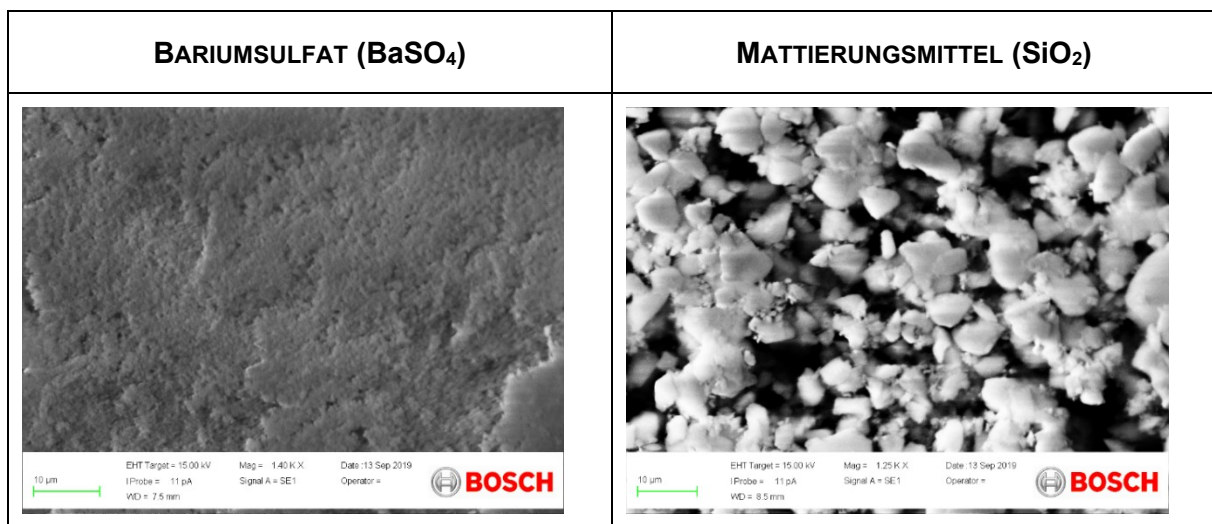


Abbildung 11: REM-Aufnahmen des in der Lackvariation auf Basis von Lackvariante A1 verwendeten Füllstoffs Bariumsulfat und dem Mattierungsmittel mit dem Sekundärelektronendetektor.

Talkum weist eine plättchenförmige Struktur mit im Mittel circa $10\text{ }\mu\text{m}$ Länge auf. Die Quarzmehlpartikel sind deutlich kleiner und runder. Sie weisen im Mittel laut Hersteller etwa $1,7\text{ }\mu\text{m}$ im Durchmesser auf. Das Mattierungsmittel besteht wie das Quarzmehl nach Angabe des Herstellers aus Siliziumdioxid. Dies bestätigt auch die Atomzusammensetzung, die mit dem REM-

EDX ermittelt wurde. Im Gegensatz zum Füllstoff Siliziumdioxid sind diese Partikel mit abgeschätzt 5 µm im Mittel deutlich größer, die Form ist wieder rundlich.

Laut Hersteller weisen die Bariumsulfat-Teilchen etwa 0,2 µm im Durchmesser auf und verfügen wie das Siliziumdioxid über eine eher rundliche Struktur. Weder die Füllstoffe noch das Mattierungsmittel sind oberflächenbehandelt durch beispielsweise Silane.

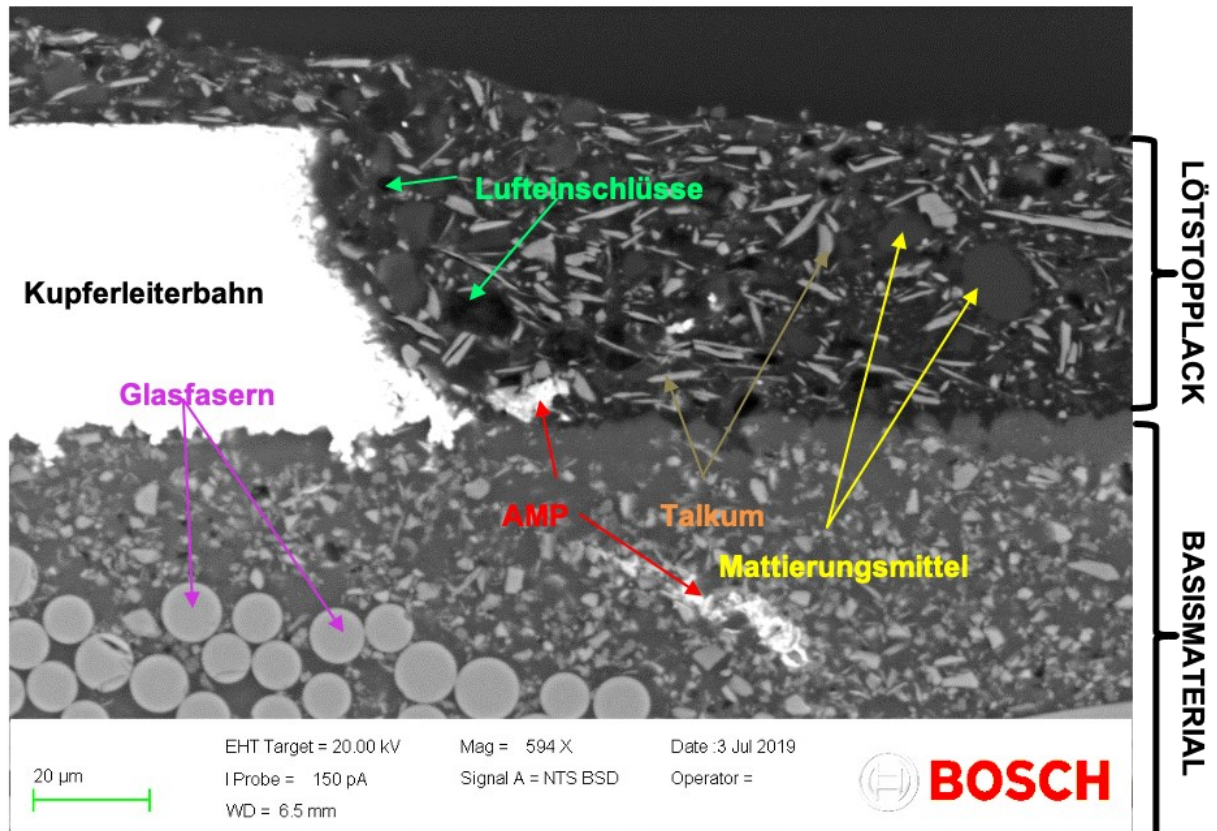


Abbildung 12: Querschliff einer Leiterplatte mit Lackvariante A1, untersucht mit dem REM mit BSD-Detektor.

2.3 Materialeigenschaften von Lötstopplack

In diesem Abschnitt werden zwei grundlegende Materialeigenschaften von polymeren Materialien wie Lötstopplack vorgestellt. Abschnitt 2.3.1 beschreibt die Eigenschaft der Glasübergangstemperatur, Abschnitt 2.3.2 behandelt Theorien zur Feuchtaufnahme und Feuchtediffusion durch ein Polymer.

2.3.1 Glasübergangstemperatur

Die Glasübergangstemperatur (T_g) gibt die Temperatur an, bei der die Eigenschaften eines amorphen Polymers oder in den amorphen Bereichen eines teilweise kristallinen Polymers unter Temperatureinwirkung vom festen, glasartigen in den zähflüssigen, gummiartigen Zustand übergehen, wobei mit steigender Temperatur die Beweglichkeit der Polymerketten stetig zunimmt [24] [25].

Als „freies Volumen“ in Flüssigkeiten oder Festkörpern wird das Volumen bezeichnet, dass nicht mit Molekülen (Polymerketten) besetzt ist. Es kann von den Polymerketten für Rotations- und Translationsbewegungen genutzt werden, was die mechanische Verformbarkeit des Polymers beeinflusst [24] [26]. Eine Erniedrigung der Temperatur einer Polymerschmelze führt zu einer Verringerung des freien Volumens mit einhergehender Verdichtung des Polymers [26] [27].

Die Glasübergangstemperatur ist die Temperatur, bei der die Moleküle in der Schmelze erstarren [26] [28]. Sie hängt ab von Parametern wie der chemischen Struktur, der Anzahl polarer Gruppen, der Polymerkettenflexibilität (wie starr sind die Polymersegmente aneinandergelagert), der Molmasse oder auch der Anzahl an Verzweigungen der Polymerkette [24] [26] [29].

2.3.2 Feuchtaufnahme

Es gibt unterschiedliche Theorien, in welcher Form absorbiertes Wasser im Polymer vorliegen kann. Eine Theorie beschreibt, dass die Feuchtigkeit durch Diffusionsprozesse in das freie Volumen des Polymers gelangt, wobei die Wechselwirkungen des Wassermoleküls mit dem Polymer keine Rolle spielen. Eine andere Theorie besagt, dass das absorbierte Wasser mit den hydrophilen polaren Gruppen des Polymers koppelt [30] [31].

In der Literatur finden sich Untersuchungsergebnisse, dass Materialien mit niedriger T_g mehr Feuchte aufnehmen als mit höherer T_g [32]. Dem gegenüber stehen Ergebnisse, dass eine höhere T_g für eine erhöhte Feuchtaufnahme sorgt [33] [34].

Gilormini und Verdu [30] beschreiben Materialien mit viel freiem Volumen, aber einer geringen Feuchtaufnahme und vermuten, dass das freie Volumen für die Diffusion der Feuchtigkeit verantwortlich ist. Ein Vergleich unterschiedlicher Polymerfamilien zeigt, dass die Anzahl der polaren Gruppen im Material die absorbierte Feuchtemenge widerspiegeln kann.

Die Mechanismen der Feuchteaufnahme von Polymeren werden in [35] [36] beschrieben und können dort detaillierter nachgelesen werden. Die meisten Polymere absorbieren Feuchte nach den Gesetzen der Fickschen Absorption. Die Feuchteaufnahme erfolgt dabei durch Diffusion von Wassermolekülen in die Materialstruktur des Polymers. Unter Diffusion wird dabei der durch zufällige Molekularbewegungen hervorgerufenen Transport von Materie, im Falle der Feuchteaufnahme von Wasser, von einem Ort eines Systems zu einem anderen verstanden, wodurch Konzentrationsunterschiede abgebaut werden [37]. Dabei ist die Transportgeschwindigkeit proportional zum Konzentrationsgradienten der eindiffundierenden Feuchte. Der zugehörige Proportionalitätsfaktor D , der Diffusionskoeffizient, ist dabei abhängig von der Umgebungstemperatur.

Häufig finden sich in der Literatur Darstellungen der absorbierten Feuchtemasse in Abhängigkeit der Quadratwurzel der Zeit [37] [38]. Diese Darstellung macht es möglich, aus der initialen Steigung der Kurve den Diffusionskoeffizienten zu ermitteln. Die Feuchteabsorption erfolgt, bis das Maximum der Feuchteaufnahme der Probe erreicht ist.

2.4 Allgemeine Einführung in Lebensdauertests von Leiterplatten

Um die Alterung der Leiterplatten im Feld zu simulieren und potentielle Fehlerbilder schon vor der Serienproduktion des Produkts aufzudecken und zu beseitigen, werden im Rahmen der Leiterplattenentwicklung Lebensdauertests durchgeführt. Als Alterungsparameter werden Temperatur und Feuchte (TH-Tests, englisch Temperature Humidity) sowie teilweise zusätzlicher Spannungseinfluss (THB-Test, englisch Temperature Humidity Bias) verwendet. Der Zustand der Leiterplatte wird während des Tests mittels einer elektrischen Widerstandsmessung (SIR-Test, englisch Surface Insulation Resistance) überprüft. In dieser Arbeit werden die auf diese Weise durchgeführten Tests wie in der Literatur üblich [39] kurz als SIR-Tests bezeichnet, beziehungsweise als Hochvolt-SIR-Tests (HV-SIR-Tests), da sie im Vergleich zu aktuellen SIR-Tests unter erhöhten elektrischen Spannungen bis 1000 V durchgeführt werden.

Während der Lagerung der Test-Leiterplatten in der Klimakammer wird elektrische Spannung an die Teststrukturen angelegt. Der SIR-Wert ist definiert als der elektrische Widerstand zwischen zwei durch dielektrische Materialien getrennte elektrische Leiter [39] und wird kontinuierlich über die Testzeit protokolliert.

In der Automobilindustrie wird eine zu erreichende Lebensdauer des Produkts von typischerweise 15 Jahren angestrebt. Um die Durchführung der Lebensdauertests im Zeitrahmen des Entwicklungszyklus zu ermöglichen, werden die Zuverlässigkeitstests in der Produktentwicklung beschleunigt durchgeführt. Wie stark sich die gewählten Umweltbedingungen und die damit verbundene Beschleunigung auf die Alterung der Leiterplatte auswirken, wird durch zwei grundlegende Modelle beschrieben [40], das Arrhenius-Modell und das Eyring-Modell. Das Arrhenius-Modell gibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit einer chemischen Reaktion von der Temperatur T , der Aktivierungsenergie E_A , der Boltzmann-Konstante k_B und einer Konstante A an. Für den Ausfallzeitpunkt t_f gilt, da dieser invers proportional zur Reaktionsgeschwindigkeit ist [41]:

$$t_f = A \cdot \exp\left(\frac{E_A}{k_B \cdot T}\right) \quad (1)$$

Aus dem Arrhenius-Modell lassen sich beschleunigte Testbedingungen ableiten [40]. Dabei ist zu beachten, dass durch die Temperaturerhöhung der Schädigungsmechanismus durch Überschreiten von Aktivierungsenergien nicht verändert wird. Nach den beschleunigten Testbedingungen halbiert eine Temperaturerhöhung um 10 °C in etwa die Lebensdauer des Produkts. Das Eyring-Modell basiert auf Gesetzen der Quantenmechanik und beschreibt wie auch die Arrhenius-Gleichung die Reaktionsrate eines chemischen Degradationsprozesses. Mit dem generalisierten Eyring-Modell können beschleunigte Lebensdauertests in Abhängigkeit der

Temperatur und einer weiteren Variablen beschrieben werden. Das Modell ähnelt einer erweiterten Arrhenius-Gleichung. A , B , C , und D sind Koeffizienten, die aus den Lebensdauerdaten abgeleitet werden, T ist die Temperatur und V die zusätzliche Variable.

Für den Ausfallzeitpunkt t_f gilt [41]:

$$t_f = \frac{A}{T} \cdot \exp\left(\frac{B}{k_B \cdot T}\right) \cdot \exp\left[V \cdot \left(C + \left(\frac{D}{k_B \cdot T}\right)\right)\right] \quad (2)$$

Aus beiden Modellen lassen sich beschleunigte Testbedingungen ableiten. Eine Testzeit von 1000 Stunden bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte gilt in der Automobilindustrie als typisch.

2.5 Elektrische Felder in inhomogener Materie

In diesem Abschnitt wird eine kurze Einführung in die Auswirkung statischer elektrischer Felder auf Materie (Lötstopplack) und insbesondere auf deren Isolationsfähigkeit gegeben. Bei Lötstopplack handelt es sich um ein inhomogenes Material, das unter anderem ein Epoxy-Acrylat, Füllstoffe, aber auch Hohlräume, die mit Luft oder Feuchtigkeit gefüllt sein können, enthält.

Durch die an die Kammstruktur (Abschnitt 4.1, Abbildung 22) angelegte elektrische Spannung bildet sich im Lötstopplack ein elektrisches Feld zwischen den Leiterbahnen aus. Man unterscheidet zwischen dem äußeren elektrischen Feld \vec{E}_a und dem elektrischen Feld im Lötstopplack \vec{E}_{Diel} . Das äußere elektrische Feld sorgt für eine Polarisierung \vec{P} des Materials durch das Induzieren von Dipolen, wodurch sich ein elektrisches Feld im Material ausbildet, das entgegen dem äußeren elektrischen Feld \vec{E}_a gerichtet ist und die resultierende elektrische Feldstärke \vec{E}_{Diel} reduziert ($\epsilon_r > 1$). Die resultierende elektrische Feldstärke \vec{E}_{Diel} zwischen den materiegefüllten Leiterbahnen kann damit beschrieben werden durch

$$\vec{E}_{Diel} = \vec{E}_a + \frac{1}{\epsilon_0} \cdot \vec{P} \quad (3)$$

beziehungsweise

$$\vec{E}_{Diel} = \frac{1}{\epsilon_r} \cdot \vec{E}_a \quad (4)$$

wobei ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante des Vakuums darstellt und ϵ_r die relative Dielektrizitätskonstante des Dielektrikums (Lötstopplack) [42].

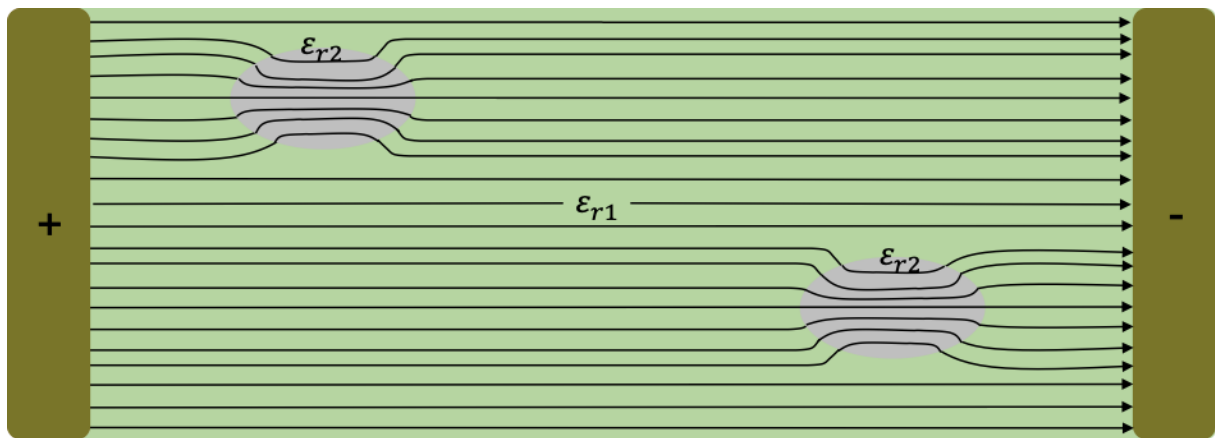


Abbildung 13: Schematische Darstellung zweier elektrisch angeschlossener mit Lötstopplack bedeckter Leiterbahnen auf der Leiterplattenoberfläche. Aufgrund unterschiedlicher Dielektrizitätskonstanten, wobei $\epsilon_{r2} < \epsilon_{r1}$, ist die resultierende elektrische Feldstärke \vec{E}_{Diel} in den Hohlräumen größer als im umliegenden Lötstopplack.

In **Abbildung 13** ist beispielhaft eine Struktur aus zwei mit Lötstopplack bedeckten Leiterbahnen mit zwei Hohlräumen im Lack gezeigt. Durch die an die Leiterbahnen angelegte elektrische Spannung bildet sich im Lötstopplack mit der Dielektrizitätskonstanten ε_{r1} ein elektrisches Feld \vec{E}_{Diel} aus. Da $\varepsilon_{r2} < \varepsilon_{r1}$ wird das äußere elektrische Feld in den Hohlräumen weniger reduziert als im restlichen Lack, wodurch es zu einer lokalen Feldstärkeüberhöhung kommt.

2.5.1 Elektrischer Durchschlag und Teilentladungen

Ein elektrischer Durchschlag des Dielektrikums bei angelegter Gleichspannung entsteht durch im elektrischen Feld \vec{E}_{Diel} beschleunigte Elektronen, die durch Stoßionisation Atome im Dielektrikum ionisieren und so eine Elektronenlawine auslösen.

Überbrückt die Elektronenlawine den Leiterbahnabstand kommt es zu einem elektrischen Durchschlag und das vormals isolierende Material ist irreversibel geschädigt [43].

In der Literatur werden Isolatoren nach ihrer Durchschlagsfeldstärke kategorisiert. Diese wird bei einem Isolator mit der Dicke d durch kontinuierliche Steigerung der an die Probe angelegten elektrischen Spannung U ermittelt [44] [45] [46]. Ist die Durchschlagspannung U_D erreicht, wird E_D nach Gleichung (5) ermittelt, sie entspricht der äußeren elektrischen Feldstärke $|\vec{E}_a|$.

$$|\vec{E}_a| = E_D = \frac{U_D}{d} \quad (5)$$

Bleibt die Ionisationsreaktion örtlich beschränkt und die durch Stoßionisation freigesetzten Elektronen rekombinieren wieder mit den umliegenden Atomen, so spricht man von einer Teilentladung. Diese können zum Beispiel bei Inhomogenitäten im Isolierstoff [47], wie in **Abbildung 13** gezeigt, auftreten, aber auch durch lokale Feldüberhöhungen durch die gewählte Leiterbahngeometrie. So kommt es beispielsweise bei den getesteten Kammstrukturen zu einer Feldüberhöhung an den Leiterbahnenenden. Die Höhe der Feldstärkeüberhöhung wird in Abschnitt 5.3.1 errechnet.

Die DIN EN 60270 [48] definiert eine Teilentladung als „örtlich beschränkte elektrische Entladung, welche die Isolierung zwischen Leitern nur teilweise überbrückt und welche angrenzend an einem Leiter auftreten kann, aber nicht muss. [...] Teilentladungen sind im Allgemeinen eine Folge einer örtlichen Feldstärkeüberhöhung in der Isolierung oder auf der Oberfläche der Isolierung“. Man spricht von zwei Arten von Teilentladungen, den äußeren Teilentladungen oder auch den Oberflächen-Teilentladungen und den inneren Teilentladungen in einem isolierenden Medium.

Für das Auftreten einer Teilentladung gelten zwei Bedingungen [49] [50]: Die Intensität und Verteilung des elektrischen Feldes im Material muss ausreichend hoch sein und es muss ein

Startelektron vorhanden sein, um den Teilentladungsprozess zu starten. Für letzteres können externe Quellen wie zum Beispiel elektromagnetische Strahlung durch beispielsweise Licht oder energiereichere Strahlung, thermische Emission oder Feldemission sorgen. Bei Wechselspannung stehen zusätzlich noch „gefangene“ Elektronen der letzten Teilentladung vor der Umpolung zur Verfügung, während diese Elektronen bei Gleichspannung erst durch einen Stromfluss im Isolator an den Ort der Teilentladung gelangen, was längere Zeit in Anspruch nimmt. Teilentladungseffekte verursachen einen Spannungsabfall am Testobjekt. Eine erneute Teilentladung kann erst wieder auftreten, wenn die minimalen Bedingungen für einen Durchschlag erfüllt sind.

Die Anfälligkeit eines Isolierstoffes für Teilentladungen ist relevant, da Teilentladungen zu einer Erosion des Lötstopplacks mit drastisch reduzierter Lebensdauer führen können [51] [52]. Die lokal beschränkten Alterungen des Materials nehmen mit steigender Testzeit immer weiter zu, bis der Zeitpunkt des Ausfalls der kompletten Isolierung verzögert eintritt [43]. So kann das elektrische Feld beispielsweise Alterungsprozesse durch physische und chemische Prozesse verstärken, die auch ohne elektrisches Feld auftreten würden. Als Beispiel nennt [43] Abspaltung und Transport von ionisierten Elementen, was zu einer Verschlechterung der Isolationsfähigkeit führen kann.

2.6 Elektrochemische Migrationsphänomene

Elektrochemische Migration ist nach der IPC-TR-476A [53] das Wachstum eines leitfähigen Filaments in oder auf einer Leiterplatte (PCB) unter Einfluss einer Gleichspannung. Das Filament kann sich auf der Leiterplattenoberfläche, an einer innenliegenden Grenzfläche, oder im Bulkmaterial des Komposits bilden.

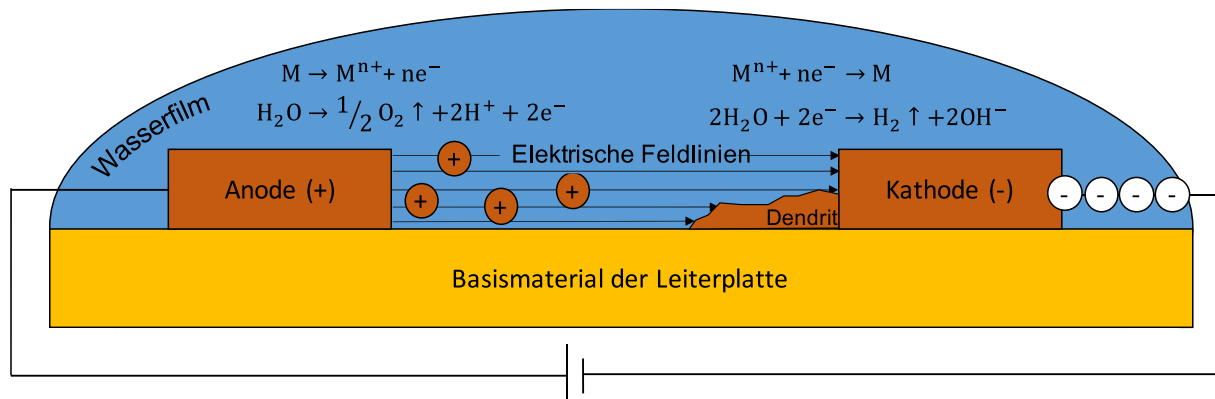


Abbildung 14: Prinzipieller Mechanismus der elektrochemischen Migration. In den Formeln kennzeichnet M das Material, das oxidiert wird.

Der typische Mechanismus einer elektrochemischen Migration mit Bildung eines Dendriten auf einer Leiterplattenoberfläche ist in **Abbildung 14** skizziert.

[53] [39] und aktuelle Forschungsergebnisse [54] führen folgende zwingend gleichzeitig erforderliche Bedingungen für die elektrochemische Migration auf:

- Elektrische Ladungsträger (wie z.B. Cu-Ionen, Sn-Ionen, ...) müssen vorhanden sein.
- Ein die Kathode und Anode verbindender Wasserpfad, um die ionischen Materialien aufzulösen und sie in ihrem mobilen ionischen Zustand zu halten (Dissoziation) wird benötigt.
- Ein elektrisches Potential zwischen den Elektroden ist nötig, um einen Ionenstrom in der Wasserschicht zu erzeugen.
- Eine ionische Kontamination erhöht die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von elektrochemischen Migrationseffekten, ist aber nicht zwingend notwendig.

Die beiden an eine Gleichspannungsquelle angeschlossenen metallischen Elektroden bilden zusammen mit dem die Anode und Kathode verbindenden Wasserfilm (Elektrolyt) eine elektrochemische Zelle. Durch die angelegte elektrische Spannung kommt es zum einen zur Elektrolyse von Wasser. Zum anderen wird aufgrund des meist nicht inerten Charakters der Metallelektroden (bei der Leiterplatte zum Beispiel Kupfer) die anodische Metallelektrode oxidiert

und Metallionen gehen in Lösung. Das Normalpotential liefert ein Maß für die Oxidierbarkeit der Anode, dieses liegt beispielsweise für die Oxidation von $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$ bei +0,34 V [55].

Ist der Wasserfilm zwischen Anode und Kathode geschlossen, so findet Stromfluss statt und das Metallion wandert nach der Oxidation entlang der elektrischen Feldlinien zur Kathode. Dort rekombiniert es mit dem Elektron und ein metallischer Dendrit beginnt von der Kathode aus in Richtung Anode zu wachsen. Wäre der Wasserfilm zwischen Anode und Kathode nicht geschlossen, würde das oxidierte Metallion sofort wieder mit dem Elektron rekombinieren und an der Anode verbleiben.

Zum aktuellen Zeitpunkt sind zwei elektrochemische Migrationsphänomene bekannt, die im Folgenden näher erläutert werden. Im ersten Fall bilden sich auf der Leiterplattenoberfläche die in Abbildung 14 skizzierten metallischen Dendrite, wachsend von der Kathode in Richtung Anode. Bei verzinnnten Leiterplatten werden häufig dünne, nadelförmige Dendrite beobachtet. Abhängig vom pH-Wert im wässrigen Elektrolyten kommt es teilweise auch zu Ausfällungen des Metallions als Hydroxid oder Oxid-Hydrat.

Die Bildung eines leitfähigen anodischen Filaments (CAF, englisch Conductive Anodic Filament) im Basismaterial der Leiterplatte (PCB) entlang der Glasfasern [56] [57] [58], skizziert in **Abbildung 15**, wird ebenfalls zu den elektrochemischen Migrationsprozessen gezählt.

Im Gegensatz zur klassischen metallischen Dendritbildung wächst das Filament hier von der Anode ausgehend in Richtung Kathode. Auch ist das Filament in diesem Fall nicht metallisch, sondern besteht aus dem halbleitenden Salz $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$, das auch als Atacamit bekannt ist.

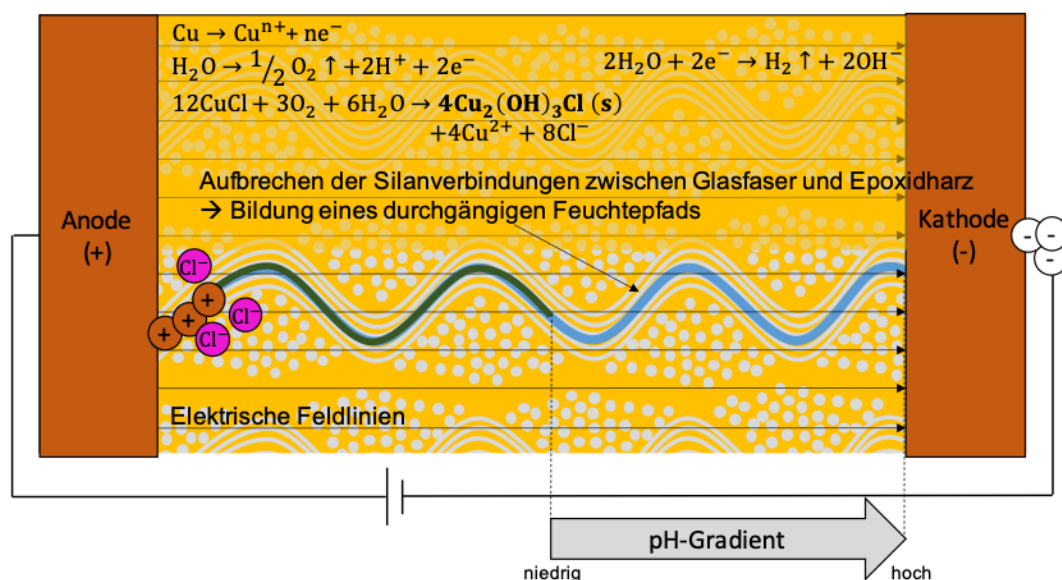


Abbildung 15: Spezieller Fall der elektrochemischen Migration in der Leiterplatte: Bildung eines Conductive Anodic Filaments (CAF) entlang der Glasfasern im Basismaterial.

Durch die anliegende elektrische Spannung und Feuchte brechen die Silanverbindungen an den Glasfaserbündeln und dem umliegenden Epoxidharz auf und es entsteht ein Feuchtepfad zwischen Anode und Kathode. Der elektrochemische Migrationsprozess von CAF unterscheidet sich zu Beginn nicht von dem des in Abbildung 14 skizzierten klassischen Dendritenwachstums: Nach dem Entstehen des durchgängigen Feuchtepfads folgt die Oxidation der Anode, wobei hier für die spätere Bildung von Atacamit zwingend Chlorionen vorliegen müssen.

Durch den pH-Gradienten zwischen Anode und Kathode durch die Wasserelektrolyse wird in Anodennähe der für die Bildung von Atacamit thermodynamisch stabile Bereich eines pH-Werts von 6-8 (temperatur- und konzentrationsabhängig) erreicht und das in Richtung der elektrischen Feldlinien migrierende Kupfer fällt bereits an der Anode als das halbleitende Salz $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ aus. Der für die Bildung von Atacamit notwendige pH-Wert verschiebt sich mit dem CAF-Pfad.

Die beiden bisher bekannten elektrochemischen Migrationsphänomene der klassischen Bildung eines Dendrits und des Sonderfalls CAF werden in Kapitel III in Tabelle 2 dem neuartigen elektrochemischen Migrationsphänomen AMP gegenübergestellt.

III. ALLGEMEINE EINFÜHRUNG IN NEUARTIGE PHÄNOMENE IN DER LEITERPLATTE UNTER HOHER ELEKTRISCHER SPANNUNG UND FEUCHTELAST

Durch die Analyse von mit hohen elektrischen Spannungen (500-1000 V) und unter 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte getesteten Leiterplatten konnte viele neuartige, bisher nicht dokumentierte Phänomene beobachtet werden. Diese sollen zu Beginn dieses Abschnitts kurz Erwähnung finden. Anschließend folgt eine allgemeine Einführung in das anodische Migrationsphänomen, auf dem der Fokus dieser Arbeit liegt.

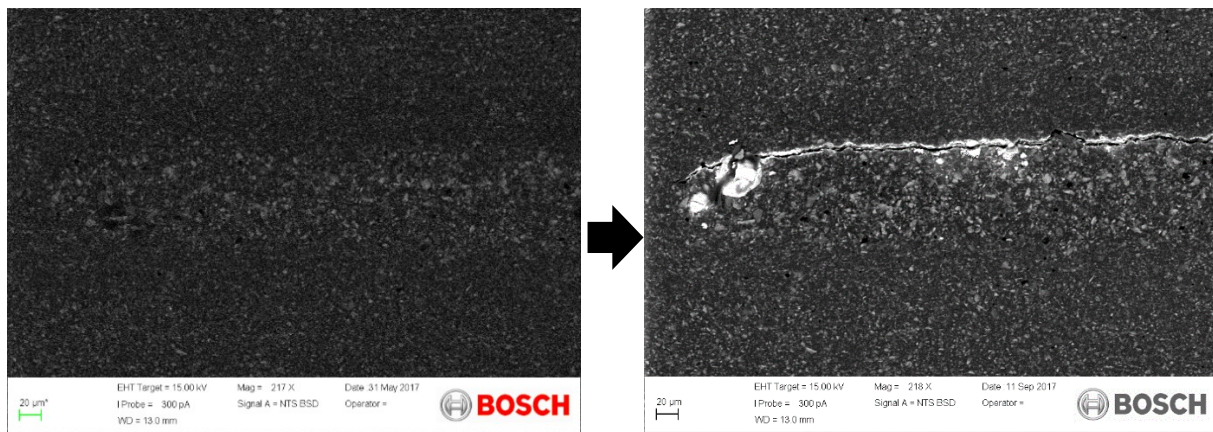


Abbildung 16: Anodische Leiterbahnspitze. Blick mit dem REM auf Leiterplattenlayout L1 mit dickem Lötstopplack und einem Leiterbahnabstand von 800 µm, für 1355 h getestet mit 500 V bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte. Links: Vor dem HV-SIR-Test. Rechts: Dieselbe Kammspitze nach dem HV-SIR-Test. Die REM-EDX Analyse zeigt Kupfer auf dem Lötstopplack an.

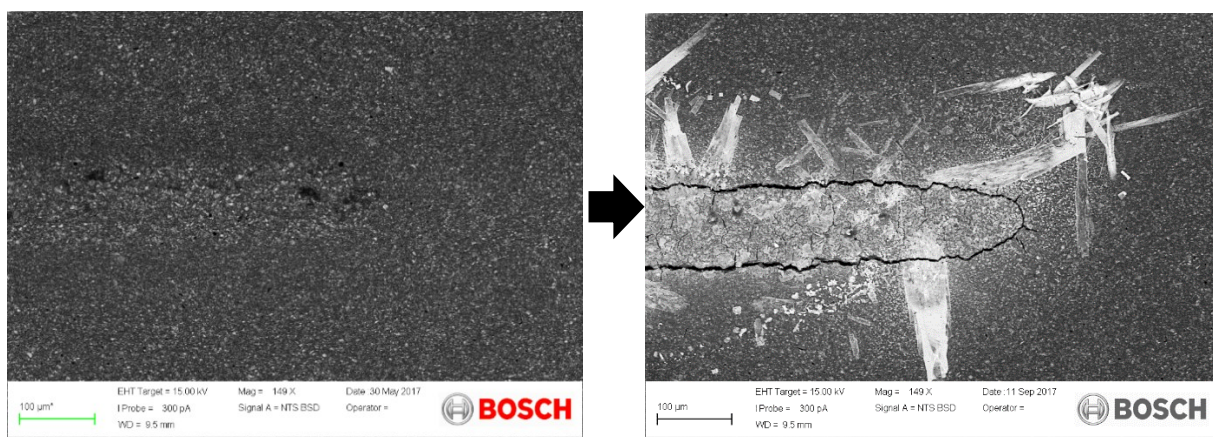


Abbildung 17: Kathodische Leiterbahnspitze. Blick mit dem REM auf Leiterplattenlayout L1 mit dickem Lötstopplack und einem Leiterbahnabstand von 800 µm, für 1355 h getestet mit 500 V bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte. Links: Vor dem HV-SIR-Test. Rechts: Dieselbe Kammspitze nach dem HV-SIR-Test. Die REM-EDX Analyse zeigt Kupfer in den splitterförmigen Strukturen auf dem Lötstopplack an.

Nach dem Hochvolt-SIR-Test werden häufig Risse im Lötstopplack um die anodische und kathodische Leiterbahn gefunden. Diese sind beispielhaft in **Abbildung 17** und **Abbildung 16** vor und nach dem HV-SIR-Test gezeigt. Die Risse im Lötstopplack entlang der anodischen Leiterbahn werden der Beobachtung nach nicht durch AMP verursacht, da entlang der in Ab-

bildung 16 gezeigten Anodenspitze keine AMP zwischen den Leiterbahnen beobachtet werden konnten. Die weißen Stellen in der REM-EDX Aufnahme nach dem HV-SIR-Test zeigen die Existenz von Kupfer auf der Lötstopplacke an.

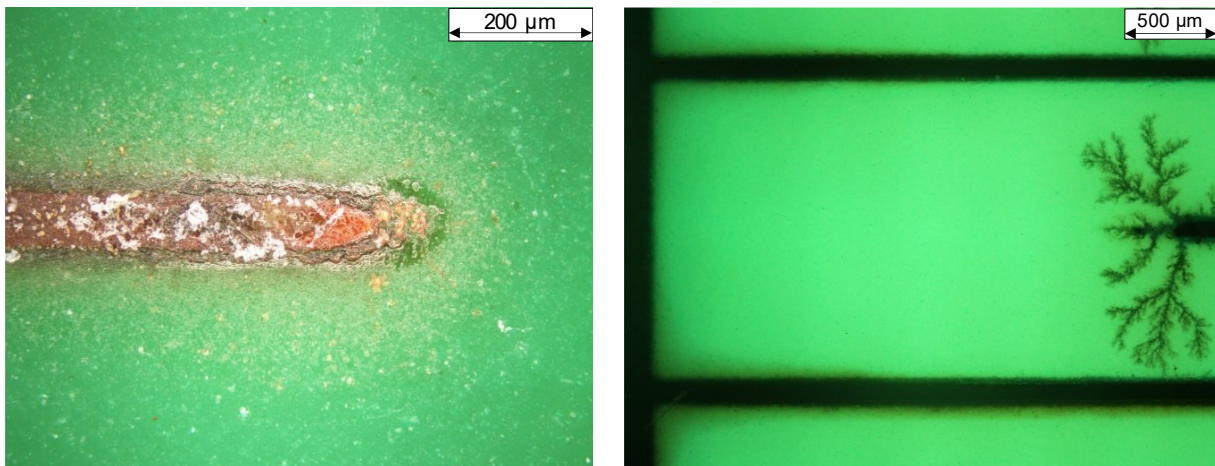


Abbildung 18: Mikroskopaufnahmen senkrecht zur Leiterplattenoberfläche von Leiterplattenlayout L1 mit dickem Lötstopplack. Es wurde für 1381 h mit 1000 V bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte getestet. Links: Kathodische Leiterbahnspitze mit Leiterbahnabstand 2325 µm im DF-Modus. Rechts: Anodische Leiterbahnspitze mit AMP zwischen zwei kathodischen Leiterbahnabstand mit einem Leiterbahnabstand von 800 µm im UV-Modus.

An der Kathodenseite werden nach dem HV-SIR-Test häufig weiße, splitterförmige Strukturen auf der Lötstopplacke um die kathodische Leiterbahn detektiert, dies ist beispielhaft in **Abbildung 18 links** gezeigt. Im REM-EDX erscheinen dieselben splitterförmigen Strukturen ebenfalls weißlich, siehe hierzu beispielhaft Abbildung 17 rechts. Mittels REM-EDX-Analyse kann Kupfer in den weißlichen, splitterförmigen Strukturen nachgewiesen werden.

Auffällig ist auch die in Abbildung 18 links gezeigte teilweise auftretende massive Zersetzung der kathodischen Leiterbahn nach dem HV-SIR-Test. Diese ist besonders auffällig an den Leiterbahnspitzen. Deutlich zu erkennen ist auch die Zerstörung der Lötstopplackschicht um die Leiterbahn. Die Betrachtung der Leiterplattenoberfläche mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus lässt eine Dunkelfärbung des Lötstopplacks um die kathodischen Leiterbahnen erkennen. Diese tritt auch häufig am Anfang der Leiterbahn auf, wie in **Abbildung 18 rechts** zu erkennen, bei minimaler elektrischer Feldstärke (siehe auch Abschnitt 5.3.1). Mittels XPS-Analyse (Röntgenphotoelektronenspektroskopie, englisch X-Ray Photoelectron Spectroscopy) konnte bei einem anderen HV-SIR-Test in diesen Bereichen Kupfer im Lötstopplack detektiert werden.

Allgemeine Einführung in das anodische Migrationsphänomen in der Leiterplatte

Bei dem in dieser Arbeit untersuchten Phänomen handelt es sich um ein neuartiges elektrochemisches Migrationsphänomen, das erstmalig unter elektrischer Spannung und Feuchtelast im Lötstopplack und teilweise auch im Harz des Basismaterials der Leiterplatte beobachtet wurde. Es handelt sich um das Wachstum eines halbleitenden Materials (Cu_2O) beginnend an der anodischen Kupferleiterbahn, das bevorzugt bei hohen elektrischen Spannungen und Feldstärken unter Feuchtelast auftritt.

Die kleinste elektrische Spannung, bei der das AMP beobachtet und untersucht wurde, lag bei 250 V, die größte bei 1000 V. Die Testzeiten der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche lagen zwischen minimal 1000 und maximal 2024 Stunden.

Es ist anzunehmen, dass das AMP auch bei geringeren und höheren Spannungen auftritt, bei entsprechend gewählten und angepassten Leiterbahnabständen und Testzeiten.

Das anodische Migrationsphänomen wächst bei den meisten untersuchten Lötstopplack-Basismaterial-Kombinationen beginnend an der Anode entlang der Basismaterial-Lötstopplackgrenze und im Lötstopplack. Bei manchen untersuchten Lötstopplack-Basismaterial-Kombinationen kann das Phänomen teilweise oder vollständig im Harz des Basismaterials beobachtet werden, wobei sich das Aussehen und die Intensität des AMP unabhängig von der Migrationsebene durch den gewählten Lötstopplack beeinflussen lässt.

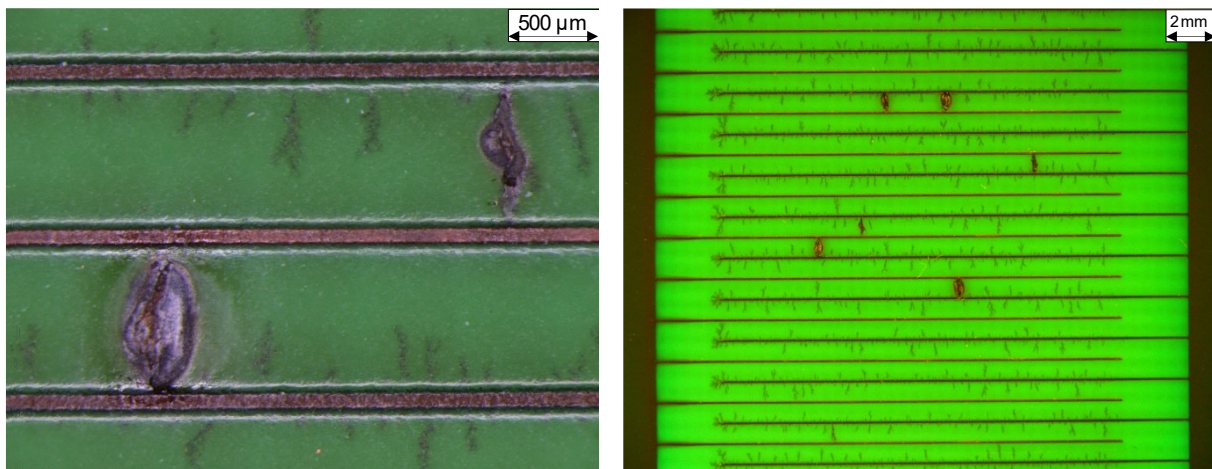


Abbildung 19: Mikroskopaufnahmen von Leiterplattenlayout L1 getestet für 1381 h mit 1000 V bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte. Der Leiterbahnabstand liegt bei 800 µm. Links: DF-Modus. Rechts: UV-Modus.

Das AMP weist häufig eine hohe Verzweigungsdichte der AMP-Pfade auf. Überbrückt es den Abstand zwischen Anode und Kathode, kann es zu einem elektrischen Kurzschluss und damit zu einem Ausfall der Leiterplatte kommen. Typische anodische Migrationspfade können **Abbildung 19** entnommen werden.

Um den Unterschied zu dem unter Feuchte und elektrischer Spannung üblicherweise von der Kathode ausgehenden Dendritenwachstum auf der Leiterplattenoberfläche herauszustellen, wird das untersuchte Phänomen als AMP (Anodisches Migrationsphänomen) bezeichnet. Klar abzugrenzen ist das in dieser Arbeit untersuchte Phänomen auch von CAF (Conductive Anodic Filament) [56].

In **Tabelle 2** sind die wesentlichen Unterschiede zwischen dem klassischen elektrochemischen Migrationsphänomen der Dendritbildung, dem Spezialfall eines CAF-Pfads und des neuartigen AMP gegenübergestellt. Wie in Abschnitt 2.2 bei der Beschreibung der Funktionsweise von Lötstopplack dargelegt wurde, besteht laut der IPC-SM-840E [11] eine Aufgabe des Lötstopplacks darin, elektro(chemisches) Wachstum und andere Formen von schädlichem oder leitfähigem Wachstum zu verzögern. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche tragen klar zur Bewertung dieser Forderung an den Lötstopplack bei. Es zeigt sich, dass sich das AMP durch die Wahl des Lötstopplacks und seine Rezeptur beeinflussen lässt.

Tabelle 2: Vergleich der beiden bekannten elektrochemischen Migrationensphänomene mit dem neuartigen anodischen Migrationsphänomen.

	DENDRITE	CAF	AMP
MATERIAL	Cu, Sn, ... (metallisch), manchmal Ausfällun- gen als Oxid/Hydroxid, je nach pH-Wert	$\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{Cl}$ (halbleitend)	Cu_2O (halbleitend)
BILDUNG LEITFÄHIGER FEUCHTEPFAD	durch Bildung eines geschlossenen Was- serfilms der Anode und Kathode verbindet	durch Aufbrechen der Silanverbindungen der Glasfasern mit dem Harz des Basismateri- als und nachfolgender Feuchteabsorption	in Bereichen hoher elektrischer Feldstärke im Bindemittel des BM und LSL, an Füllstoff- Bindemittel-Grenzflä- chen, Grenzfläche LSL-BM
AUFTRETEN	auf der Oberfläche und an Phasengren- zen (zB der LSL-BM- Grenze)	entlang der Glasfasern im BM	im LSL, an der LSL- BM-Grenze, teilweise im Bindemittel des BM
ELEKTRISCHE SPANNUNG	beobachtet ab 1-2V (Übergangswider- stände)	beobachtet ab 100 V, aber auch kleinere Spannungen denkbar	beobachtet ab 250 V, aber auch kleinere Spannungen denkbar
DAUER DES WACHSTUMS	wenige Sekunden bis Minuten	mehrere hundert Stun- den	mehrere hundert Stunden
WACHSTUMS- RICHTUNG	ausgehend von der Kathode	ausgehend von der Anode	ausgehend von der Anode
AUSSEHEN	nadelförmig oder bu- schig, je nach Metall	länglich entlang der Glasfasern	verzweigt bis buschig
BEVORZUGTES AUFTRETEN BEI/UNTER... BEEINFLUSST DURCH...	geringem Leiterbahn- abstand, ionischer Kontamination, Erhö- hung der elektrischen Spannung, pH-Wert, Feuchte, Temperatur	Halogenanteil im BM, BM und seine Verar- beitungsqualität, Erhö- hung der elektrischen Spannung, geringem Leiterbahnabstand, pH-Wert, Feuchte, Temperatur	Erhöhung der elektri- schen Spannung, ge- ringem Leiterbahnab- stand, Erhöhung des elektrischen Felds, Leiterplattenmateria- lien, Einfluss ionischer Kontamination nicht untersucht, ist aber wahrscheinlich, pH- Wert, Feuchte, Tem- peratur

IV. DURCHFÜHRUNG DER HV-SIR-TESTS VON LEITERPLATTEN ZUR ANALYSE DES AMP

Zu Beginn des Kapitels in Abschnitt 4.1 werden die in dieser Arbeit untersuchten Teststrukturen und die Herstellungsparameter der untersuchten Leiterplatten vorgestellt. Danach wird in Abschnitt 4.2 die Vorbeanspruchung der Leiterplatte durch Reflowlöten beschrieben und das Reinigungsverfahren der Leiterplatten vor dem HV-SIR-Test vorgestellt. Abschnitt 4.3 beschreibt den Versuchsaufbau für die Durchführung der einzelnen HV-SIR-Tests.

4.1 Teststrukturen und Herstellungsparameter der Testleiterplatten

Für die Analyse des AMP in dieser Arbeit wurden vier verschiedene Leiterplattenlayouts verwendet. Die Testlayouts beinhalten Kammstrukturen, wie sie auch typischerweise in SIR-Tests verwendet werden (SIR-Handbuch [9]), aber auch speziell für die Untersuchungen in dieser Arbeit entwickelte Strukturen (Abschnitt 6.2).

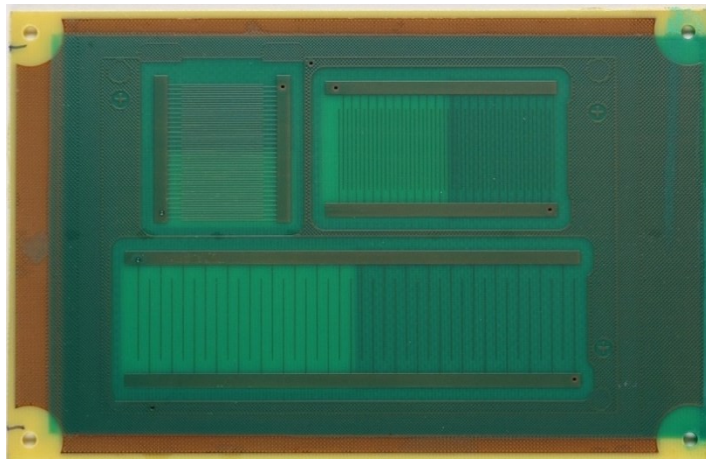


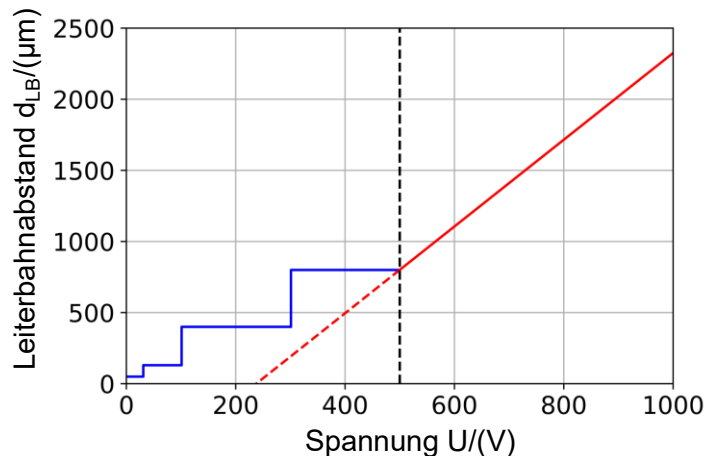
Abbildung 20: Leiterplattenlayout L3 mit Kammstrukturen mit 400 μm , 800 μm und 2325 μm Leiterbahnabstand. Die Löt pads finden sich auf der Leiterplattenrückseite. Die Kammstrukturen verfügen über einen gemeinsamen Kanal, der über eine Kupferfläche auf der Innenlage je eine Kammseite einer Kammstruktur miteinander koppelt. Die andere Kammseite wird separat an die Spannungsquelle angeschlossen.

In **Abbildung 20** ist Leiterplattenlayout L3 mit drei Kammstrukturen mit 400, 800 und 2325 μm Leiterbahnabstand dargestellt. Je Teststruktur werden zwei Kämm versetzt ineinandergeschoben. Ein Kamm ist auf Negativpotential, der andere auf Positivpotential geschaltet. Damit ergeben sich in den überlappenden Bereichen der Kammstrukturen zueinander parallele, abwechselnd positiv und negativ gepolte Leiterbahnen. Je eine Kammseite der einzelnen Teststrukturen ist über die Innenlage elektrisch mit den anderen Teststrukturen verbunden. Diese Verschaltung ermöglicht es, die Leiterplatte mit SIR-Testanlagen zu testen, die über ein gemeinsames Negativ- oder Positivpotential verfügen, gegen welches die einzelnen Teststrukturen auf Potential gebracht werden.

Die IPC2221 [59] gibt in Abhängigkeit der Testspannung (Gleichspannung oder Wechselspannungsspeaks) die minimal auf der Leiterplatte einzuhaltenden Leiterbahnabstände an. Diese

sind für eine unbestückte Leiterplatte aus glasfaserverstärktem Epoxidharz mit einer dauerhaft aufgetragenen Polymerbeschichtung in **Abbildung 21** vermerkt. Für elektrische Spannungen $U \geq 500\text{ V}$ werden sie nach Gleichung (6) berechnet [59].

$$d_{LB}(U) = d_{LB}(500\text{ V}) + ((U - 500\text{ V}) \cdot 3,05 \frac{\mu\text{m}}{\text{V}}) \quad (6)$$



U [V]	d_{LB} [μm]
0-30	50
31-100	130
101-300	400
301-500	800
750	1562,5
1000	2325

Abbildung 21: Minimal einzuhaltende Leiterbahnabstände für eine unbestückte Leiterplatte aus glasfaserverstärktem Epoxidharz mit permanent aufgetragener Polymerbeschichtung nach der IPC2221 [57]. Die vertikale gestrichelte Linie bei einer Spannung von 500 V markiert die Grenze, ab welcher die Leiterbahnabstände nach Gleichung (6) errechnet werden.

Die Designparameter aller in dieser Arbeit getesteten Kammstrukturen sind in **Abbildung 22** verzeichnet. Die getesteten Kammstrukturen weisen immer dieselbe Anzahl anodischer und kathodischer Leiterbahnen auf. Die Herstellungsdetails und der Aufbau der in dieser Arbeit verwendeten Testleiterplatten sind in **Tabelle 3** zusammengefasst.

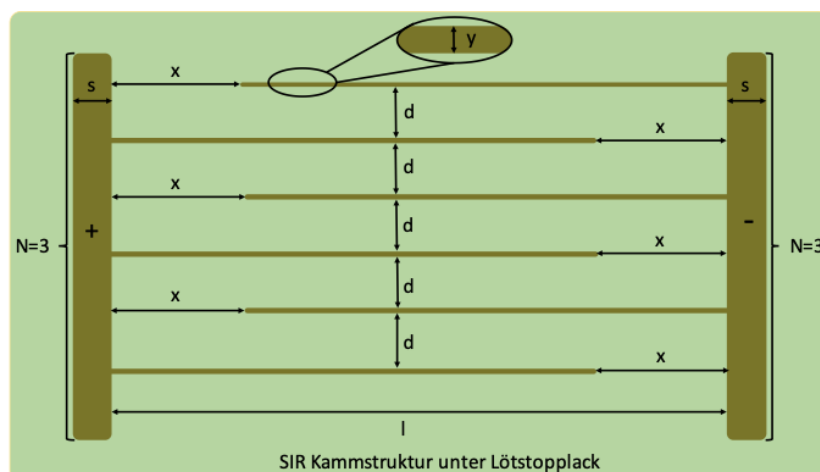


Abbildung 22: Parameter aller im Rahmen dieser Arbeit getesteten Kammstrukturen aus Tabelle 3 beispielhaft für einen Kamm mit je $N = 3$ anodischen/kathodischen Leiterbahnen. Die Eintauchtiefe x der beiden Käme beträgt $2949,5\text{ }\mu\text{m}$, der Leiterbahnabstand d entspricht je nach Kammstruktur entweder $400\text{ }\mu\text{m}$, $800\text{ }\mu\text{m}$ oder $2325\text{ }\mu\text{m}$. Der Abstand l der Kamm Balken beträgt $23950\text{ }\mu\text{m}$, der Kamm Balken hat eine Breite s von $3000\text{ }\mu\text{m}$. Die Anzahl der anodischen/kathodischen Leiterbahnen N der Einzelkäme kann Tabelle 3 entnommen werden. Die Breite y der Kupferleiterbahnen beträgt $125\text{ }\mu\text{m}$.

Tabelle 3: Herstellungs- und Testparameter der in dieser Arbeit verwendeten Leiterplattenlayouts (siehe Abschnitt 9.1 für Details zu den verwendeten Messgeräten und das Abkürzungsverzeichnis).

LAYOUT	L1			L2	L3	L4
GEFERTIGTE CHARGEN	1			1	2	1
LAGEN	2			4	4	4
REFLOW-PROFIL	3x RA			2x RB	2x RA	3x RA
TW	teilweise			nein	nein	nein
BELICHTUNG + AUSHÄRTUNG DES LSL	nach Herstellerangabe und für alle Leiterplatten gleich			für jeden LSL nach Herstellerangabe	nach Herstellerangabe und Variationen	nach Herstellerangabe und für alle Leiterplatten gleich
NOMINAL-KUPFERDICKE	35 µm			18 µm	18 µm	18 µm
ISN-PROZESS	ja			ja	nein	ja
BM	R			R, A, N	A	A
LSL	P1			A1, T1, TX1, PX1	A1 + Variationen	P1
LSL-AUFTRAG	nach Herstellerangabe			nach Herstellerangabe	nach Herstellerangabe aufgerakelt mit 60 µm Profilirakel	nach Herstellerangabe
LSL-DICKE	normales + höheres Lackgewicht			normales Lackgewicht	normales Lackgewicht + Doppelbeschichtung	normales Lackgewicht
TESTSTRUKTUR	Kammstruktur			Kammstruktur	Kammstruktur	Kreisstruktur
ANZAHL ANOD./ KATHOD. LB-SPITZEN	19 (2325 µm) 26 (800 µm) 30 (400 µm)			20 (2325 µm)	20 (2325 µm)	n.a.
TEST-SPANNUNG	500 V	1000 V		1000 V	1000 V	250 V, 500 V, 750 V, 1000 V
GETESTETE LB-ABSTÄNDE	400 µm, 800 µm, 2325 µm	800 µm, 2325 µm		2325 µm	2325 µm	100-2325 µm
TESTZEIT	1355 h	1381 h	1000 h	1000-1500 h	1480 h	235-2024 h

4.2 Vorbeanspruchung durch Reflow und Reinigung der Testleiterplatten

Eine später im Produkt verbaute Leiterplatte durchläuft vor ihrem endgültigen Betrieb typischerweise zwei bis drei Reflowprozesse, bei welchem Bauelemente mittels Lot mit der Leiterplatte verbunden werden. In dieser Arbeit wird der daraus resultierende thermische Stress dem die Leiterplatte ausgesetzt ist, durch mehrfaches Durchfahren des Reflowofens simuliert. Der in dieser Arbeit typischerweise verwendete Reflowofen ist in **Abbildung 23 rechts** dargestellt.

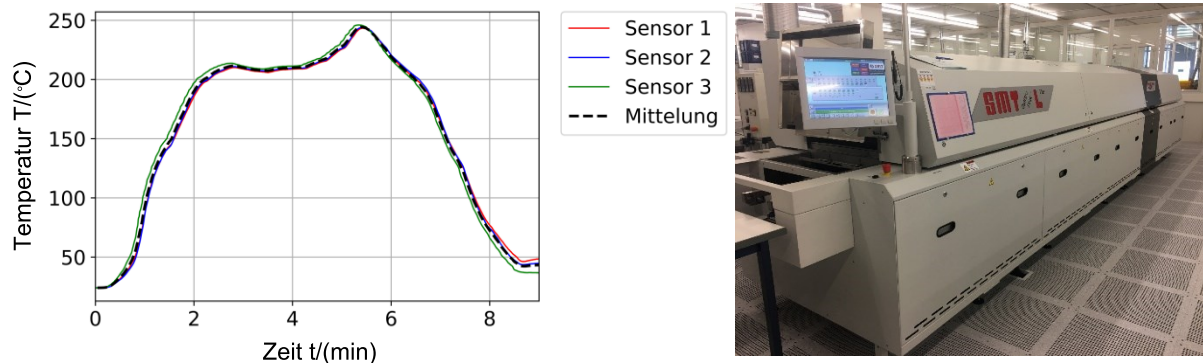


Abbildung 23: Beispielhaft gezeigte Reflowkurve RA. Für die Ermittlung der Reflowtemperatur wurden drei Thermoelemente Typ K auf dem Lötstopplack über dem Basismaterial sowie den Kupferleiterbahnen einer Testleiterplatte befestigt und anschließend die gemessene Temperatur gemittelt.

Im Reflowofen passieren die Leiterplatten unterschiedliche Temperaturzonen. Der in dieser Arbeit verwendete Reflowofen des Typs SMT Quattro Peak L Plus hat eine Länge von etwa 7 m. Mit einer Geschwindigkeit von 0,8 m/min durchlaufen die Leiterplatten die unterschiedlichen Temperaturzonen. Die Atmosphäre im Ofen weist dabei einen Restsauerstoffgehalt von <1000 ppm auf um Oxidationsprozesse zu minimieren.

Beispielhaft ist in **Abbildung 23 links** die Reflowkurve RA mit einer Peaktemperatur von ca. 244 °C dargestellt. Nach dem Durchlaufen des Reflowofens werden die Testkabel an die Leiterplatten angelötet. Anschließend werden die Leiterplatten gereinigt, um eventuelle Flussmittelreste durch das Anlöten der Testkabel und weitere, durch das Handling der Leiterplatten möglicherweise entstandene Verschmutzungen, zu entfernen.

Die Reinigung der Leiterplatten erfolgt durch Lagerung der Leiterplatten in einem bewegten Reinigungsbad (Abschnitt 9.1) mit einem Gemisch aus 75 % Isopropanol und 25 % demineralisiertem Wasser.

4.3 Versuchsaufbau für die Durchführung der Lebensdauertests von Leiterplatten

In diesem Abschnitt wird der Versuchsaufbau vorgestellt, mit welchem die Leiterplatten auf ihre Zuverlässigkeit unter Belastung mit elektrischen Gleichspannungen von bis zu 1000V und unter Feuchtelast getestet werden. Für die Durchführung der HV-SIR-Tests werden die Leiterplatten nach der DIN-EN-61189-5 [60] senkrecht in der Klimakammer parallel zum Luftstrom gelagert. Für die Erzeugung der Umgebungsfeuchte in der Klimakammer wird typischerweise demineralisiertes Wasser mit einer Leitfähigkeit von $3\ \mu\text{S}/\text{cm}$ verwendet (Abschnitt 9.1).

Alle in dieser Dissertation durchgeführten Hochvolt-SIR-Tests wurden bei $85\ ^\circ\text{C}$ und 85 % relativer Luftfeuchte durchgeführt und damit üblichen klimatische Testbedingungen aus der Automobilindustrie. Nach Einstellen konstanter klimatischer Bedingungen wird die Spannungsversorgung eingeschaltet. Die gewählten Testzeiten unter elektrischer Spannung orientieren sich an in der Automobilindustrie typischerweise zur Simulation der Lebensdauer der Produkte gewählten Testzeiten.

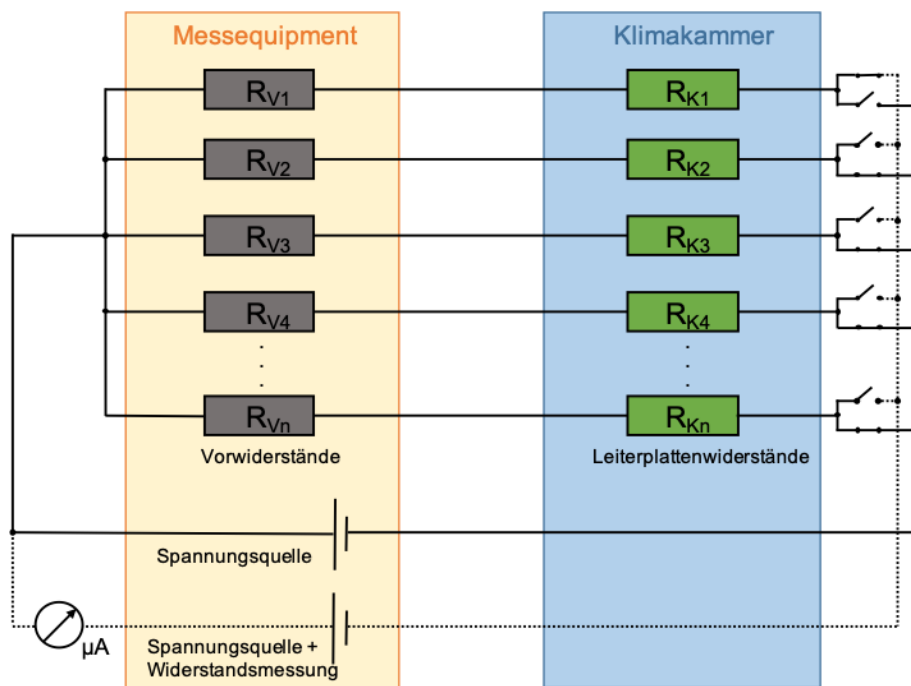


Abbildung 24: Versuchsschaltbild der durchgeführten HV-SIR-Tests. Die n parallel geschalteten Isolationswiderstände der Kammstrukturen werden zeitlich aufeinanderfolgend vermessen.

Während des Anlegens der Testspannung kann je nach Versuchsaufbau in-situ automatisiert der elektrische Isolationswiderstand der Teststrukturen gemessen werden. Manuelle Messungen der elektrischen Isolationswiderstände wurden in dieser Arbeit bei HV-SIR-Tests ohne automatisiertes SIR-Messsystem durchgeführt. Die unterschiedlichen Versuchsaufbauten für die in dieser Arbeit durchgeführten HV-SIR-Tests sind in **Tabelle 4** aufgeführt.

In **Abbildung 24** ist skizziert, wie die Leiterplatten elektrisch angeschlossen werden.

Die Anode der Kammstrukturen ist auf Positivpotential, die Kathode auf Negativpotential geschaltet. Die n parallel geschalteten elektrischen Isolationswiderstände der Kammstrukturen R_K befinden sich in der Klimakammer (blau). Außerhalb der Klimakammer (gelb) befindet sich das Messequipment. Es beinhaltet die Spannungsquelle mit möglicher in-situ Messung der Isolationswiderstände R_K sowie in Reihe geschaltene Vorwiderstände im einstelligen $M\Omega$ -Bereich zur Strombegrenzung im Falle eines Kurzschlusses auf der Leiterplatte. Um eine Vergleichbarkeit der elektrischen Isolationswiderstände der Kammstrukturen mit unterschiedlichen Leiterbahnanzahlen N zu ermöglichen, wird der gemessene Isolationswiderstand R_{ges} der Teststruktur nach Gleichung (7) auf die Anzahl der Kammüberlappungsflächen $2 \cdot N - 1$ skaliert:

$$R_N = (2 \cdot N - 1) \cdot R_{ges} \quad (7)$$

Der skalierte Isolationswiderstand R_N liefert einen guten Vergleichswert der in dieser Arbeit gemessenen Isolationswiderstände, da die Länge der Leiterbahnen und damit die Länge der Überlappungsflächen bei allen in dieser Arbeit untersuchten Kammstrukturen identisch ist (siehe Abbildung 22).

Tabelle 4: Versuchsparameter der in dieser Arbeit durchgeführten HV-Tests (Abschnitt 9.1).

LAYOUT	SPANNUNG	DAUER	TESTSYSTEM UND WIDERSTANDSMESSUNG
L1	500 V	1355 h	Espec: Automatisierte Widerstandsmessung alle 60 Minuten, Kurzschluss-Schutz durch Messung des Leckstroms mit Abschaltautomatik
	1000 V	1381 h	Konstantspannungsquelle: Widerstandsmessung mindestens wöchentlich mit ei- nem Isolationsprüfgerät, Kurzschluss-Schutz durch Vorwiderstände (1 MΩ)
	1000 V	1000 h	Gen3: Widerstandsmessung automatisch alle 30 Minuten, Kurzschluss-Schutz durch Vorwiderstände
L2	1000 V	1000 - 1500 h	Gen3: Widerstandsmessung automatisch alle 20 Minuten, Kurzschluss-Schutz durch Vorwiderstände
L3	1000 V	1480h	Gen3: Widerstandsmessung automatisch alle 20 Minuten, Kurzschluss-Schutz durch Vorwiderstände
L4	250 V, 500 V, 750 V, 1000 V	bis zu 2024h	Vier Konstantspannungsquellen: Bestimmung der Widerstände mind. wöchentlich mit- tels Voltmeter über den Spannungsabfall am Vorwider- stand, Kurzschluss-Schutz durch Vorwiderstände (1 MΩ)

V. GRUNDLEGENDE CHARAKTERISIERUNG DES LÖTSTOPPLACKSYSTEMS

Um den Einfluss des Lötstopplacks auf das AMP beschreiben zu können, werden in diesem Kapitel einige wichtige grundlegende Eigenschaften analysiert, die Glasübergangstemperatur in Abschnitt 5.1. und die Feuchteaufnahme in Abschnitt 5.2. In Abschnitt 5.3 werden zum einen die Simulationsergebnisse der elektrischen Feldstärke in einer Kammstruktur und zum anderen die Ergebnisse der Teilentladungsmessungen vorgestellt. Die grundlegende Charakterisierung wird beispielhaft für Lack A1 durchgeführt. Dieser ist zusammengesetzt und wird hergestellt wie Lack des Typs X (Abschnitt 2.2.). Da sich bei der Analyse der Ausprägung des AMP bei dickem und dünnem Lötstopplack deutliche Unterschiede gezeigt haben, werden in diesem Kapitel die Lackeigenschaften jeweils für dicken und dünnen Lack bestimmt. In Abschnitt 5.4 werden alle Analyseergebnisse zusammengeführt und diskutiert.

5.1 Glasübergangstemperatur von Lötstopplack

Die Glasübergangstemperatur von Lötstopplack wurde mittels einer thermomechanischen Analyse mit dem TMA 202 der Firma Netzsch bestimmt. Es wurden zwei Lötstopplackdicken, 40 und 80 μm auf ihre T_g in Abhängigkeit der Reflowzyklen (0x bis 3x Reflow) untersucht. Die Reflowpeaktemperatur lag bei 265 °C. Die höhere Lackschichtdicke wurde mittels einer Doppelbeschichtung erreicht. Hierfür wurde der Lack nach dem einfachen Auftrag vorgetrocknet und anschließend eine zweite Schicht aufgetragen und erneut vorgetrocknet. Nach dem zweiten Vortrocknen erfolgt die Belichtung und Aushärtung des Lacks bei 150 °C.

Die Proben wurden nicht entwickelt und es wurde kein UV-Bump verwendet. Details zur Aushärtung können Abbildung 4 in Abschnitt 2.2 entnommen werden.

Zur Herstellung der Lötstopplackproben wurde der Lötstopplack auf eine backpapierähnliche Folie aufgerakelt und nach der Aushärtung für die TMA-Messung abgezogen. Die Probenmaße liegen bei ca. 12 mm in der Länge und 45 mm in der Breite, sie werden mit einer kleinen konstanten Kraft von 4 cN in das Gerät eingespannt. Während der Messung sind die Proben in einer stickstoffhaltigen (Spülgas mit 50 ml/min flow rate) Probenkammer gelagert. Die Temperatur der Kammer wird in 5 °C/min Schritten von 25 bis 300 °C hochgefahren, wobei die relative Längenänderung der Probe automatisiert gemessen wird. Die Messgenauigkeit der Längenausdehnung liegt bei 0,48 %. Aus den aufgenommenen Daten wird die T_g mittels der zum Gerät gehörigen Software Netzsch Protheus Thermal Analysis, Version 4.8.4., wie in [25] beschrieben, bestimmt. Die Messkurven wurden für die Auswertung geglättet und korrigiert. Die Korrekturkurve wird mittels einer Referenzfolie aus Platin aufgenommen.

Dafür wird die Längenausdehnung der Referenzfolie unter den gleichen Versuchsbedingungen wie die der zu vermessenden Proben bestimmt und aus den Abweichungen zur theore-

tisch bekannten Längenausdehnung die Korrektur der Messkurven errechnet. Durch die Korrektur kann der Einfluss von systemspezifischen Größen wie der Heizrate, der Atmosphäre oder auch der Probengeometrie erfasst und korrigiert werden.

Die ermittelte T_g der 40 μm dicken Lackschicht wurde unabhängig von der Anzahl der durchlaufenen Reflowzyklen zwischen 185,2 °C bis 196,6 °C detektiert. Für die dickeren Lackproben liegt er unabhängig von der Anzahl der Reflowzyklen zwischen 172,3 °C und 183,7 °C. Ein Einfluss der Reflowschritte auf die T_g ist sowohl bei den dicken, als auch den dünnen Proben nicht zu erkennen. Damit zeigt die dünne Lackschicht eine Tendenz zu größeren Glasübergangstemperaturen als die dickere Lackschicht.

5.2 Feuchteaufnahme von Lötstopplack

Die Feuchteaufnahme des Lötstopplacks ist entscheidend für das unter hohen elektrischen Spannungen entstehende AMP in der Leiterplatte. Je mehr Feuchte der Lötstopplack aufnehmen und in die Leiterplatte transportieren kann, desto schneller und intensiver können sich leitfähige Pfade zwischen gegenteilig gepolten Kupferleiterbahnen ausbilden, in welchen Kupferionen migrieren können.

In Abschnitt 5.2.1 wird die zeitliche Beeinflussung der Feuchteaufnahme des Basismaterials durch applizierten Lötstopplack simuliert. In Abschnitt 5.2.2 wird die experimentelle Durchführung der Feuchteaufnahmemessung von Lötstopplack erläutert, in Abschnitt 5.2.3 werden die Ergebnisse diskutiert.

5.2.1 Simulation der Feuchteaufnahme der Leiterplatte

In diesem Abschnitt wird beispielhaft die Beeinflussung der Feuchteaufnahme des Basismaterials durch einen applizierten Lötstopplack simuliert. Die Simulation erfolgt beispielhaft für Basismaterial A mit appliziertem Lötstopplack TX1, ist aber übertragbar auf weitere Lacke. Die Simulation erfolgt unter Verwendung eines Finite-Elemente-Ansatzes für die Diffusion und Konvektion von Feuchtigkeit mittels der Software Ansys Mechanical 19.2 nach den Gesetzen der Fickschen Absorption.

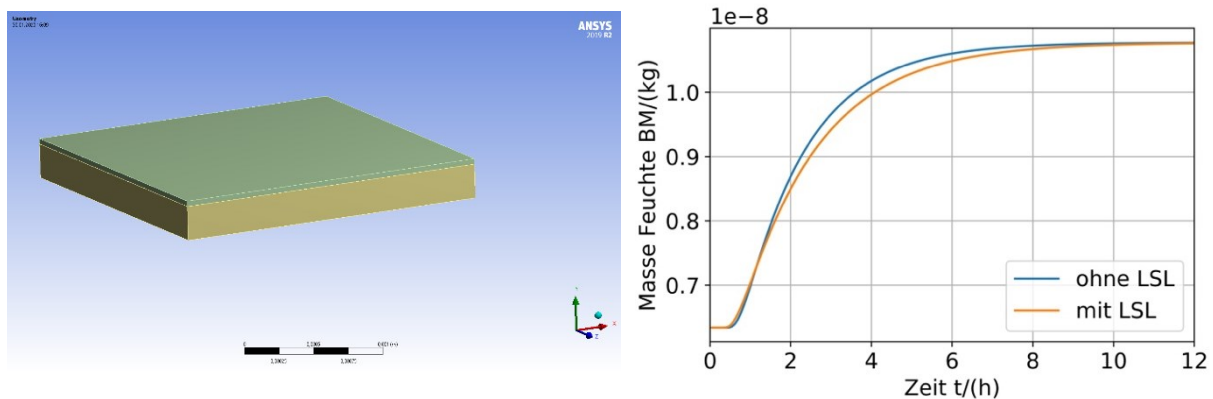


Abbildung 25: Links: Simuliertes Basismaterial (BM, gelb) A mit Lötstopplack (LSL, grün) TX1. Rechts: Simulierte Feuchteaufnahme des Basismaterials des linken Modells mit und ohne LSL bei 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte.

Das simulierte Basismaterial misst 2325 μm x 2325 μm x 250 μm im Volumen. Die Feuchteabsorption der Leiterplatte wurde einseitig von der Lötstopplackseite angenommen. Als initiale Bedingungen wurden 20 °C/50 % relative Luftfeuchte gewählt, die innerhalb von 30 Minuten linear auf 85 °C/85 % relative Luftfeuchte gefahren wurden.

In **Abbildung 25** sind die Simulationsergebnisse zusammengefasst. Durch den applizierten Lötstopplack wird die Feuchtaufnahme des Basismaterials zeitlich verzögert, sodass in diesem Beispiel erst nach etwa 9,6 Stunden die maximale Feuchtaufnahme des Basismaterials erreicht ist.

5.2.2 Durchführung der Feuchtaufnahmemessung von Lötstopplack A1

Die Feuchtaufnahme von Lötstopplack wurde in dieser Arbeit exemplarisch für Lötstopplack A1 in zwei Schichtdicken, 40 µm und 80 µm, bestimmt. Die Lackproben wurden gleich, wie in Abschnitt 2.2 in **Abbildung 4** für Lacktyp X gezeigt, belichtet und ausgehärtet.

Die dickeren 80 µm Lackschichten wurden mittels eines Doppelbeschichtungsverfahrens hergestellt. Hierfür wird der Lack nach dem einfachen Auftrag vorgetrocknet und anschließend eine zweite Schicht aufgetragen und erneut vorgetrocknet. Nach dem zweiten Vortrocknen erfolgt die Belichtung und Aushärtung des Lacks. Eine Entwicklung des Lacks in Sodalösung erfolgt nicht, da der Lack vollständig belichtet wird. Ein Unterschied zur praktischen Anwendung von entwickeltem Lack ist nicht zu erwarten. Sowohl bei der dickeren, als auch der dünneren Lackschicht wird ein UV-Bump vor dem Einbrennen des Lacks verwendet. Weitere Details zur Aushärtung des Lacks A1 können Abschnitt 2.2 entnommen werden.

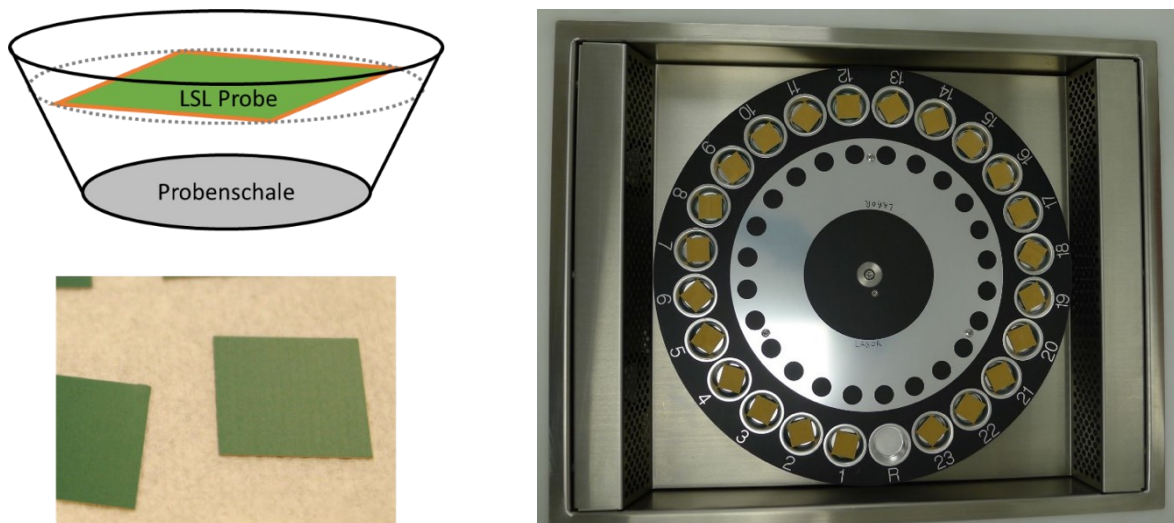


Abbildung 26: Links oben: Anordnung der Lötstopplackproben auf Kupfer in der Probenschale. Links unten: Foto einer Lötstopplackprobe auf Kupfer als Trägermaterial. Rechts: Anordnung der Proben in der Wiegeeinheit.

Die Lötstopplackproben sind einseitig auf 210 µm dicke Kupferfolie aufgerakelt und wurden in 18 mm x 18 mm große Plättchen gefräst. Diese sind beispielhaft in **Abbildung 26 unten links** abgebildet. Von jeder Lackvariante wurden drei gleichartige Proben hergestellt.

Die Feuchteaufnahme der Proben wurde gravimetrisch mit dem „Multisample Dynamic Moisture Sorption SPSx-1 μ Advance“ unter Luftatmosphäre (Abschnitt 9.1) gemessen. Die Waage hat eine Auflösung von 1 μ g mit einer Wiederholbarkeit von $\pm 2\mu$ g RMS. Die Anlage erreicht eine Temperaturgenauigkeit von zeitlich $\pm 0,1$ K und räumlich $\pm 0,5$ K, die relative Luftfeuchte lässt sich bis auf $\pm 0,6$ % relative Luftfeuchte angeben.

Die Wiegeeinrichtung befindet sich in einer Klimakammer unter Umgebungsdruck. Sie besteht aus 24 kreisförmig angeordneten Waagschalen mit einem Durchmesser von $\varnothing 33$ mm aus Aluminium, wie in **Abbildung 26 rechts** abgebildet. Die Probe wird für die gravimetrische Messung wie in **Abbildung 26 oben links** gezeigt, seitlich in der Waagschale eingeklemmt. Dies dient der Maximierung der Lötstopplackoberfläche und dem Vermeiden von Feuchteinschlüssen zwischen Kupferplättchen und Probenschale. Die leere Schale R in der Waage dient als Referenz, um etwaige Messartefakte während der Feuchteaufnahme der Proben feststellen zu können.

Tabelle 5: Haltezeiten der Feuchterampe bei einer Temperatur von konstanten 60 °C.

r. h.	0 %	20 %	40 %	60 %	80 %	0 %
HALTEZEITEN	20,0 h	21,4 h	49,7 h	42,7 h	97,7 h	93,7 h

Für eine rasche Feuchteaufnahme wird die Temperatur am SPSx-1 μ Advance auf die Maximaltemperatur von 60 °C eingestellt und es wird bei konstant gehaltener Temperatur ein Rampenprofil mit 0, 20, 40, 60, 80, 0 % relativer Luftfeuchte abgefahren. Die Haltezeiten bei den jeweiligen Stufen sind in **Tabelle 5** dargestellt. Nach Erreichen der Sättigung wurde jeweils manuell der nächste Feuchteschritt eingestellt.

Während der Messung wird jede Probe einzeln in Zeitabständen von 20 Minuten gewogen und die zeitliche Entwicklung des Probengewichts über der Messzeit wird dokumentiert.

$$dm \% = \frac{m_{Probe} - m_t}{m_t} \times 100 \% \quad (8)$$

Die Gewichtsänderung dm der Proben während der Feuchteaufnahme wird relativ zum Trockengewicht der Probe nach Gleichung (8) berechnet und in % angegeben. Das Trockengewicht m_t der Einzelproben ergibt sich aus Mittelung der letzten 30 Messwerte der ersten Trockenstufe bei 60 °C/0 % über einen Zeitraum von 10 Stunden. m_{Probe} ist das abzüglich des Schalengewichts in Zeitabständen von 20 Minuten gemessene Probengewicht.

5.2.3 Auswertung der Feuchtaufnahme von Lötstopplack

In **Abbildung 27** sind die nach Gleichung (8) berechneten maximalen Gewichtsänderungen dm in % der Lötstopplackproben relativ zum Trockengewicht über der relativen Luftfeuchte in % dargestellt.

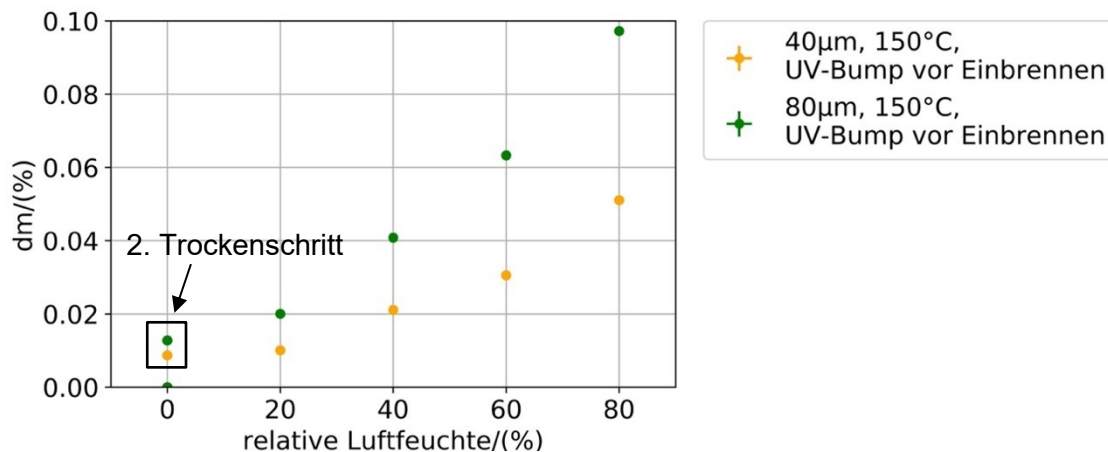


Abbildung 27: Relative Gewichtsänderung dm in % und der Fehler des Mittelwerts der gemittelten Einzelproben aufgezeichnet über der relativen Luftfeuchte in %.

Jeder Messpunkt stellt den Mittelwert der letzten zwei Stunden Datenaufnahme nach Erreichen der Maximalfeuchte gemittelt über alle drei Messkurven dar. Deutlich zu erkennen ist, dass die Lötstopplackprobe mit 40 µm Lackdicke über alle Feuchteschritte hinweg über eine im Vergleich zu den mit 80 µm Lackdicke dickeren Lackproben in etwa halbierte prozentuale Feuchtaufnahme verfügt. Dabei nimmt die prozentual aufgenommene Feuchte der Probe wie zu erwarten mit steigender relativer Luftfeuchte zu.

Auffällig ist auch, dass die Proben nach dem zweiten Trockenschritt nicht ihr ursprüngliches Gewicht nach dem initialen Trocknen erreichen. Eine Zunahme des Gewichts durch Oxidation der Kupferplättchen ist auszuschließen, da sich das zugenommene Gewicht zwischen dicken und dünnen Lackproben unterscheidet. Dieses Phänomen ist bereits in der Literatur für Feuchteabsorptionstests von Epoxidharzen beschrieben [31]. Die Untersuchungen zeigen, dass die in der Probe verbliebene Feuchte erst durch die Verwendung von höheren Temperaturen als 60 °C, zum Beispiel 140 °C, wieder vollständig entfernt werden kann. Zurückgeführt wird dieses Phänomen auf die Art der Feuchtebindung in der Probe.

In **Abbildung 28** und **Tabelle 6** ist die Feuchtaufnahmen der Lötstopplackproben über der Zeit \sqrt{t} dargestellt. Diese Auftragung wird typischerweise in der Literatur für Feuchtaufnahmetests verwendet (Abschnitt 2.3.2).

Mit einer gemittelten maximalen relativen Gewichtsänderung prozentual zum Trockengewicht von $(0,097 \pm 0,001)\%$ erfährt die Probe mit einer Lackdicke von 80 µm im Vergleich zu der Probe mit 40 µm Lackdicke, mit $(0,051 \pm 0,001)\%$ eine doppelt so hohe relative Gewichtsänderung dm .

Tabelle 6: Mittelwerte der relativ zum Trockengewicht gemessenen prozentualen Gewichtsänderungen dm in % in Abhängigkeit der Feuchteschritte für 40 μm und 80 μm Lackdicke. Die Fehler des Mittelwerts liegen unterhalb 0,001 %.

RELATIVE PROZENTUALE GEWICHTSÄNDERUNG DES MITTELWERTS IN %					
PROBE	20 % r. h.	40 % r. h.	60 % r. h.	80 % r. h.	0 % r. h.
40 μm , 150 °C, UV-BUMP VE	0,010	0,021	0,031	0,051	0,009
80 μm , 150 °C, UV-BUMP VE	0,020	0,041	0,063	0,097	0,013

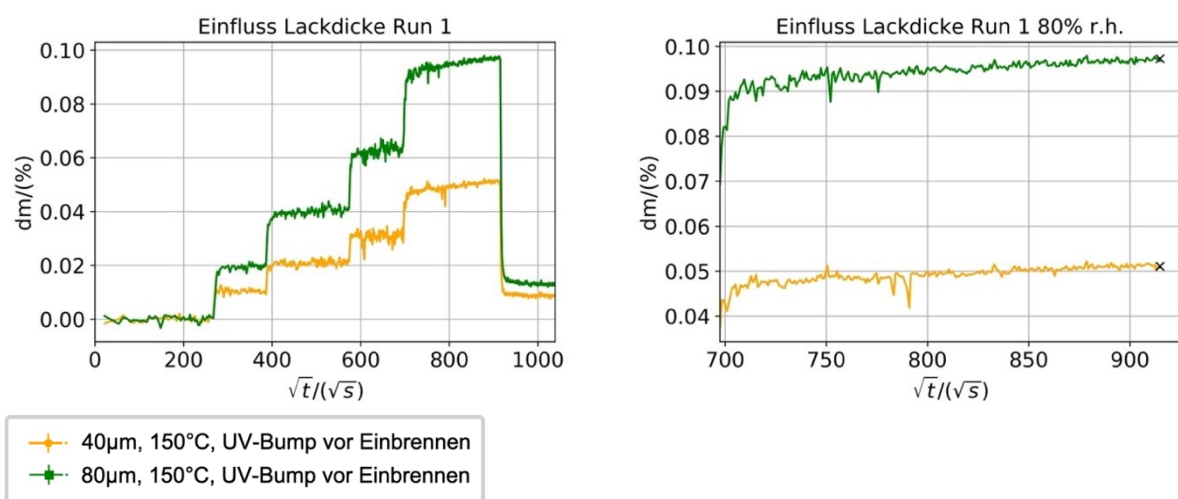


Abbildung 28: Einfluss der Lackdicke auf die Feuchteaufnahme des Lötstopplacks A1 bei 60 °C gemittelt über je drei Feuchteaufnahmekurven. Links: Relative Feuchteaufnahme in % in Abhängigkeit von \sqrt{t} in der Einheit \sqrt{s} für die in Tabelle 5 verzeichneten Feuchterampen. Rechts: Vergrößerter Feuchteschritt mit 80% relativer Luftfeuchte, markiert ist der Mittelwert und sein Fehler.

Auch zeigt der Feuchteaufnahmetest von Lötstopplack A1, dass Lötstopplack im Vergleich zu Basismaterial (R,N), welches in [61] auf seine Feuchteaufnahme bei 65 °C und 85 % relativer Luftfeuchte getestet wurde, über eine weit geringere Feuchteaufnahme verfügt. So werden hier für beide Basismaterialien relative Feuchteaufnahmen zwischen 0,5 und 0,85 % erreicht, während die relative Feuchteaufnahme des Lötstopplacks bei maximal 0,097 % liegt.

Zusammengefasst zeigen die Simulation sowie die Ergebnisse des Feuchteabsorptionstest von Lötstopplack auf, dass der Lötstopplack eine Barrierewirkung für in die Leiterplatte diffundierende Feuchte hat. Durch die verlangsamte Feuchteaufnahme der Leiterplatte kann Feuchtigkeit, die an chemischen Reaktionen teilnimmt, durch den Lötstopplack erst zeitverzögert wieder in die Leiterplatte transportiert werden.

Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass mit steigender Schichtdicke an Lötstopplack eine prozentual zum Trockengewicht höhere Feuchteaufnahme resultiert.

5.3 Elektrische Alterung von Lötstopplack

In diesem Abschnitt wird die Materialalterung des Lötstopplacks durch das elektrische Feld, welches durch die anliegende elektrische Spannung hervorgerufen wird, untersucht.

Im ersten Abschnitt 5.3.1 wird die Höhe der elektrischen Feldstärke im Lötstopplack der Leiterplatte simuliert und analysiert. Die experimentelle Untersuchung des Lötstopplacks auf Teilentladungseffekte wird Abschnitt 5.3.2 beschrieben, wobei in Abschnitt 5.3.2.1 die experimentelle Durchführung des Versuchs und in Abschnitt 5.3.2.2 die Ergebnisse der Teilentladungsmessungen in Lötstopplack vorgestellt und diskutiert werden.

5.3.1 Simulation der elektrischen Felder einer Kammstruktur

Mit der Simulation der äußeren elektrischen Feldstärke einer Kammstruktur soll bewertet werden, ob die elektrische Feldstärke für einen örtlich beschränkten elektrischen Durchschlag (Teilentladung) des inhomogenen Lötstopplacks ausreicht, der das Material altert. Die elektrische Feldstärke einer Kammstruktur wird durch eine elektrisch-stationäre Analyse mit Ansys Mechanical simuliert (Abschnitt 9.1).

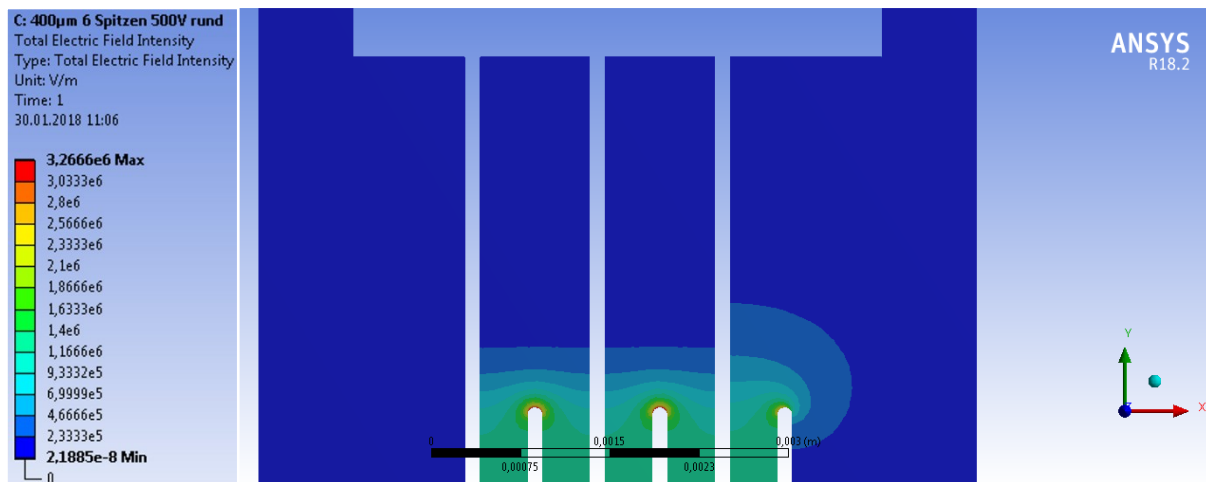


Abbildung 29: Elektrische Feldstärkeverteilung einer zweidimensionalen Kammstruktur mit 400 µm Leiterbahnabstand und einer elektrischen Spannung von 500 V. Die unterschiedlichen Farben geben die unterschiedlichen elektrischen Feldstärken in V/m wieder.

In dieser Untersuchung und auch in der Simulation wurden Kammstrukturen mit unterschiedlichen Leiterbahnanzahlen mit den in Abschnitt 4.1 in Abbildung 22 verzeichneten Maßen verwendet. Die simulierte Geometrie kann **Abbildung 29** entnommen werden. Dort ist die elektrische Feldstärkeverteilung $|\vec{E}_a|$ einer Kammstruktur mit einem Leiterbahnabstand von 400 µm dargestellt nach Anlegen einer Spannung von 500 V. Die Leiterbahnbreite beträgt 125 µm, die Leiterbahnspitze wurde für alle Simulationen durch einen Kreis mit Radius 62,5 µm genähert.

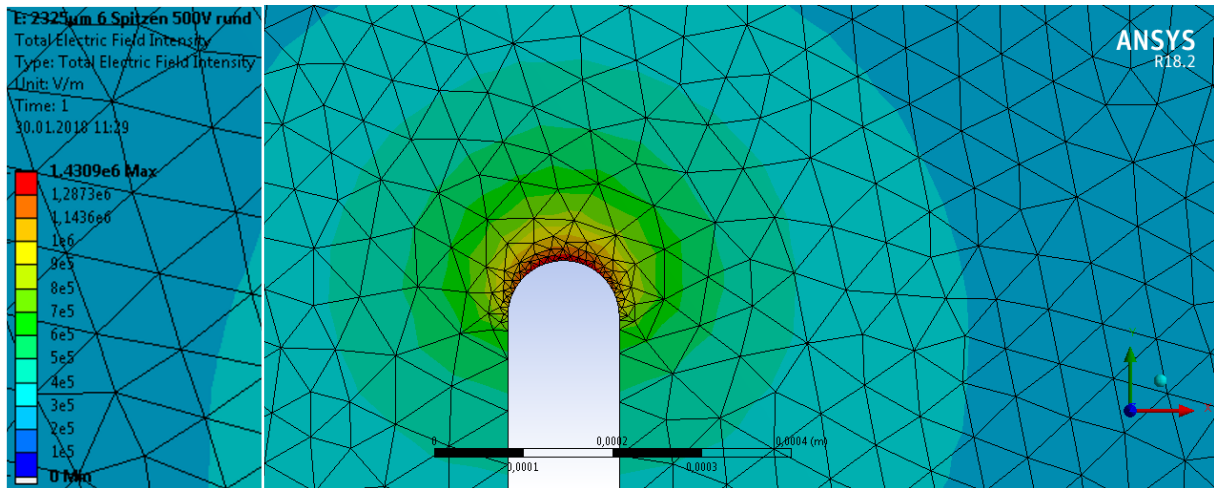


Abbildung 30: Elektrische Feldstärke und das verwendete Meshing der Kammspitze einer zweidimensionalen Kammstruktur mit 2325 μm Leiterbahnabstand. Die unterschiedlichen Farben geben die unterschiedlichen elektrischen Feldstärken in V/m wieder.

Abbildung 30 zeigt vergrößert die elektrische Feldstärkeverteilung $|\vec{E}_a|$ der Kammspitze einer Kammstruktur mit 2325 μm Leiterbahnabstand. Zusätzlich verzeichnet ist das Meshing zur Berechnung.

In **Tabelle 7** sind die mittels der Simulation ermittelten maximalen elektrischen Feldstärken an der Leiterbahnspitze $|\vec{E}_{a,S}|$ und zwischen den Leiterbahnen $|\vec{E}_{a,LB}|$ gezeigt für eine elektrische Spannung von 500 V.

Tabelle 7: Simulierte elektrische Feldstärken von Kammstrukturen mit einer elektrischen Spannung von 500 V mit unterschiedlichem Leiterbahnabstand.

LB- ABSTAND IN μm	MAXIMALE ELEKTRISCHE FELDSTÄRKE AN DER LEITER- BAHNSPITZE $ \vec{E}_{a,S} $ IN V/m	ELEKTRISCHE FELDSTÄRKE ZWISCHEN DEN LEITERBAHNEN $ \vec{E}_{a,LB} $ IN V/m	$ \vec{E}_{a,S} : \vec{E}_{a,LB} $
400	$3,27 \cdot 10^6$	$1,25 \cdot 10^6$	2,62
800	$2,35 \cdot 10^6$	$0,63 \cdot 10^6$	3,73
2325	$1,43 \cdot 10^6$	$0,23 \cdot 10^6$	6,22

Eine Verdopplung der elektrischen Spannung verdoppelt die gezeigten elektrischen Feldstärken. Simuliert wurden Kammstrukturen mit 400 μm , 800 μm und 2325 μm Leiterbahnabstand. Zusätzlich verzeichnet ist das Verhältnis der elektrischen Feldstärke zwischen den Leiterbahnen und an den Leiterbahnspitzen. Dies zeigt deutlich, dass die Geometrie der verwendeten Kammstrukturen zu einer Feldstärkeerhöhung an der Kammspitze um einen Faktor zwischen 2,62 für die 400 μm Struktur und 6,22 für die 2325 μm Struktur führt.

Damit ist die im Zweidimensionalen parallel zur Leiterplattenoberfläche simulierte Feldstärke ausreichend hoch, um Teilentladungen (TE) in beispielsweise Lufteinschlüssen mit einer Durchschlagsfestigkeit von $\sim 3 \cdot 10^6$ V/m [43] hervorzurufen.

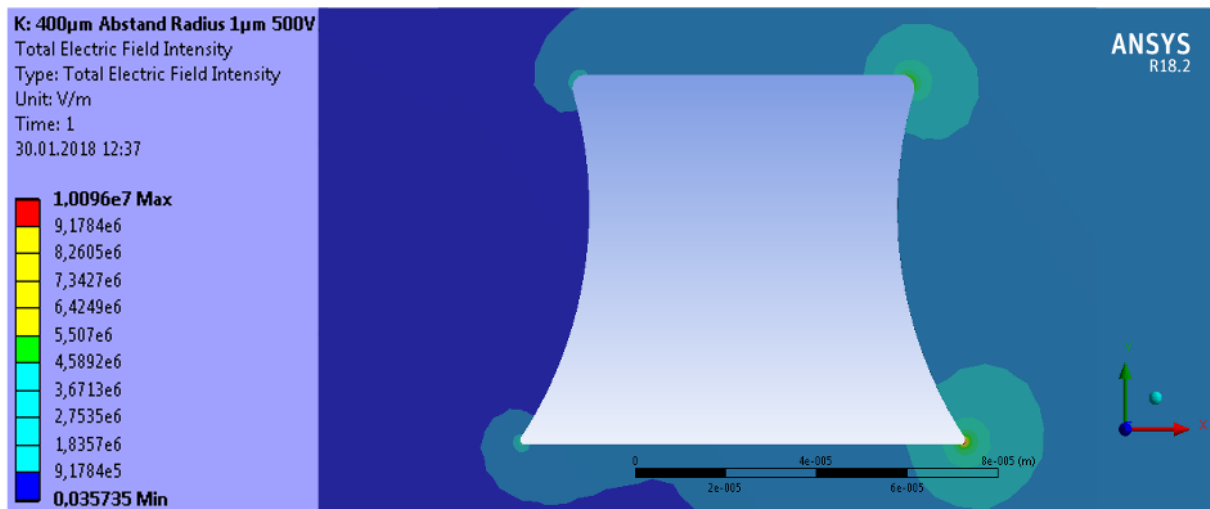


Abbildung 31: Querschnitt einer zweidimensionalen Kammstruktur mit 400 µm Leiterbahnabstand und 500 V elektrischer Spannung.

Zusätzlich wurde die elektrische Feldstärke für die Schnittebene senkrecht zur Leiterplattenoberfläche simuliert. In **Abbildung 31** ist für die 400 µm Struktur, welche mit 500 V getestet wird, eine Leiterbahn im Querschnitt gezeigt. Die konvexen Wölbungen der Leiterbahnen resultieren aus dem Ätzprozess während der Leiterplattenherstellung. Für die Kanten der Leiterbahn an der Oberfläche wurde ein typischer Radius von 3 µm, für die unteren ein Radius von 1 µm gewählt. Der Abstand zur Nachbarleiterbahn wird von der unteren Ecke gemessen. Deutlich zu erkennen ist, dass die Ätzkanten der Leiterbahn zu einer weiteren lokalen Erhöhung der elektrischen Feldstärke führen. Die maximale in dieser beispielhaften Anordnung erreichte elektrische Feldstärke $|\vec{E}_a|$ liegt bei $1,01 \cdot 10^7$ V/m. Dieser Wert entspricht einer achtfachen Erhöhung im Vergleich zur Feldstärke zwischen den Leiterbahnen ohne Feldüberhöhung durch die Ätzkante. Sie liegt aber dennoch eine Größenordnung unter der typischen Durchschlagsfestigkeit von Lötstopplack.

Durch die dreidimensionale Überlagerung der Feldstärkeerhöhungen der beiden oben beschriebenen Simulationen ergeben sich an der Leiterbahnspitze lokal Feldstärken im Bereich der typischen Durchschlagsfestigkeit von Lötstopplacken. Somit können an der Leiterbahnspitze Teilentladungen auftreten, die den Lötstopplack schädigen.

5.3.2 Untersuchung von Teilentladungseffekten in Lötstopplack

In diesem Abschnitt sollen die simulierten elektrischen Feldstärken, die innerhalb einer Kammstruktur auftreten, und die experimentell ermittelten Feldstärken aus Teilentladungsversuchen an Lötstopplackproben verglichen werden.

Dabei wird zu Beginn in Abschnitt 5.3.2.1 die Durchführung der Teilentladungsmessungen beschrieben. In Abschnitt 5.3.2.2 werden die Ergebnisse der Teilentladungsmessungen vorgestellt und mit den simulierten elektrischen Feldstärken verglichen.

5.3.2.1 Durchführung der Teilentladungsmessungen

Die Teilentladungsuntersuchungen von Lötstopplack wurden beispielhaft für Lackvariante A1 mit den gleichen Proben, wie sie im Feuchteaufnahmetest in Abschnitt 5.2 verwendet wurden, durchgeführt (gleiche Charge von Lackvariante 1 und 2 hergestellt nach Abbildung 4 in Abschnitt 2.2). Die verwendeten Proben sind in **Tabelle 8** zusammengefasst. Sie haben keinen Reflowofen durchlaufen, sie liegen im Anlieferzustand vor. Je Variante wurden zwei bis drei Proben vermessen, wobei auf jeder Probe mindestens drei Messungen an unterschiedlichen Positionen durchgeführt wurden.

Tabelle 8: Proben im Teilentladungstest.

PROBENUMMER	LÖTSTOPPLACKDICKE	KUPFERDICKE
1	40 μm	210 μm
2	80 μm	

Die TE-Messungen wurden bei Raumtemperatur mit dem mit Wechselspannung arbeitenden Teilentladungsprüfplatz TPP10 der Firma MPS Mess- und Prüfsysteme GmbH und der dazugehörigen Software MSPS-20 V5.1.62 durchgeführt.

Der TPP 10 verfügt über eine maximale Prüfspannung von 10 kV und ermöglicht bei maximaler Prüfspannung die Detektion von TE <1 pC. Das Datenblatt der Anlage gibt eine Effektivwertmessung mit einer Genauigkeit von $\pm 1,5\%$ und ± 5 Digit an. Da die Kapazität des Prüflings die Eigenschaften des Messkreises beeinflusst [48], wird der Messaufbau mit der Probe vor dem Start der Messreihe kalibriert. Hierzu wird der Teilentladungspulskalibrator TPK der Firma MPS Mess- und Prüfsysteme GmbH parallel zum spannungsfreien Prüfling geschaltet.

Für diese Messreihe wurde ein Teilentladungspuls von 10 pC eingestellt und damit die am TTP10 angezeigte Impulshöhe kalibriert. Dieser Wert bleibt gültig, falls sich die Kapazitäten der Prüflinge nicht stark unterscheiden [48]. Für die in dieser Arbeit durchgeführte Messreihe mit Prüflingen vergleichbarer Kapazitäten ergibt sich ein einheitlicher Korrekturfaktor von 1,15.

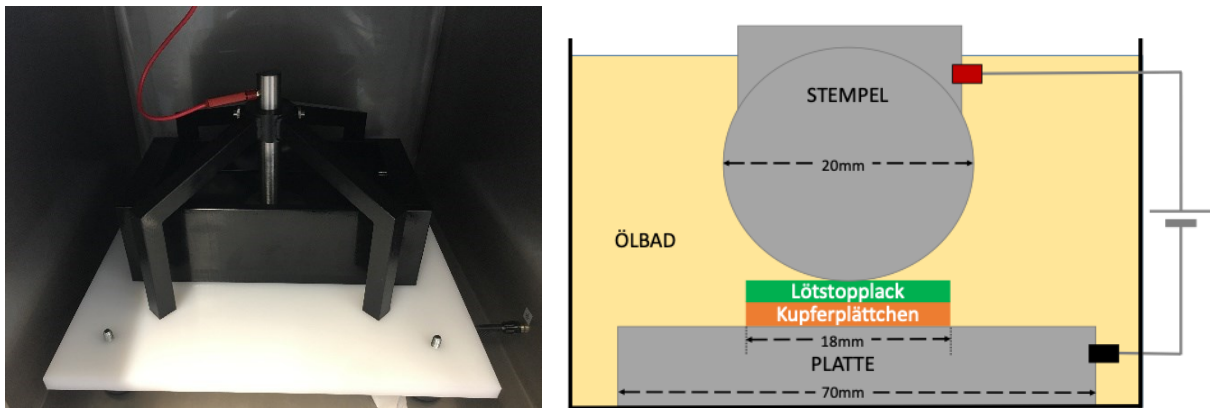


Abbildung 32: Links: Ölbad mit angeschlossenen Hochspannungskabeln und Stempel in der TE-Prüfkammer. Rechts: Skizzierter bemaßter Versuchsaufbau mit Beispielprobe.

Der für die Messung verwendete Versuchsaufbau ist in **Abbildung 32** dargestellt. Die Lötstopplackproben werden mit der Kupferoberfläche auf einer leitfähigen Platte auf Negativpotential gelagert. Mittels eines leitfähigen kugelförmigen Stempels auf Positivpotential wird die Probe eingeklemmt. Durch den großen Durchmesser der sich an der Spitze des Stempels befindlichen leitfähigen Kugel im Vergleich zur Probendicke ergibt sich in erster Näherung am Berührungspunkt ein Plattenkondensator mit parallelen elektrischen Feldlinien.

Zur Isolierung befindet sich die Stempelvorrichtung in einem Ölbad mit dem elektrischen Isolieröl Diala S4 ZX-I von Shell mit einer nach der IEC 60156 [62] bestimmten Durchbruchsspannung von 60 kV. Um auszuschließen, dass das Isolieröl vor dem Lötstopplack elektrisch versagt, wurde zu Beginn der Messreihe der Durchschlagsweg bei einer Steigerung der elektrischen Spannung bis zur Durchbruchsspannung analysiert. Dieser verläuft sowohl bei den 40 μm , als auch bei den 80 μm dicken Lackproben senkrecht in den Lötstopplack.

Das in der Messsoftware programmierte Messprofil ist in **Abbildung 33** dargestellt und entspricht den Vorgaben der DIN EN 60270 „Hochspannungs-Prüftechnik - Teilentladungsmessungen“ von 2016 [48].

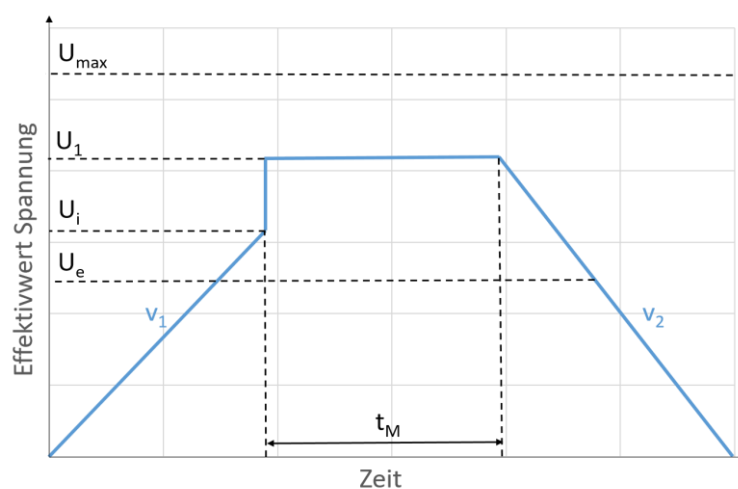


Abbildung 33: Programmiertes Messprofil für die Teilentladungsmessung.

Die an die Probe angelegte Wechselspannung mit einer Frequenz von 1 MHz wird mit einer Spannungssteigerungsgeschwindigkeit v_1 von 0,1 kV/s bis zu der Spannung gesteigert, bei der erste Teilentladungen auftreten. Als Spannungsabfallgeschwindigkeit v_2 wurde die gleiche Geschwindigkeit wie für v_1 gewählt.

Mit U_i beziehungsweise U_e wird die elektrische Spannung bezeichnet, bei der erste TE auftreten, beziehungsweise die TE aussetzen. Für das Erreichen von U_i muss die erste TE eine vom Benutzer selbst zu definierende Höhe erreichen. Als Schwelle wurde für diese Versuchsreihe 2,02 pC gewählt (nach Herstellerangabe 40-70 % des Messbereichs) und ein Messbereich von 5 pC. Der Schwellwert wurde in Vorversuchen experimentell ermittelt und wurde, um auch kleinste TE detektieren zu können, so klein wie möglich gewählt. Nach Detektion der ersten TE wird der Messbereich für TE in den Auto-Range geschaltet und alle TE auch außerhalb des Messbereichs und unter des angegebenen Schwellwerts werden aufgezeichnet.

Der Wert U_i kann von v_1 und U_e von v_2 und t_M beeinflusst werden [48]. So beschreibt [52], dass sich die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines Startelektrons zum Auslösen der TE proportional zur Größe eines hier beispielhaft genannten Hohlraums verhält. Je kleiner der Hohlraum, desto länger benötigt der Start der TE. Aus diesem Grund wurden v_1 und v_2 für diese Versuchsreihe so gering wie möglich gewählt.

Das Erreichen der TE-Einsatzspannung öffnet ein Messfenster, in welchem die TE über einen Zeitraum von $t_M = 3$ s gemessen werden. Um die Messung auswerten zu können, dürfen die TE innerhalb des Messfensters nicht aussetzen. Aus diesem Grund sieht das Messverfahren vor, dass die elektrische Spannung sofort nach Messung der ersten Teilentladung, die das Messfenster öffnet, nochmals gesteigert wird. Die für diese Versuchsreihe gewählte Spannungssteigerung um 15 % der Einsatzspannung U_i wurde in Vorversuchen experimentell ermittelt. Um keinen elektrischen Durchschlag innerhalb der Messzeit zu provozieren, wurde die Messzeit auf die minimal vom Hersteller vorgegebene Zeit von 3 s gesetzt.

Nach Ablauf der Messzeit wird die Spannung wieder mit v_2 heruntergefahren und die elektrische Spannung U_e bei der die TE aussetzen wird gespeichert. Der TE-Mittelwert wird nach der DIN EN 60270 [48] ermittelt.

5.3.2.2 Diskussion der Ergebnisse der Teilentladungsmessungen

Die in dieser Arbeit durchgeführten TE-Messungen bieten die Möglichkeit, Schwellwerte für elektrische Feldstärken zu bestimmen, bei denen eine Schädigung der Lötstopmmaske durch TE auftritt. In Abbildung 33 im vorangegangenen Abschnitt 5.3.2 wurde bereits das eingestellte Testprofil gezeigt. Das TPP10 gibt die Effektivwerte der Wechselspannung an. Das mit eingezeichnete Wechselspannung abgefahrne Testprofil ist in **Abbildung 34** skizziert.

Um die mit dem Wechselspannungstest aufgenommenen Prüfdaten auf Gleichspannung übertragen zu können, ist Kenntnis über die Ursache des Auftretens von TE notwendig. Diese

werden in den Grundlagen in Abschnitt 2.5 besprochen. Die für TE notwendige lokale Feldstärkeüberhöhung kann sowohl durch Wechselspannung als auch durch Gleichspannung erreicht werden. Bei Wechselspannung, wie auch in Abbildung 34 gezeigt, werden die TE zu dem Zeitpunkt initiiert, zu dem die Wechselspannung den entsprechenden Spannungswert aufweist. Zu Vergleichszwecken der mit Wechselspannung ermittelten TE-Einsatzspannungen mit Gleichspannung wird für die weitere Auswertung daher der Scheitelwert der Sinuskurve als obere Maximalwertabschätzung verwendet. Der Wert der Scheitelspannung der Sinuskurve wird mit $U_{i,peak} = \sqrt{2} \cdot U_i$ berechnet, wobei U_i die TE-Einsatzspannung darstellt, wie sie am TPP10 angezeigt wird.

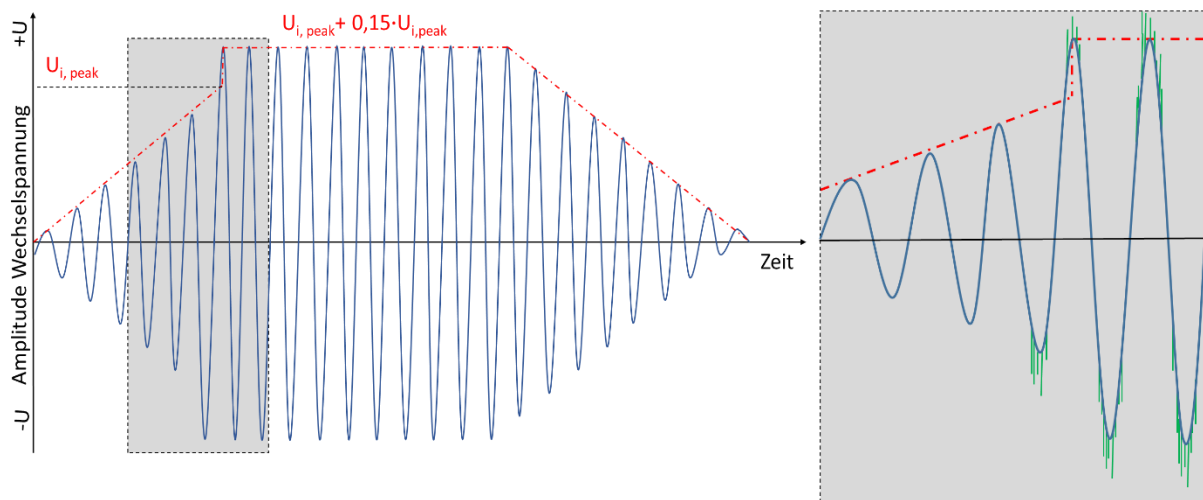


Abbildung 34: Skizziertes TE-Prüfprofil mit eingezeichneter Wechselspannung. In Rot eingezeichnet ist der zeitliche Verlauf des Scheitelwerts der Sinusspannung. Der vergrößerte Ausschnitt rechts zeigt zusätzlich in Grün das zeitliche Auftreten der TE auf dem Prüfprofil.

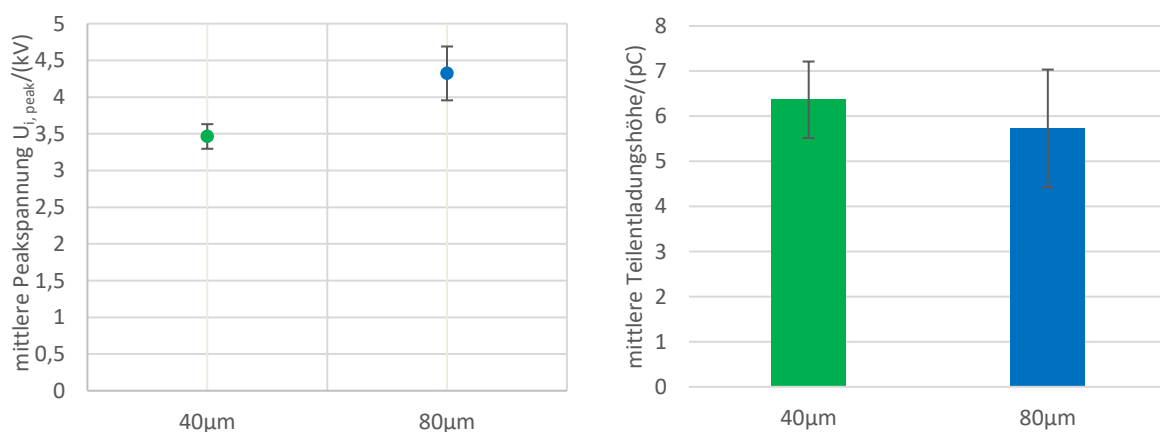


Abbildung 35: Messergebnisse der Teilentladungsprüfung. Aufgezeigt ist auch der Fehler der Mittelwerte. Links: Gemittelte Peakspannung $U_{i,peak}$ bei der die Teilentladungen erstmals aufgetreten sind. Rechts: Gemittelte Teilentladungshöhe.

In **Abbildung 35** sind die bei Raumtemperatur aufgenommenen gemittelten Scheitelwerte $U_{i,peak}$ dargestellt, sowie die gemessenen gemittelten TE- Höhen.

Die mittlere TE-Höhe liegt bei beiden Varianten zwischen 5,7 und 6,4 pC. Innerhalb der Fehler des Mittelwerts ist kein Unterschied zwischen den Varianten feststellbar.

Der Vergleich der Einsetzsspannungen $U_{i,peak}$ für Teilentladungen zeigt einen Unterschied der 40 und 80 μm dicken Lackschichten. Bei den dickeren Lackproben liegt diese bei etwa 4,3 kV. Bei den dünneren Lackproben treten erste TE schon bei 3,5 kV auf.

Die aus $U_{i,peak}$ und der Lötstopplackdicke unter Näherung des Versuchsaufbaus als Plattenkondensator errechneten elektrischen Feldstärken E_{TE} sind in **Tabelle 9** dargestellt. E_{TE} stellt die bei Raumtemperatur nötige elektrische Feldstärke dar, um Teilentladungen größer 2,2 pC zu erzeugen.

Tabelle 9: Errechnete TE-Feldstärke und Fehler des Mittelwerts bei mittlerer Peakspannung $U_{i,peak}$.

LSL-DICKE	$U_{i,PEAK}$ IN kV	ELEKTRISCHE FELDESTÄRKE E_{TE} IN V/m
40 μm	$3,46 \pm 0,17$	$(8,66 \pm 0,42) \cdot 10^7$
80 μm	$4,32 \pm 0,37$	$(5,40 \pm 0,46) \cdot 10^7$

Bei den errechneten elektrischen Feldstärken E_{TE} , wie auch schon bei $U_{i,peak}$ ist ein Unterschied zwischen den dicken und dünnen LSL-Proben zu erkennen. So ist bei dickem Lack eine geringere elektrische Feldstärke für das Auftreten von Teilentladungen nötig als bei dünnem Lack.

Die simulativ für die Kammstruktur abgeschätzten Feldstärken an den Leiterbahnspitzen liegen damit in der Größenordnung der experimentell ermittelten Feldstärke für Teilentladungseffekte. Es konnte damit experimentell bestätigt werden, dass in den in dieser Arbeit durchgeführten HV-SIR Tests von Leiterplatten mit Kammstrukturen Feldstärken erreicht werden, die ausreichend hoch sind, um Teilentladungseffekte zu erzeugen. Diese schädigen den isolierenden Lötstopplack und begünstigen damit das AMP-Wachstum.

Die nach dem HV-SIR-Test detektierten AMP-Pfade sind zwischen den Leiterbahnen deutlich kürzer als an der Leiterbahnspitze. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Feldstärke zwischen den Leiterbahnen zu Beginn des HV-SIR-Tests nicht ausreichend hoch ist, um Teilentladungseffekte hervorzurufen. Die Lagerung der Leiterplatten in einer Klimakammer mit 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte führt jedoch im Laufe der Testzeit zu zunehmender Materialalterung. Diese hat Einfluss auf die Teilentladungsfestigkeit der Materialien. Dabei ist eine Herabsetzung der für Teilentladung nötigen elektrischen Feldstärke denkbar. Damit finden die das AMP-Wachstum fördernden Teilentladungen zwischen den Leiterbahnen erst mit zunehmender Testzeit statt.

5.4 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Durch die beispielhaft für Lötstopplack A1 für unterschiedliche Lackdicken durchgeführten experimentellen Untersuchungen konnten mehrere bis dato nicht publizierte Unterschiede zwischen dicken (80 µm) und dünnen (40 µm) Lötstopplackproben aufgedeckt werden. So konnte gezeigt werden, dass dicker im Vergleich zu dünnem Lack mit 0,097 % bei 60 °C /80 % r.h. über eine prozentual zum Trockengewicht gemessene etwa doppelt so hohe Feuchteaufnahme wie dünner Lötstopplack mit 0,051 % verfügt. Die Ergebnisse der T_g -Messungen weisen unabhängig von der Anzahl der durchlaufenen Reflowzyklen mit Werten zwischen 172,3 °C und 183,2 °C auf eine geringere Glasübergangstemperatur des dickeren, im Vergleich zu dünnem Lack mit Werten zwischen 185,2 °C und 196,6 °C hin. Die Teilentladungsmessungen haben zusätzlich gezeigt, dass bei Proben mit dick aufgetragenem Lack mit $(5,40 \pm 0,46) \cdot 10^7$ V/m bereits bei geringerer elektrischer Feldstärke Teilentladungen verursacht werden als bei Proben mit dünnerem Lack mit $(8,66 \pm 0,42) \cdot 10^7$ V/m.

Da es sich bei dickem und dünnem Lack um dieselbe Lackrezeptur handelt, können allein die Prozessschritte Aushärtung und Belichtung für die unterschiedlichen Eigenschaften der beiden Lackdicken verantwortlich sein. Es ist davon auszugehen, dass das im Lötstopplack vorhandene Lösemittel während des Vortrocknens der dickeren Lackschicht durch das Doppel-druckverfahren vollständig verdampft. Da die thermische Aushärtezeit mit über 1 h ausreichend lang gewählt wurde, ist weiterhin anzunehmen, dass beide Lackdicken während des Einbrennprozesses gleichmäßig temperiert werden. Demnach ist allein die Belichtung der Lackschichten für die unterschiedlichen Eigenschaften verantwortlich.

Das Lambert-Beerschen-Gesetz [14] beschreibt die Abnahme der UV-Intensität mit steigender Lackschichtdicke.

$$I(\lambda, h) = I_0 \cdot 10^{-Ext(\lambda, h)} \quad (9)$$

Die Intensität $I(\lambda, h)$ der UV-Strahlung ist abhängig von der Lacktiefe h und $Ext(\lambda, h)$, der dekadischen Extinktion des Lacks. Die dekadische Extinktion gibt die Absorption der Strahlung im Lötstopplack an und ist in Abhängigkeit des Materials und der verwendeten Strahlung definiert. I_0 stellt die Intensität der Strahlung an der Lackoberfläche dar.

Die verringerte Intensität der UV-Strahlung in hoher Lacktiefe führt so zu unvollständiger Radikalisierung der Photoinitiatoren. Dadurch bildet sich das Netzwerk der Acrylgruppen des multifunktionalen Bindemittels nicht oder nur unzureichend aus (siehe **Abbildung 36** oder auch Abschnitt 2.2.) und es entsteht ein Härtingsgradient entlang der Lacktiefe.

Unterstützt wird die These der unterschiedlich ausgebildeten Vernetzungen des dicken und dünnen Lacks durch die in dieser Arbeit gefundenen Unterschiede in der Glasübergangstemperatur für die beiden Lackschichtdicken.

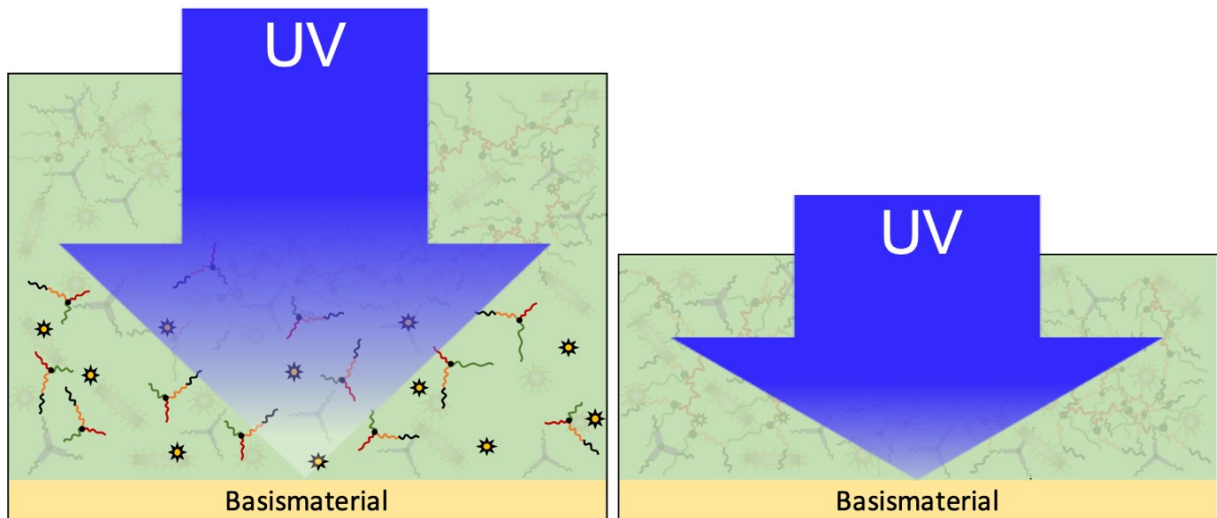


Abbildung 36: Gezeigt ist im Querschnitt Lötstopplack auf Basismaterial nach der thermischen Aushärtung und der Belichtung mit UV. Durch die Abnahme der UV-Intensität in größeren Lacktiefen verbleiben die Acrylgruppen des multifunktionalen Bindemittels unvernernetzt, da die Photoinitiatoren nicht radikalisiert werden können.

In dickem Lötstopplack wurde nach dem Trocknen bei 60 °C im Vergleich zu dünnem Lötstopplack mehr Restfeuchte detektiert. Dieses Verhalten wurde bereits in der Literatur [31] beschrieben. Die höhere detektierte Restfeuchte ist ein Hinweis auf einen höheren Anteil an polaren Gruppen im dicken Lötstopplack durch unvernetzte Acrylgruppen. Die gemessene höhere Feuchtaufnahme von dickem Lack unterstützt dieses Wirkmodell. Zusätzlich dazu kann die andersartige Vernetzung des dicken im Vergleich zu dünnem Lack zu mehr freiem Volumen führen und damit zu einer relativ erhöhten Feuchtaufnahme. Durch welche Lackeigenschaft (polare Gruppen oder freies Volumen) die Feuchtaufnahme des Lacks beeinflusst ist, wird in der Literatur noch diskutiert [31]. Zu vermuten ist, dass die Feuchtigkeit sowohl mit den polaren Gruppen wechselwirkt als auch im freien Volumen des Lacks vorliegt und damit beide Parameter Einfluss auf die Feuchtaufnahme der Lacke nehmen.

Die niedrigere elektrische Feldstärke, die für Teilentladungseffekte bei dickem Lötstopplack notwendig ist, kann neben der höheren Feuchtaufnahme auch mit der andersartig ausgeprägten Vernetzung des dicken Lacks begründet werden.

Damit konnte in diesem Kapitel nachgewiesen werden, dass von dickem Lötstopplack sowohl mehr Feuchte aufgenommen werden kann, als auch Teilentladungseffekte bereits bei niedrigeren Feldstärken auftreten als bei dünnem Lötstopplack. Diese beiden Parameter fördern maßgeblich das Wachstum des AMP.

VI. CHARAKTERISIERUNG DES ANODISCHEN MIGRATIONSPHÄNOMENS IN DER LEITERPLATTE

In diesem Kapitel soll das anodische Migrationsphänomen in der Leiterplatte charakterisiert werden. Hierzu wird zu Beginn dieses Kapitels, in Abschnitt 6.1, die chemische Zusammensetzung des oxidierten Kupfers entlang des Migrationspfads analysiert. Dabei wird zu Beginn die allgemeine Vorgehensweise für die Analyse der anodischen Migrationspfade erläutert. Anschließend werden die mittels XRD (Röntgendiffraktion, englisch X-Ray Diffraction) und XPS Röntgenphotoelektronenspektroskopie, englisch X-Ray Photoelectron Spectroscopy) ermittelten exakten chemischen Zusammensetzungen des AMP-Materials vorgestellt. Zum Schluss werden mögliche chemische Reaktionen diskutiert.

Im nachfolgenden Abschnitt 6.2 werden die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse der Analyse des Einflusses von Zeit, der Höhe des elektrischen Felds und der elektrischen Spannung auf das AMP vorgestellt. Vorgestellt werden in diesem Abschnitt die Untersuchungsergebnisse der mittleren AMP-Länge und -Anzahl sowie das entwickelte Lebensdauermodell für einen Ausfall der Leiterplatte durch AMP.

Abschnitt 6.3 beschreibt den Einfluss der Lackdicke auf AMP, der nachfolgende Abschnitt 6.4 die Abhängigkeit der Lötstopplackaushärtung sowie einer Vorbeanspruchung der Leiterplatten durch Temperaturwechselbelastung. Die Auswirkungen einer Veränderung der Lötstopplackrezeptur auf die Intensität und Ausprägung des AMP wird in Abschnitt 6.5 besprochen. In diesem Rahmen werden Kenngrößen für einen AMP-reduzierenden Lötstopplack analysiert und vorgestellt.

6.1 Analyse der chemischen Zusammensetzung des AMP

Um die Auswirkung des anodischen Migrationsphänomens (AMP) auf die Betriebsfestigkeit von Leiterplatten bewerten zu können, ist die Analyse des migrierenden Materials unerlässlich. Es handelt sich dabei immer um ein orange- bis rotfarbiges Material. Die Migrationspfade verlaufen normalerweise immer im Lötstopplack oder an der Lötstopplack-Basismaterialgrenze. Unter besonderen Voraussetzungen sind auch Migrationspfade im Basismaterial der Leiterplatte zu beobachten. Diese sind nicht zu verwechseln mit dem CAF-Phänomen, da die Pfade im Epoxidharz und nicht entlang der Glasfasern im Basismaterial auftreten. Details finden sich in der Einführung in Kapitel III.

Entlang der Migrationspfade werden mittels REM-EDX immer Kupfer, Sauerstoff, Chlor, sowie punktuell Schwefel detektiert. Dass das während des HV-SIR-Tests entstehende, migrierende Material unter den gegebenen Testbedingungen mit 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte leitfähig ist, zeigt sich beispielsweise in Abschnitt 6.2.1 in **Abbildung 53** über durchgebrannte anodische Migrationspfade im Lötstopplack. Mittels XRD und XPS Analyse kann das migrierende Material als Cu_2O , ein gelbes bis rotbraunes, halbleitendes Material [63] [64] identifiziert

werden. Die Analysen werden in Abschnitt 6.1.2.1 und 6.1.2.2 gezeigt, Kupfer-Chlor oder Kupfer-Schwefelverbindungen konnten nicht nachgewiesen werden. Im nächsten Abschnitt 6.1.1 soll zu Beginn die allgemeine Vorgehensweise für die Analyse der AMP-Pfade vorgestellt werden.

6.1.1 Allgemeine Vorgehensweise bei der Analyse des AMP-Materials

Für alle in dieser Arbeit durchgeführten HV-SIR-Tests (siehe Tabelle 3 und Tabelle 4) wurden für alle Leiterplattenvariationen Querschliffe der anodischen Migrationspfade erstellt. Diese Variationen decken unterschiedliche elektrische Spannungen, Leiterbahnabstände, Lötstopplackdicken, Materialien, Materialalterungen und elektrische Feldstärken ab. Die Querschliffe wurden anschließend zuerst mittels Lichtmikroskop (Details in Abschnitt 9.1) auf die Farbgebung des AMP sowie den Ort der Migration (im Basismaterial und/oder Lötstopplack) analysiert. Ergänzend zu Materialanalysen mittels REM-EDX, XRD oder XPS erlaubt die Analyse der Farbgebung des AMP Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung des oxidierten Materials. In **Tabelle 10** sind die Summenformeln einiger wichtiger Kupferverbindungen mit Chlor und Sauerstoff, sowie ihre Farbgebung aufgeführt.

Tabelle 10: Name des in der Natur vorkommenden Minerals, sowie seine Summenformel und Farbgebung. [65] [66] [67] [63] [64]

MINERAL	NAME	SUMMENFORMEL	FARBGEBUNG
Kupfer	Kupfer	Cu	kupferrot
Cuprit	Kupfer(I) Oxid	Cu ₂ O	gelb-braun, rotbraun (Wasserfrei), grün (Dihydrat)
Tenorit	Kupfer(II) Oxid	CuO	schwarz bis braunschwarz
Atacamit	Kupfer (II) Chlorid Hydroxid	Cu ₂ (OH) ₃ Cl	grün bis schwarzgrün
Paratacamit	-	Cu ₃ (OH) ₆ Cl ₂	grünlich schwarz, dunkelgrün
Nantokit	Kupfer(I) Chlorid	CuCl	farblos, weiß, graulich, grün
Tholbachit	Kupfer(II) Chlorid	CuCl ₂	gelb bis braun (wasserfrei), blaugrün (Dihydrat)
Spertiniit	Kupfer(II) Hydroxid	Cu(OH) ₂	blau, blaugrün

Mit seiner gelb-braunen bis rotbraunen Farbgebung ist das Cu₂O klar zu unterscheiden von dem grün erscheinenden Cu₂(OH)₃Cl [58], das in der Literatur als das Material beschrieben wird, welches sich entlang der CAF-Pfade entlang der Glasfasern im Basismaterial der Leiterplatte ausbildet. CuCl₂, welches wie Cu₂O eine gelb bis braune Färbung aufweist, konnte mit

XRD in dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Bekräftigt wird dieses Analyseergebnis durch die Auswertung der REM-EDX-Spektren in dieser Arbeit, siehe hierfür auch die beispielhaft gezeigten Punktspektren in Abbildung 40 und Tabelle 11 oder das Mapping in Abbildung 41. Die beispielhaft gezeigten Daten zeigen, dass bei allen in dieser Arbeit untersuchten AMP-Pfaden immer nur sehr wenig Chlor, aber dafür viel Kupfer detektiert wird. So liegt das Atomverhältnis nach Tabelle 11 im Mittel bei 68 ± 48 Atome Kupfer auf 1 Atom Chlor. Für die Bildung von CuCl_2 wären jedoch 2 Chloratome auf 1 Kupferatom notwendig. Die hohe Standardabweichung resultiert aus der starken Schwankung der Menge an Chloratomen abhängig vom gewählten Messpunkt auf dem AMP.

Der Migrationspfad wird mit dem Lichtmikroskop im Auflicht im Hellfeld (BF), Dunkelfeld (DF), als auch mit UV-Licht sowie in Querschliffen untersucht.

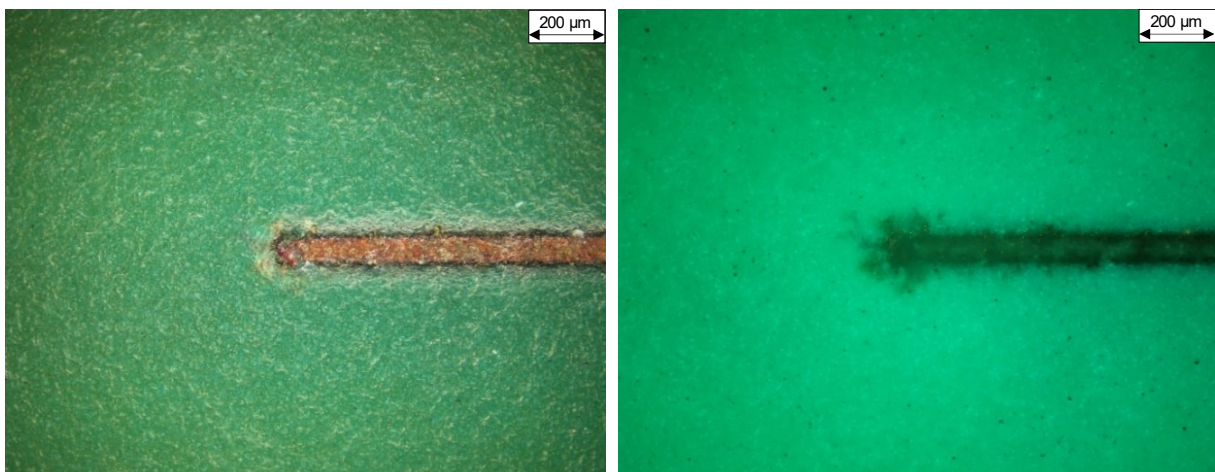


Abbildung 37: Blick auf die Leiterplattenoberfläche auf eine anodische Kammspitze mit dem Lichtmikroskop. Links im DF-Modus, rechts im UV-Modus des Lichtmikroskops. Getestet wurde Lötstopplack A1 auf Basismaterial N für 1500 h bei 1000 V und 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte. Der Leiterbahnabstand liegt bei 2325 µm.

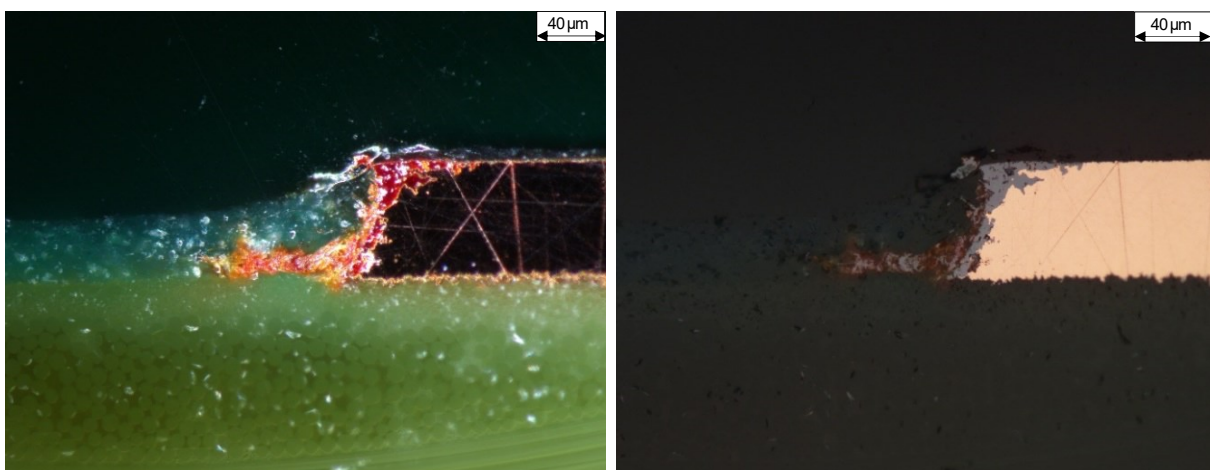


Abbildung 38: Querschliff aus Abbildung 37 parallel zum anodischen Migrationsphänomen. Links ist der Querschliff mittels des Lichtmikroskops im DF-Modus, rechts im BF-Modus gezeigt.

In **Abbildung 37** ist beispielhaft die Leiterplattenoberfläche mit einer anodischen Kammspitze dargestellt. Das Bild links wurde mit dem Lichtmikroskop im DF-Modus aufgenommen, um die Farbe des migrierenden Materials erkennen zu können. Das Bild rechts wurde im UV-Modus aufgenommen. Dort sind die oxidierten Bereiche der Leiterbahn, sowie der anodische Migrationspfad deutlich zu erkennen. In **Abbildung 38** ist der Querschliff des in **Abbildung 37** gezeigten AMP abgebildet, links die Darstellung mit dem Lichtmikroskop im DF-Modus, rechts mit dem Lichtmikroskop im BF-Modus. Während in der rechten Darstellung die oxidierten Bereiche der Leiterbahn besonders deutlich hervortreten, ist in der linken Darstellung deutlich die gelbe bis rotbraune Farbe des Cu_2O sichtbar.

Weitere Untersuchungen erfolgten mit dem Rasterelektronenmikroskop (REM, Abschnitt 9.1). Das REM erlaubt durch die höhere Auflösung eine genauere Analyse des AMP-Pfads zum Beispiel entlang der Füllstoffe. So werden mögliche Hohlräume im Lack deutlich sichtbar und die oxidierten Bereiche des AMP können klarer identifiziert werden. Auch Risse im Lötstopplack können bei der Untersuchung der Leiterplattenoberfläche eindeutiger detektiert werden.

Die verschiedenen Materialien werden besonders gut sichtbar bei Analyse mittels des Rückstreudetektors (BSD, englisch Backscattering-Detector), Risse und Oberflächen können besonders gut mittels des Sekundärelektronendetektors (SE-Detektor) analysiert werden. Unter Hochvakuum werden besonders hohe Auflösungen von 4,5 nm mit dem BSD-Detektor erreicht [68]. Hierfür muss allerdings die Probe mit einem leitfähigen Material (zum Beispiel Gold) besputtert werden (Abschnitt 9.1).

Nach der Analyse mit dem Rasterelektronenmikroskop wird die Probe mit dem an das REM angeschlossenen EDX (Energy Dispersive X-Ray, Energiedispersive Röntgenspektroskopie) auf seine elementare Zusammensetzung überprüft.

In **Abbildung 39** ist der mittels REM und BSD-Detektor untersuchte anodische Migrationspfad aus **Abbildung 38** und **Abbildung 37** gezeigt. Deutlich zu erkennen sind in dieser Darstellung die Füllstoffe des Lötstopplacks A1 sowie des Basismaterials N. In **Abbildung 40** sind die farbig umrandeten Bereiche A bis D vergrößert dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist auch der dunkler erscheinende oxidierte Bereich der Leiterbahn, sowie das in den Lötstopplack beziehungsweise an der Lötstopplack-Basismaterial-Grenze migrierende Material. Des Weiteren findet sich oxidiertes Material auf der Lötstopplackoberfläche. Um eine Übersicht über die Elemente und Elementverteilung zu erhalten wird mit dem EDX-Detektor ein Mapping (**Abbildung 41**) durchgeführt.

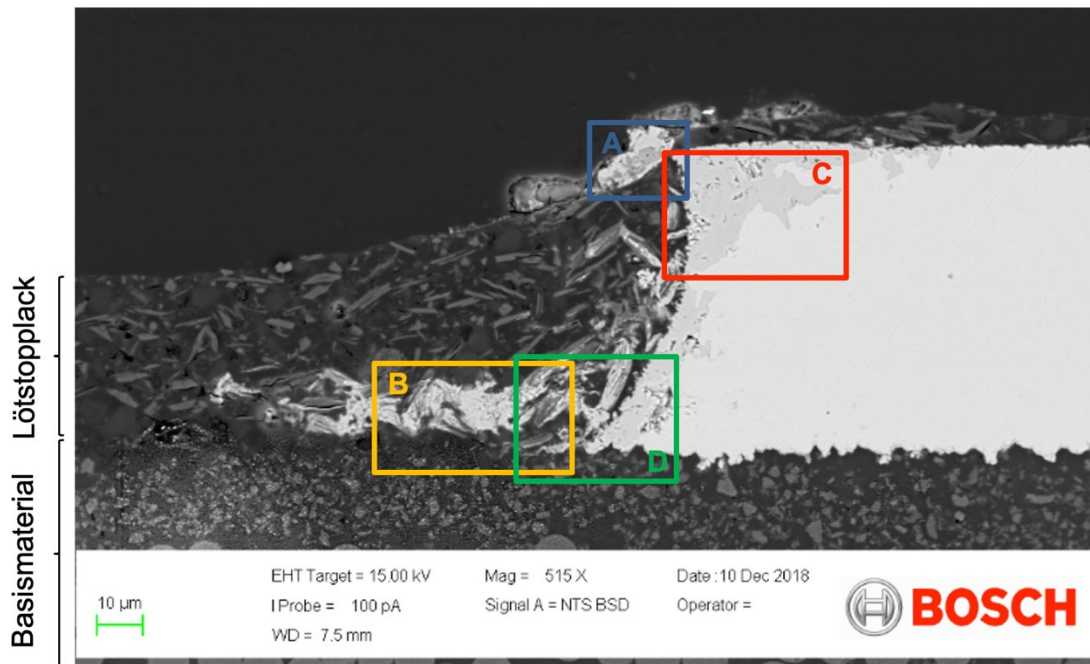


Abbildung 39: REM-Aufnahme des Migrationspfads in Abbildung 38. Die farbige umrahmten nummerierten Bereiche sind vergrößert in Abbildung 40 dargestellt. Die Probe wurde für höher aufgelöste Untersuchungen mit dem REM unter Hochvakuum mit Gold besputtert.

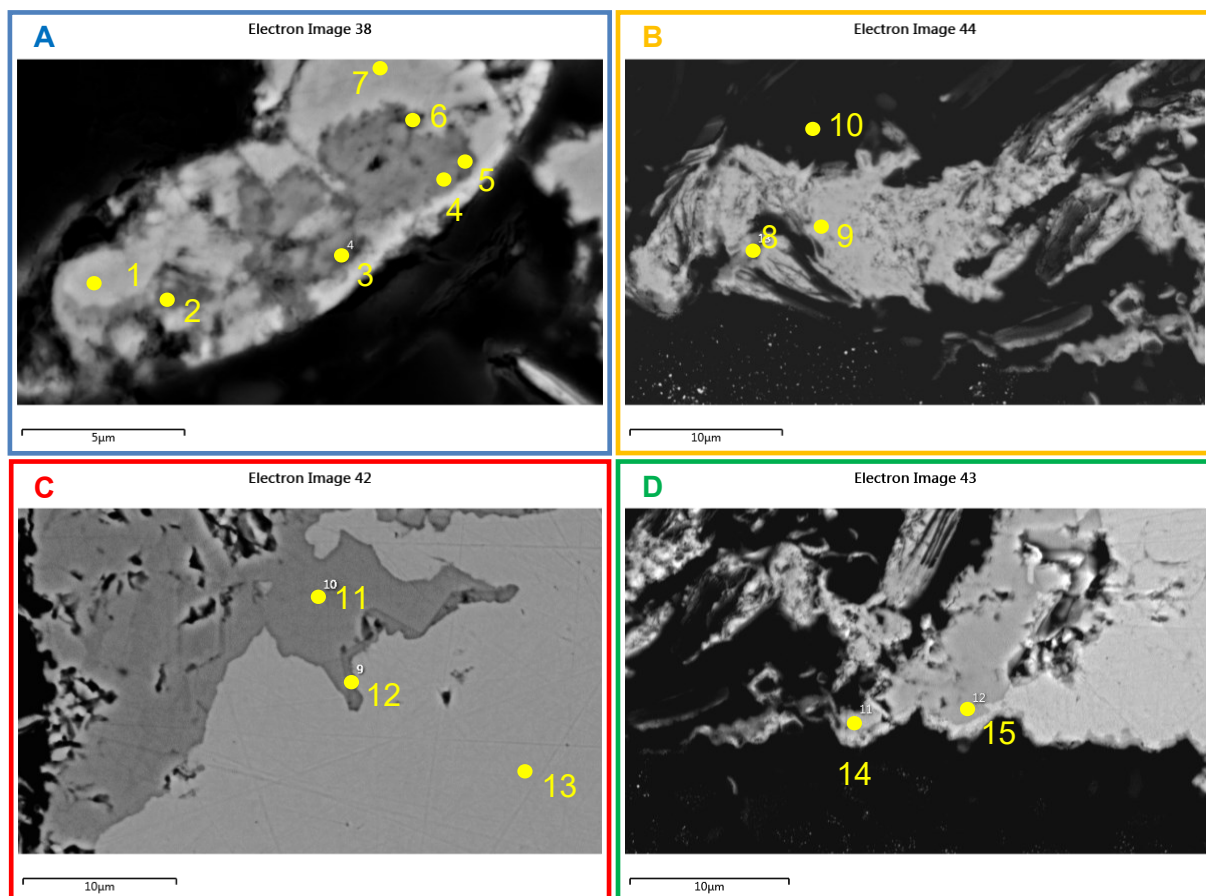


Abbildung 40: Vergrößerte REM Aufnahmen von Abbildung 39 mit aufgenommenen Punktspektren. Die Elementzusammensetzung ist in Tabelle 11 aufgeführt. Deutlich zu erkennen sind unterschiedliche Grauschattierungen des oxidierten Materials. Diese zeigen unterschiedliche Chlor- und Schwefelkonzentrationen an, wie der Elementzusammensetzung in Tabelle 11 entnommen werden kann.

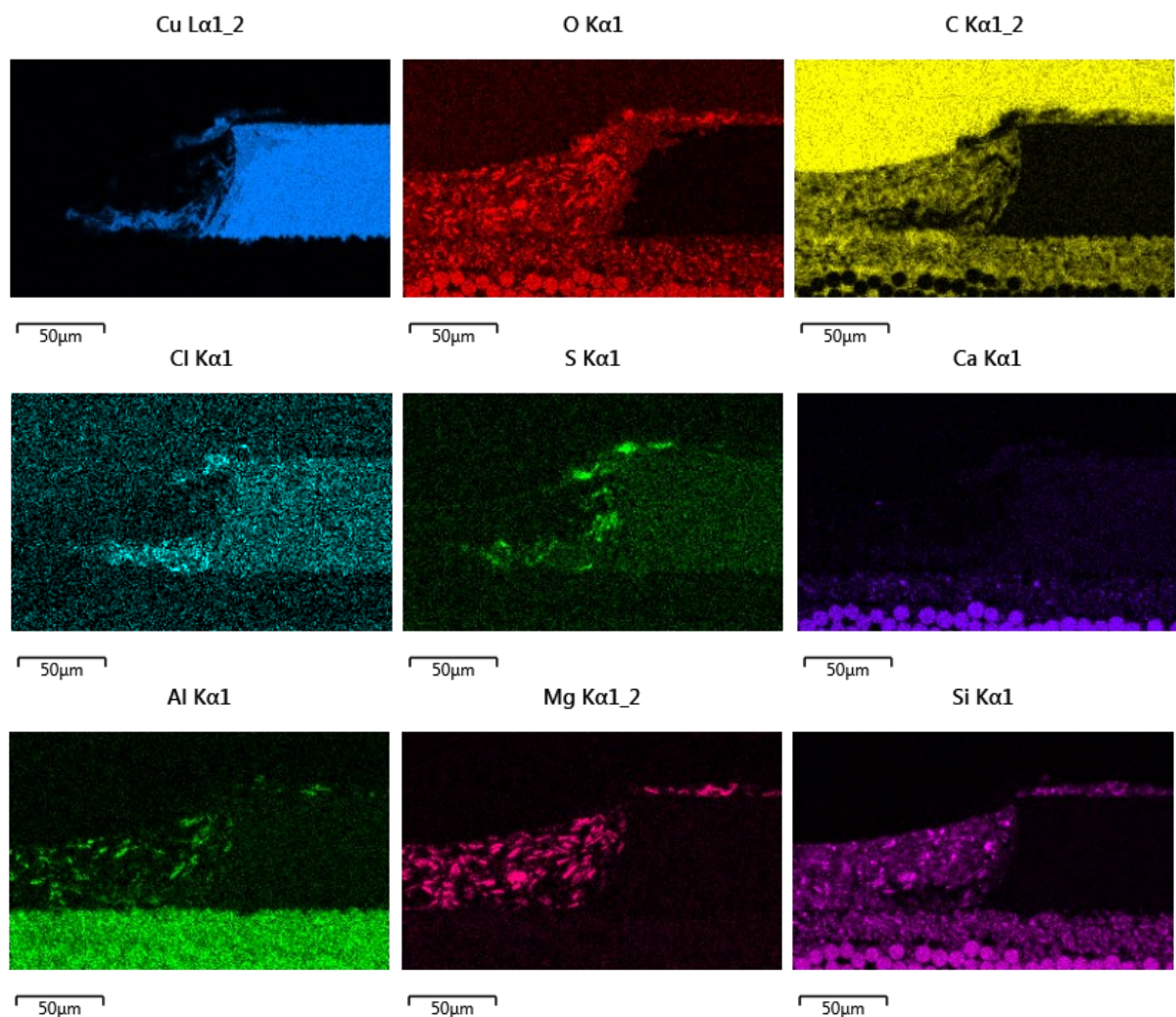


Abbildung 41: REM-EDX-Mapping des AMP-Pfads in Abbildung 39.

Deutlich zu erkennen ist, das Kupfer (Cu) auf der Leiterbahn und entlang des Migrationspfads, Sauerstoff (O) in Lötstopplack und Basismaterial, aber auch entlang des oxidierten Bereichs der Leiterbahn und des AMP-Pfads detektiert wird. Kohlenstoff (C) findet sich verteilt über den kompletten Querschliff, lediglich die Glasfasern, die Kupferleiterbahn und das migrierende Material weisen keinen Kohlenstoff auf. Chlor (Cl) findet sich entlang des migrierenden Materials und Schwefel (S) punktuell auf dem Migrationspfad. Der scheinbare Anteil an Schwefel und Chlor auf der Kupferleiterbahn ist auf Peaküberlagerungen zurückzuführen. Calcium (Ca) wird lediglich im Basismaterial in Füllstoffen und in den Glasfasern detektiert. Aluminium (Al) tritt sowohl im Basismaterial als auch im Lötstopplack in den Füllstoffen auf. Magnesium (Mg) ist ebenfalls in den Füllstoffen im Lötstopplack enthalten, genauso wie Silizium (Si). Dieses findet sich zusätzlich wieder im Basismaterial, in den Füllstoffen und im Glasfasergewebe. Um eine detailliertere Aussage über die Zusammensetzung des AMP zu erhalten werden Punktspektren mit einer Aufnahmezeit von je 100 Sekunden aufgenommen.

Die Bereiche, in welchen Punktspektren aufgenommen wurden, sind in Abbildung 39 und Abbildung 40 dargestellt. Die zu den Punktspektren gehörigen Elementverteilungen findet sich in Tabelle 11. Bei den vergrößerten REM-Aufnahmen in Abbildung 40 sind deutlich zu erkennen, dass es sich bei dem oxidierten Material entlang des AMP und auf dem Lötstopplack um ein inhomogenes Material handelt. Die Elementanalyse in **Tabelle 11** zeigt unterschiedliche Schwefel- und Chlorkonzentrationen an. Mit einer „0“ sind Spektren gekennzeichnet, bei welchen kein Chlor oder Schwefel gefunden wird. Mit „+“ sind die Spektren markiert, bei denen das Element bis zu einem Atomprozent detektiert wird, mit „++“ sind Werte zwischen einem und zwei Atomprozent gekennzeichnet. Mit „++++++“ sind Werte oberhalb von fünf Atomprozent gekennzeichnet. Auffällig ist, dass Chlor und Schwefel nie gleichzeitig in hoher Konzentration auftreten, was indiziert, dass diese nicht in ein und derselben Verbindung vorliegen. Zusätzlich markiert sind Referenzspektren die im Lötstopplack und auf der Kupferleiterbahn aufgenommen wurden.

Tabelle 11: Elementzusammensetzung in Atomprozent der mittels REM-EDX aufgenommenen Punktspektren aus den vergrößerten REM-Aufnahmen des Querschliffs in Abbildung 40 (Messdauer 100 Sekunden). Die Detektion von Gold (Au) ist auf den Besputterungsvorgang zurückzuführen.

ORT	NR.	ELEMENTZUSAMMENSETZUNG IN At.-%								VERTEILUNG	
		Cu	O	C	Cl	S	Si	Al	Au	Cl	S
A: OXIDIERTES MATERIAL AUF DEM LSL	1	35,6	17,4	45,7	0,4	-	-	-	1,0	+	0
	2	25,9	26,6	39,0	1,2	5,1	0,4	-	1,7	++	++++++
	3	25,6	31,4	35,6	0,3	5,4	0,4	-	1,3	+	++++++
	4	24,1	27,7	44,7	1,8	0,5	0,2	-	0,9	++	+
	5	21,7	26,6	45,5	5,4	-	-	-	0,8	++++++	0
	6	23,2	25,8	43,6	5,9	0,4	-	-	0,9	++++++	+
	7	32,5	14,6	51,4	0,6	-	-	-	0,9	+	0
B: OXIDIERTES MATERIAL ENTLANG AMP	8	31,6	30,2	29,9	0,4	6,0	-	0,5	1,3	+	++++++
	9	41,8	17,9	37,8	0,9	-	-	0,4	1,1	+	0
	10	1,3	20,4	61,6	-	-	14,1		2,5	Referenz LSL	
C: OXIDIERTE CU-LB OBEN	11	42,1	17,7	38,7	0,3	-	-	-	1,2	+	0
	12	43,1	17,4	38,1	0,3	-	-	-	1,2	+	0
	13	45,6	0,9	51,3	-	-	-	-	2,3	Referenz Cu-LB	
D: OXIDIERTE CU-LB UNTEN	14	43,9	20,9	33,1	0,5	-	-	0,4	1,2	+	0
	15	44,3	18,4	35,7	0,4	-	-	-	1,2	+	0

Um den Ursprung des durchgängig im Migrationspfad detektierten Chlor, sowie der punktuell erhöhten Schwefelkonzentration im oxidierten Material der Anode zu klären, wurden REM-EDX Messungen an Querschliffen der Anode und Kathode an mehreren Beispielproben durchgeführt. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Messungen direkt aufeinander folgend vorgenommen wurden, die Messzeiten besonders lang waren (400 s) und die gewählten REM-EDX-Parameter gleich waren. Lange Messzeiten erhöhen die Wahrscheinlichkeit, auch nur in geringer Konzentration vertretene Elemente oberhalb der Nachweisgrenze zu detektieren. Die Wahl derselben REM-EDX-Parameter, wie zum Beispiel derselben Working Distance (Arbeitsabstand des Detektors) und derselben Vergrößerung erlauben einen direkten quantitativen Vergleich der Elementverteilung an Anode und Kathode.

Dabei zeigte sich im Mapping lediglich an der Anode eine erhöhte Chlorkonzentration. Auch die punktuell erhöhte Schwefelkonzentration konnte lediglich an der Anode festgestellt werden. Es ist zu vermuten, dass sowohl Schwefel als auch Chlor in geringer Menge homogen verteilt im Leiterplattenmaterial vorliegen. Mögliche Schwefelquellen in der Leiterplattenherstellung sind Photoinitiatoren, Methansulphonsäure aus dem Chemisch-Zinn-Prozess oder Peroxo-Sulfate aus dem Kupferätzprozess bei der Leiterplattenherstellung. Chlor wird beispielsweise bei der Herstellung der Epoxidharze eingesetzt und findet sich in Spuren in der Leiterplatte. Laut der Definition der IEC 61249-2-21 [69] sind für ein halogenfreies Produkt maximal 900 ppm (Gewichtsprozent) Chlor erlaubt.

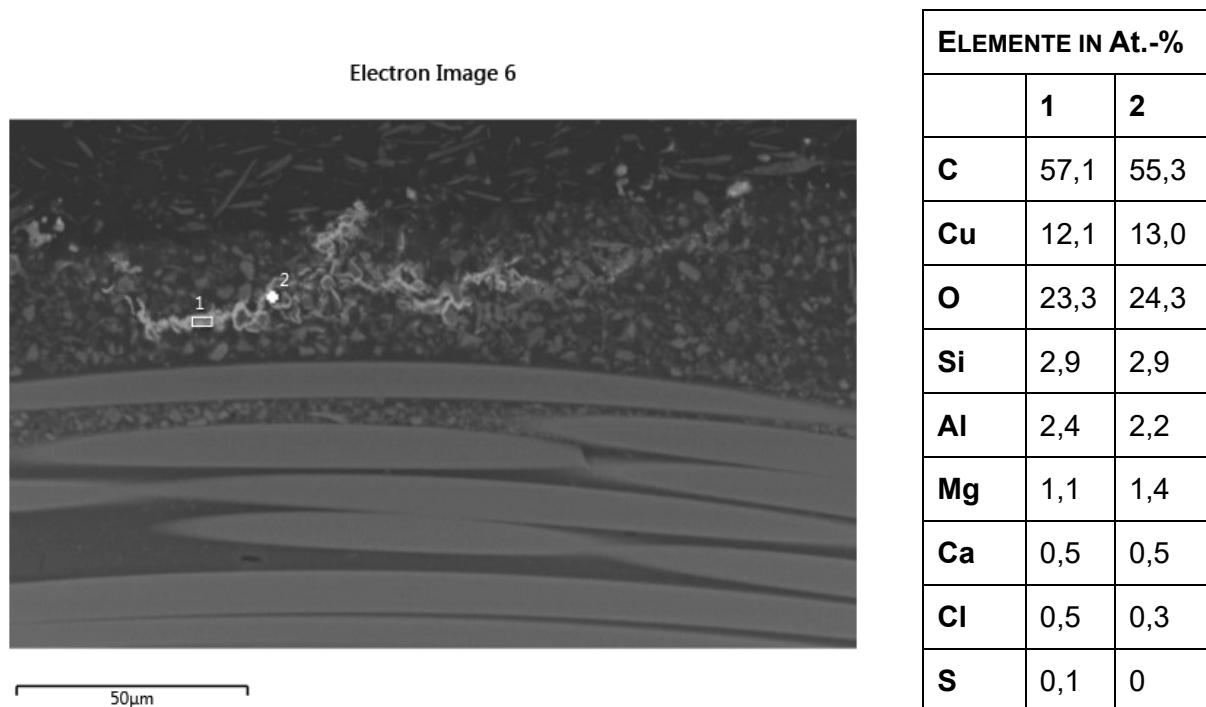


Abbildung 42: Links: REM-EDX Aufnahme mit dem BSD-Detektor eines beispielhaften Querschliffs von Lackvariante A1 auf Basismaterial A. Der Lötstopplack wurde doppelt aufgetragen, die Leiterplatte wurde für 1480 h mit 1000 V getestet bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte. Der Leiterbahnabstand liegt bei 2325 µm. Rechts: Elementverteilung der aufgenommenen REM-EDX-Spektren 1 und 2 in Atomprozent. (Messdauer 87 s).

Bei annähernd allen im Rahmen dieser Dissertation und in Vorversuchen untersuchten Leiterplatten wurden die AMP-Pfade hauptsächlich im Lötstopplack beziehungsweise an der Lötstopplack-Basismaterial-Grenze beobachtet. Lediglich bei den in der Lötstopplackvariation (Leiterplattenlayout L3 in Tabelle 3) untersuchten Leiterplattenproben konnten gehäuft anodische Migrationsphänomene im Basismaterial der Leiterplatte identifiziert werden.

In **Abbildung 42** ist beispielhaft ein Ausschnitt eines anodischen Migrationspfads, im Basismaterial der Leiterplatte gezeigt. Im oberen Bildausschnitt ist der Lötstopplack mit seinen länglichen Füllstoffen zu erkennen. Der mittlere Teil des Bilds stellt das Epoxidharz des Basismaterials und seine Füllstoffe dar, in dem auch das AMP auftritt. Im unteren Teil des Bilds sind die Glasfaserbündel des Basismaterials zu erkennen. In **Abbildung 42** deutlich zu erkennen ist auch, dass der Migrationspfad im Basismaterial unabhängig von den Glasfasern auftritt, womit er nicht mit dem CAF-Phänomen zu verwechseln ist [56]. Die Untersuchung des AMP-Pfads auf seine Elementzusammensetzung mittels REM-EDX zeigt klar wieder die Elemente Kupfer, Sauerstoff und wenig Chlor entlang des Pfads auf. Die Farbe des AMP-Pfads ist wieder orangefarben, was auf die Ausbildung von Cu_2O hindeutet, wie auch bereits bei allen anderen Migrationspfaden. Die anderen Elemente welche im in **Abbildung 42** gezeigten Querschliff detektiert werden, gehören zum Basismaterial.

6.1.2 Detaillierte Analyse des oxidierten Materials an der Anode

Anhand zweier Beispielpfaden wurde das oxidierte Material auf und in der Leiterplatte im Weiteren detaillierter untersucht. Hierfür wurden für 1355 Stunden mit 500 V elektrischer Spannung bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte getestete Proben mit unterschiedlicher Lackdicke verwendet. Ziel war es, das sich besonders bei dünnem Lötstopplackauftrag auf der Lötstopplackoberfläche der Anodenspitze befindliche, oxidierte Material, sowie das migrierende Material im Lötstopplack beziehungsweise an der Lötstopplack-Basismaterial-Grenze zu analysieren. Für das auf dem Lötstopplack befindliche Material wurde die Analysemethode XPS (Röntgenphotoelektronenspektroskopie, englisch X-Ray Photoelectron Spectroscopy) gewählt, für das migrierende Material im Lötstopplack XRD (Röntgendiffraktion englisch X-Ray Diffraction). Die Materialanalyse mittels XRD erlaubt es auch kleine, nicht flächig vorhandene kristalline Materialien auf seine chemische Zusammensetzung zu analysieren. Rauschen durch umliegende amorphe Verbindungen tritt bei dieser Methode im Gegensatz zu EDX und XPS nicht auf. Lediglich durch die kristalline Struktur der Füllstoffe im Lötstopplack und Basismaterial wird ein XRD-Signal gemessen, das nicht zum AMP gehört. Die Analyseergebnisse werden in den nächsten beiden Abschnitten 6.1.2.1 und 6.1.2.2 beschrieben.

6.1.2.1 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des oxidierten Materials auf dem Lötstopplack

Das großflächig oxidierte Material auf dem dünnen Lötstopplack (Abschnitt 6.3) wurde mittels XPS auf seine chemische Zusammensetzung und den Oxidationszustand analysiert. Die XPS Messungen in dieser Arbeit wurden unter Vakuum mit einem Gerät der Firma Thermo VG Scientific, Typ K-Alpha durchgeführt. Die Probenanregung erfolgte mit einer monochromatischen Al-K α Röntgenquelle, die Leistung der Röntgenquelle lag bei ~75 W und der Röntgenspot hatte einen Durchmesser von 90 μm . Vor der Probenanalyse wurde durch Sputtern der Probe mit monoatomaren Argonionen etwa 25 bis 50 nm Material abgetragen, wodurch Störlagen durch zum Beispiel Handhabung und Kontakt mit Luftsauerstoff entfernt werden.

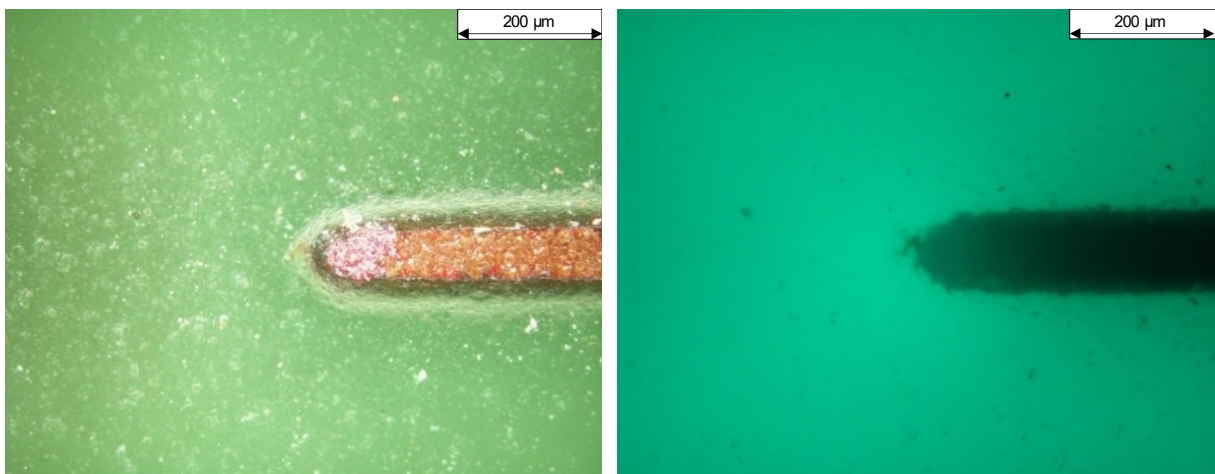


Abbildung 43: Mit dem Lichtmikroskop senkrecht zur Leiterplattenoberfläche aufgenommene Anodenspitze mit AMP. Links im DF-Modus, rechts im UV-Modus. Die Leiterplatte mit Basismaterial R und Lötstopplack P1 wurde für 1355 h bei 1000 V unter 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte getestet. Der Leiterbahnabstand liegt bei 400 μm . Der Lötstopplack wurde dünn aufgetragen.

Abbildung 43 zeigt die mit dem Lichtmikroskop aufgenommene und mit XPS analysierte Anodenspitze mit dem oxidierten Material. In der Lichtmikroskopaufnahme im UV-Modus ist zusätzlich ein sehr kleiner, im Lötstopplack verlaufender Migrationspfad zu erkennen. Mittels REM-EDX-Analyse findet sich im oxidierten Bereich auf dem Lötstopplack Kupfer, Sauerstoff, Chlor und Schwefel. In **Abbildung 44** oben ist das Übersichtsspektrum der Energieverteilungen der mit XPS aus der Probe gelösten Elektronen gezeigt, nach dem Sputtern der Probe mit monoatomaren Argonionen. Es werden Elemente des Lötstopplacks (zum Beispiel Füllstoffe) und des oxidierten Kupfers detektiert. Das analysierte Material besteht demnach aus 5,2 at.-% Magnesium (Mg 1s), 12,9 at.-% Kupfer (Cu 2p), 23,7 at.-% Sauerstoff (O 1s), 0,4 at.-% Stickstoff (N 1s), 52,1 at.-% Kohlenstoff (C 1s) und 5,6 at.-% Silizium (Si 2p). Die Zahl hinter der Elementbezeichnung gibt die Hauptquantenzahl (Schale) an, der Buchstabe die Nebenquantenzahl (Drehimpulsquantenzahl). Die Nachweisgrenze ist proben- und elementabhängig und wird zu 0,1 bis 1 Atomprozent angegeben. Der relative Fehler (statistisch und systematisch) bei der quantitativen Analyse wird zu 10 % abgeschätzt.

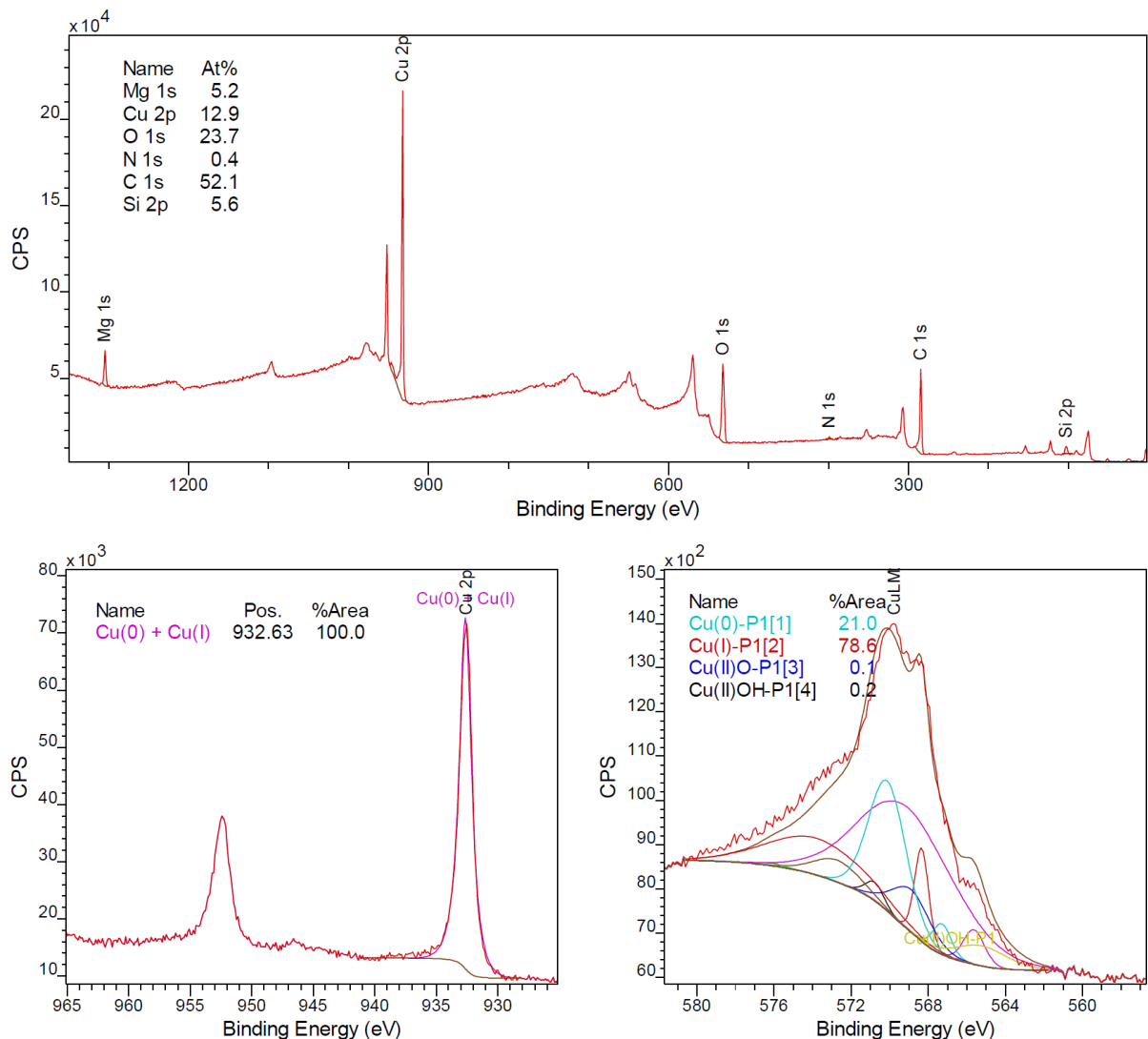


Abbildung 44: Elementverteilung der Probe in Abbildung 43, aufgenommen mit XPS nach dem Materialabtrag mit monoatomaren Argonionen. Auf der y-Achse sind die CPS (Zählpulse pro Sekunde, englisch Counts Per Second), auf der x-Achse die detektierten Bindungsenergien in eV dargestellt.
 Oben: Übersichtsspektrum über alle Elemente des untersuchten Bereichs.
 Unten links: Spektrum von Cu(0) und Cu(I).
 Unten rechts: Signal der Auger-Elektronen, das Cu LM Spektrum.

Bei dem oxidierten Material auf dem Lötstopplack handelt es sich um einen Oxidationszustand des Kupfers. Aufgrund der sich im XPS-Spektrum überlagernden Bindungsenergie-Peaks von Cu(0) und Cu(I) kann alleine aus dem XPS Spektrum in Abbildung 44 links unten nicht zwischen den beiden Oxidationszuständen unterschieden werden. Erst die zusätzliche Analyse des CuLM-Augersignals in Abbildung 44 rechts unten erlaubt eine Unterscheidung der beiden ionisierten Kupferzustände. Die Analyse zeigt deutlich, dass es sich bei dem Material nach Sputtern mit monoatomaren Argonionen um hauptsächlich Cu(I), Cu₂O (78,6 %) und zu einem geringen Anteil (21,0 %) um Cu(0), also Kupfer handelt.

Im nächsten Abschnitt werden die Analyseergebnisse des im Lötstopplack/ an der Lötstopplack-Basismaterialgrenze migrierende Material vorgestellt.

6.1.2.2 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung des im Lötstopplack migrierenden Materials

Das migrierende Material im Lötstopplack wird aufgrund des nicht flächigen Auftretens mittels XRD bestimmt. Dieses erlaubt die Detektion der kristallinen Phasen des Materials. Der Vorteil ist, dass die amorphen Komponenten des Lötstopplacks und Basismaterials nicht mitdetektiert werden.

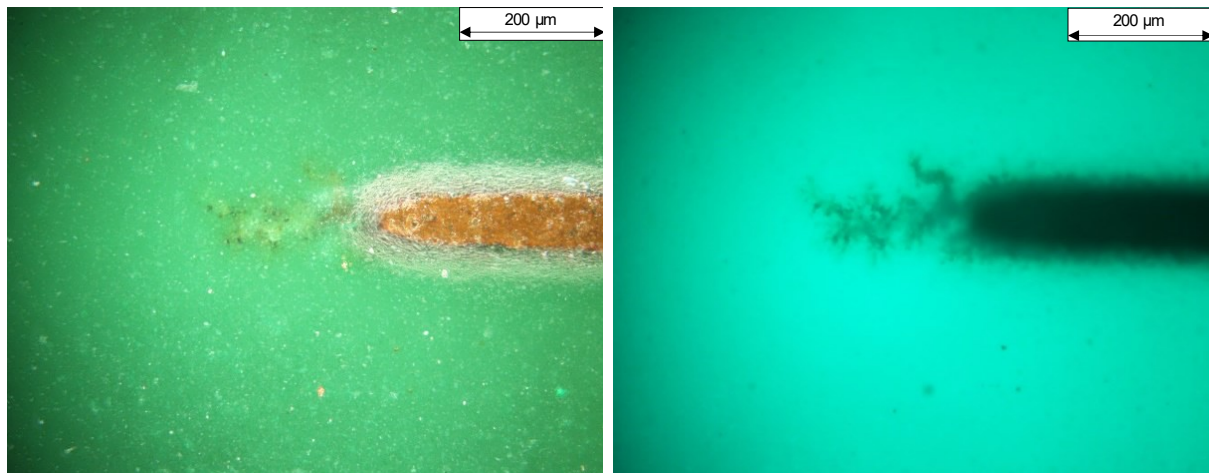


Abbildung 45: Mit dem Lichtmikroskop senkrecht zur Leiterplattenoberfläche aufgenommene Anodenspitze mit AMP. Links aufgenommen im DF-Modus, rechts im UV-Modus. Die Leiterplatte mit Basismaterial R und Lötstopplack P1 wurde für 1355 h bei 1000 V unter 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte getestet. Der Leiterbahnabstand liegt bei 400 µm, der Lötstopplack wurde dick aufgetragen (Tabelle 23).

Die XRD-Messung wurde mittels des Mikrodiffraktometers Bruker-AXS D8discover unter den folgenden Bedingungen durchgeführt: Cu-K α -Strahlung, Primärmonochromator, 50 µm fokussierende Polykapillare, Vantec500-Flächendetektor. Die Integration des Detektorframes erfolgt über die vollständige Detektorfläche, wobei die bestrahlte Fläche bei den gegebenen Messbedingungen unter einem Beugungswinkel von 30° ca. 0,1 x 0,3 mm² beträgt. Die Eindringtiefe in Kupfer liegt bei etwa 8 µm.

Die Datenauswertung erfolgte mittels des Programms EVA von Bruker unter Benutzung der JCPDS-Datenbank. **Abbildung 45** zeigt den mit XRD untersuchten anodischen Migrationspfad vor und **Abbildung 46** und **Abbildung 47** nach der Querschlifferstellung. Die Untersuchung mit dem REM zeigt die Inhomogenität des migrierenden Materials auf. Auch findet die REM-EDX Analyse entlang des AMP wieder Kupfer, Sauerstoff, Chlor und Schwefel. Das XRD-Spektrum ist in **Abbildung 48** dargestellt.

Auf dem AMP-Pfad wird Kupfer, Cu₂O (Cuprit) und Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ (Talkum) gefunden, wobei Talkum ein Füllstoff in der Lötstopppmaske ist. Es konnten weder Atacamit noch Paratacamit nachgewiesen werden. Auch das in Tabelle 10 aufgeführte CuCl₂, welches eine ähnliche Farbe wie Cu₂O aufweist, war mittels XRD nicht nachweisbar.

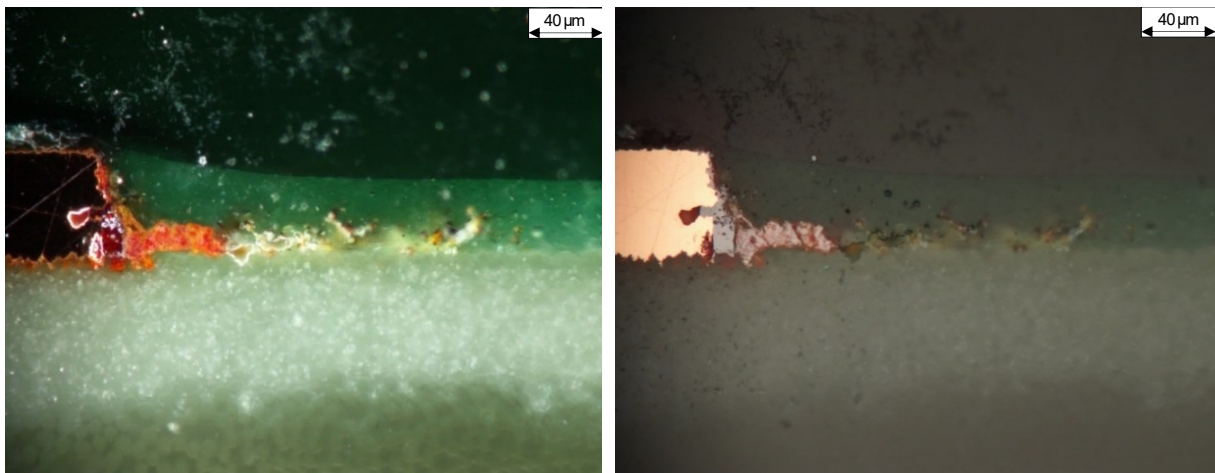


Abbildung 46: Querschliff entlang des AMP aus Abbildung 45 senkrecht zur Leiterplattenoberfläche aufgenommen mit dem Lichtmikroskop. Links im DF-Modus, rechts im BF-Modus.

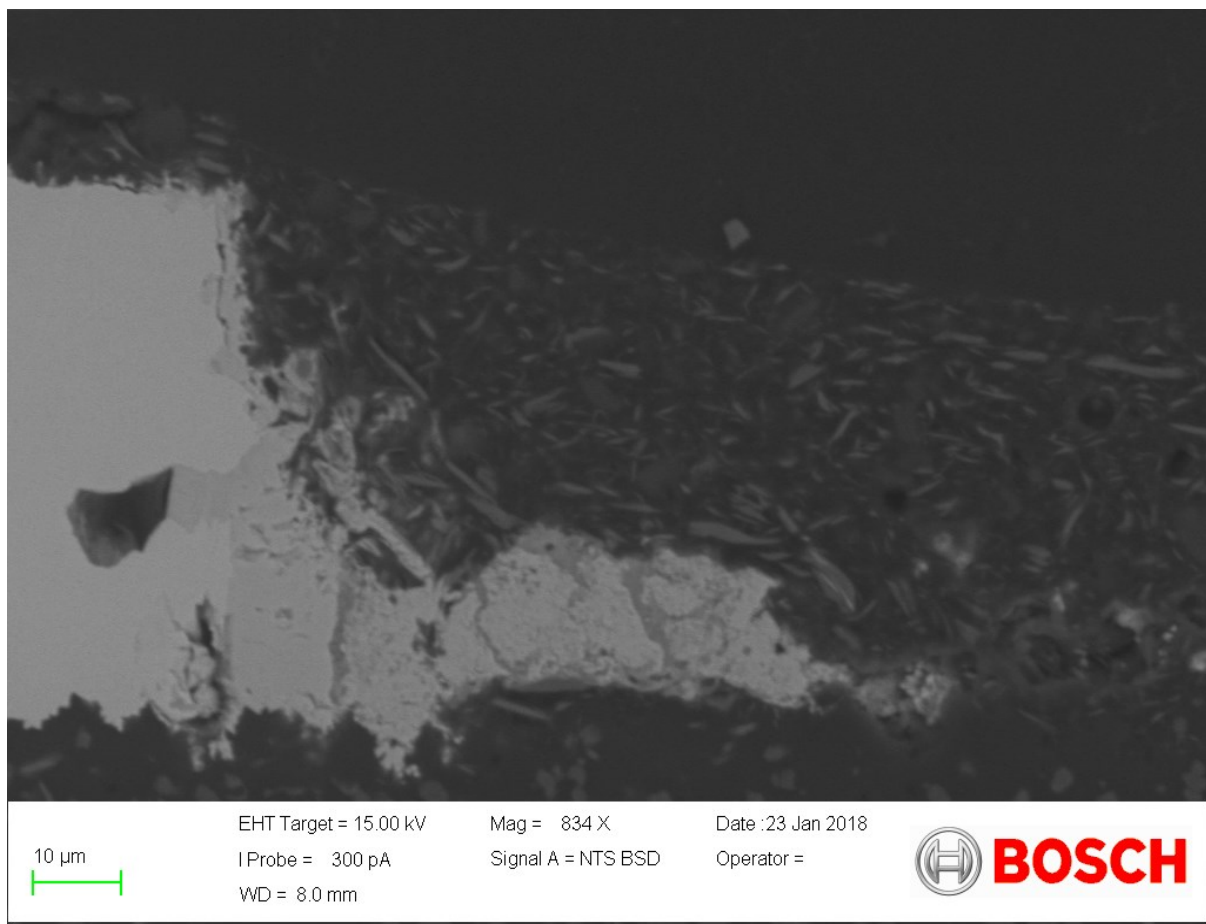
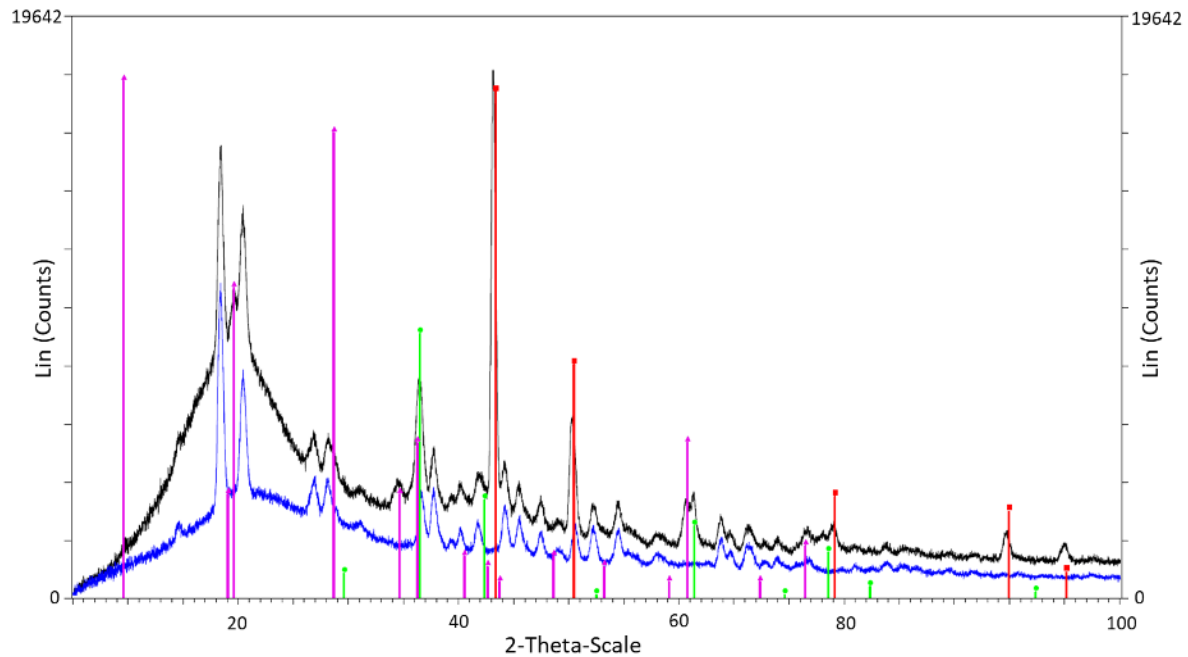


Abbildung 47: REM-Aufnahme mit dem BSD-Detektor des AMP-Pfads in Abbildung 46. Deutlich zu erkennen ist die Inhomogenität des migrierenden Materials, was wie bereits in Abbildung 40 und Tabelle 11 gezeigt, unterschiedliche Chlor- und Schwefelkonzentrationen anzeigt.



- Messpunkt 1; Belag; PM f. Polykap. 0,05 || Vantec - File: 2018-0083_Cu-1_breit.raw - Type: 2Th alone - Start: 4.900 ° - End: 114.300 ° - Step: 0.010 ° - Step time: 300. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s Operations: Import
- Messpunkt 2; Platine; PM f. Polykap. 0,05 || Vantec - File: 2018-0083_Cu-2_breit.raw - Type: 2Th alone - Start: 4.900 ° - End: 114.300 ° - Step: 0.010 ° - Step time: 300. s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 0 s Operations: Import
- 00-004-0836 (*) - Copper, syn - Cu - Y: 95.83 % - d x by: 1. - WL: 1.54184 - Cubic - a 3.61500 - b 3.61500 - c 3.61500 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Face-centered - Fm-3m (225) - 4 - 47.2416 - F
- 00-005-0667 (*) - Cuprite, syn - Cu₂O - Y: 50.00 % - d x by: 1. - WL: 1.54184 - Cubic - a 4.26960 - b 4.26960 - c 4.26960 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.000 - Primitive - Pn-3m (224) - 2 - 77.8326 - F
- 00-029-1493 (N) - Talc-2M - Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂ - Y: 97.92 % - d x by: 1. - WL: 1.54184 - Monoclinic - a 5.31900 - b 9.12600 - c 18.97500 - alpha 90.000 - beta 99.750 - gamma 90.000 - Base-centered - C2/c (15) -

Abbildung 48: Rückstreuintensität der Probe in Abbildung 47 aufgetragen über 2-Theta. Blau: Rückstreusignal des Basismaterials, Schwarz: Rückstreusignal des AMP-Pfads. Theoretische Intensitätsverteilungen von Talkum (lila), Kupfer (rot), Cuprit (Cu₂O, grün). Unter dem Rückstreudiagramm sind Details zu den aufgenommenen Messdaten sowie zu den theoretischen Rückstreudaten dargestellt.

6.1.3 Diskussion der Ausbildung des AMP-Pfads und des AMP-Materials

In diesem Abschnitt soll die Ausbildung des anodischen Migrationsphänomens im Lötstopplack der Leiterplatte diskutiert werden. Des Weiteren wird ein Modell für die Entstehung von Cu₂O, des halbleitenden Materials des anodischen Migrationsphänomens, vorgestellt. Dieses ist in **Abbildung 49** in mehreren Einzelschritten skizziert und wird im Folgenden detaillierter besprochen.

Schritt 0: Gezeigt ist die Leiterplatte in ihrem Ausgangszustand beim Start des HV-SIR-Tests.

Schritt 1: Durch die Lagerung der Leiterplatten in der Klimakammer unter 85 °C/85 %r.h. altert das Leiterplattenmaterial. Weitere Alterung erfährt das Leiterplattenmaterial in Bereichen erhöhter elektrischer Feldstärke durch Teilentladungseffekte.

Schritt 2: Für die Bildung des AMP im Lötstopplack der Leiterplatte wird ein leitfähiger Pfad zwischen Anode und Kathode benötigt. Dieser erlaubt einen Ionenaustausch zwischen den

beiden Elektroden und die Leiterplatte kann nun als elektrochemische Zelle gesehen werden [70]. Die Kupferleiterbahnen bilden dabei die Elektroden, die an der Leiterplatte anliegende Spannung ist das die elektrochemischen Reaktionen treibende Potential und die in der Leiterplatte absorbierte Feuchtigkeit bildet den Elektrolyten [70]. Die Feuchteabsorption von partikelgefüllten Epoxidharzen wird in [71] detailliert erklärt. Das während der Lagerung der Leiterplatte in der Klimakammer absorbierte Wasser kann entweder ungebunden in Hohlräumen des Epoxidharzes vorliegen, oder aber auch Wasserstoffbrückenbindungen mit der Hydroxy-Gruppe des Epoxidharzes eingehen. Durch seine polaren Eigenschaften kann es sich aber auch an andere polare Gruppen des Epoxidharzes anlagern. Wie hoch die Feuchteaufnahme des Lötstopplacks der Leiterplatte ist, wird in Abschnitt 5.2 am Beispiel der Lackvariante A1 erläutert. Es ist zu vermuten, da sich das anodische Migrationsphänomen bevorzugt in Bereichen mit erhöhter elektrischer Feldstärke ausbildet (siehe Abschnitt 5.3 und 6.2), sich dort durch erhöhte Materialalterung bevorzugt Feuchte einlagert.

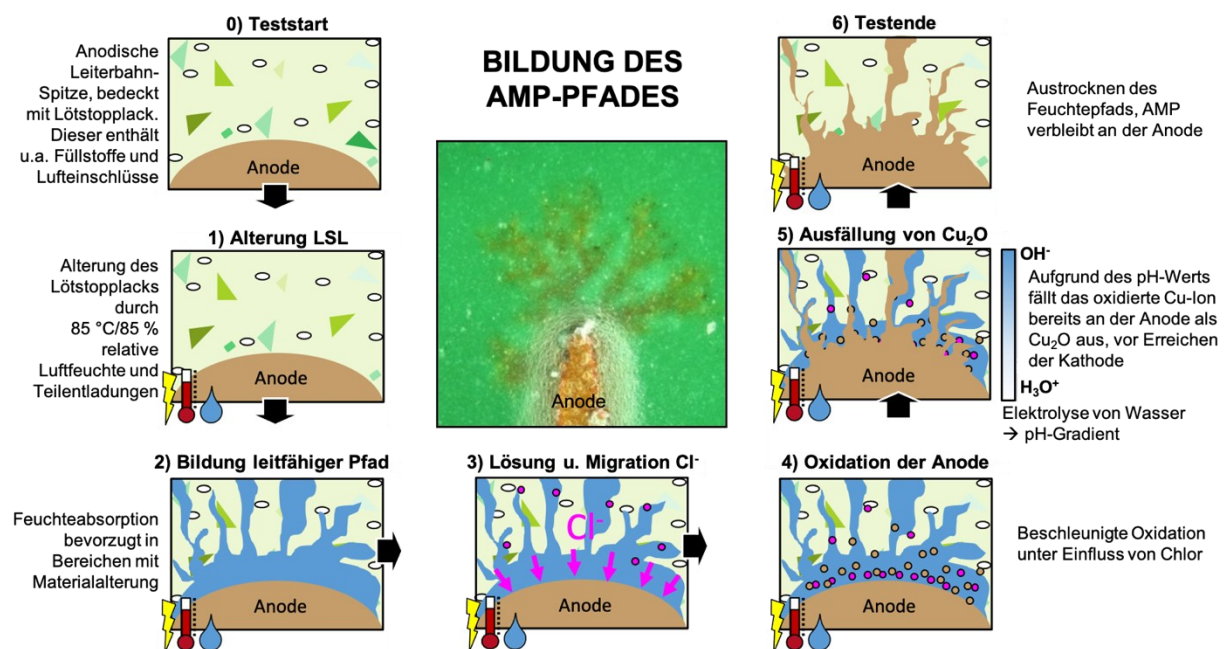


Abbildung 49: Skizzierung der Ausbildung des AMP. In jedem Schritt ist eine anodische Leiterbahnspitze bedeckt mit Lötstopplack gezeigt. Während des HV-SIR-Tests wird die Leiterplatte in einer Klimakammer gelagert und elektrische Spannung angelegt, symbolisch dargestellt durch einen Blitz, ein Thermometer und einen Wassertropfen.

Schritt 3: Die Analyseergebnisse, beispielhaft dargestellt in Abbildung 41, zeigen einen Anstieg der Chlorkonzentration am Ort des anodischen Migrationsphänomens. An der Kathode ist jedoch keine erhöhte Chlorkonzentration detektierbar. Dies deutet darauf hin, dass negativ geladenen Chloridionen Cl^- aufgrund ihrer Ladung entlang der elektrischen Feldlinien zur positiv geladenen Anode wandern. Dieser Effekt ist bereits aus der Literatur bekannt [72]. Aufgrund

der Elementanalyse entlang des anodischen Migrationspfads wirkt das Chlor vermutlich unmittelbar an der stattfindenden elektrochemischen Reaktion mit, da es überall dort zu finden ist, wo auch migriertes Kupfer detektiert wird.

Da aber weder mittels XRD, noch mittels XPS eine Kupfer-Chlor-Verbindung nachgewiesen werden kann, nimmt Chlor vermutlich lediglich als Katalysator an der elektrochemischen Reaktion teil. Nach der Katalysereaktion liegt es in einem amorphen Zustand vor, da es nicht mehr mittels XRD nachgewiesen werden kann.

Schritt 4: Aus der Literatur ist auch bekannt, dass die Oxidationsreaktion von Kupfer in Anwesenheit von Chlor beschleunigt wird [73]. Demnach wird dass das anodische Migrationsphänomen durch die Verwendung von hochreinen Materialien reduziert. Da Kupfer aber auch ohne Anwesenheit von Chlor oxidiert werden kann, ist eine vollständige Unterdrückung des AMP durch Vermeidung von chlorhaltigen Materialien nicht möglich. In der zwischen anodischer und kathodischer Leiterbahn ausgebildeten elektrochemischen Zelle können die Kupferionen weiterhin entlang der elektrischen Feldlinien wandern und das AMP ausbilden.

Bei hohem anodischen Potential werden diese dann vermutlich als Cu^{2+} vorliegen [72]. Auch ist aus der Literatur [74] bekannt (für elektrische Feldstärken zwischen $5,3 \cdot 10^4$ und $9,0 \cdot 10^4$ V/m), dass die Oxidationsrate mit steigender elektrischer Feldstärke zunimmt. Eine Übertragbarkeit dieser Abhängigkeit für höhere Feldstärken, die in dieser Arbeit bei $\sim 10^6$ V/m liegen, wird angenommen. Im vorliegenden Fall wird aber vermutlich die beschleunigte Oxidation durch die Anwesenheit von Chlor die Reaktion von Cu zu Cu_2O dominieren.

Schwefel ist vermutlich nicht unmittelbar an der Oxidation von Kupfer zu Cu_2O beteiligt, da sich nur punktuell entlang des Migrationspfads Bereiche mit erhöhter Schwefelkonzentration finden. Die Bildung der schwefelhaltigen Verbindung findet höchstwahrscheinlich parallel zu der Reaktion von Kupfer mit Chlor und Sauerstoff statt. Da es sich hier aber nur um eine parallel zur Oxidation des Kupfers stattfindende Reaktion handelt, wird diese in der nachfolgenden Diskussion der direkten Kupferoxidation nicht weiter betrachtet.

Schritt 5: In diesem Schritt fällt Cu_2O an der Anodenseite aus. Dieser Vorgang wird im nachfolgenden Abschnitt 6.1.3.1 detailliert diskutiert.

Schritt 6: Nach dem HV-SIR-Test werden die Leiterplatten aus der Klimakammer entnommen. Der leitfähige Pfad bildet sich zurück und es verbleibt das aus Cu_2O bestehende anodische Migrationsphänomen an der Anodenseite der Leiterplatte.

6.1.3.1 Bildung von Cu_2O

Mögliche chemischen Reaktionen, welche zur Ausbildung des halbleitenden Materials Cu_2O entlang des anodischen Migrationspfads führen, sollen in diesem Abschnitt vorgestellt werden. Dabei wird zuerst eine Abschätzung des maximal möglichen Chlorgehalts an einer Anoden-

spitze vorgenommen, um anschließend aufgeführte Pourbaix-Diagramme nach ihrem Chlorgehalt filtern zu können. Zuletzt werden mögliche chemische Reaktionsgleichungen aufgeführt, die unter Annahme des abgeschätzten Chlorgehalts mögliche Oxidationen von Kupfer zu Cu_2O darstellen.

Abschätzung des maximalen Chlorgehalts an einer Anodenspitze

Es gibt, abhängig vom Chlorgehalt, mehrere Möglichkeiten für die Oxidation von Kupfer in chlorhaltiger Umgebung. Um abzuschätzen, welche aus der Literatur bekannten Oxidationsreaktionen von Kupfer in Anwesenheit von Chlor im vorliegenden Fall auftreten, wird die maximal mögliche Menge Chlor nach der IEC 61249-2-21 [69], die an einer Anodenspitze theoretisch durch die verwendeten Lötstopplackmaterialien auftreten kann, berechnet. Nach Tabelle 11 ist bereits zu vermuten, dass sehr wenig Chlor im Lötstopplack an der Oxidation von Kupfer zu Cu_2O teilhat.

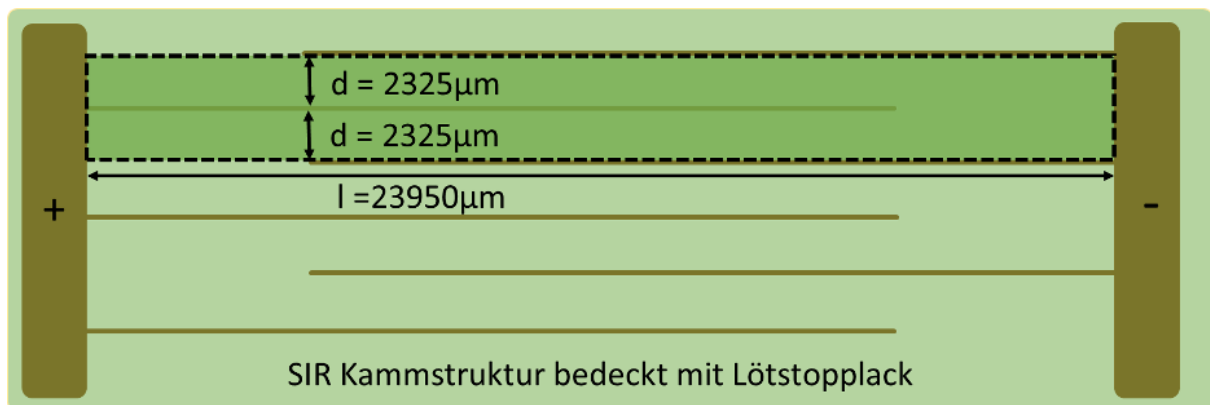


Abbildung 50: Skizzierung des maximalen Lötstopplackbereichs, aus dem Chloridionen zu einer Anodenspitze wandern können. Für alle anderen Anodenspitzen ist der Bereich äquivalent.

In **Abbildung 50** ist der Bereich skizziert, aus dem Chloridionen zu einer Anodenspitze wandern können. Mit einem Abstand von $l = 23950 \mu\text{m}$ zwischen dem anodischen und kathodischen Kupferbalken, einem Leiterbahnabstand von maximal in dieser Arbeit gewählten $d = 2325 \mu\text{m}$ und einer mittleren mit $h = 40 \mu\text{m}$ abgeschätzten Lötstopplackdicke ergibt sich für jede anodische Kupferleiterbahn ein maximales Lötstopplackvolumen von $V \approx 2 \cdot d \cdot l \cdot h = 4454,7 \cdot 10^{-6} \text{cm}^3$, aus dem Chloridionen zu einer Anodenspitze wandern können.

Die Annahme von 900 ppm (Gewichtsprozent) Chlorgehalt, welches hydrolisierbar ist und im elektrischen Feld zu wandern beginnt um die Oxidation der Kupferanode zu beschleunigen, ist eine großzügig gewählte Maximalwertabschätzung für eine bessere Einordnung der im Lötstopplack stattfindenden chemischen Reaktionen unter Chloreinfluss.

Die Abschätzung erfolgt beispielhaft für Lötstopplackvariante A1. Der Hersteller von Lötstopplack A1 gibt für seine Lacke eine Dichte ρ_{LSL} im ausgehärteten Zustand zwischen 1,5 und

1,6 g/cm³ an. Für die Abschätzung des theoretisch maximal möglichen Chlorgehalts wird die größere Dichte angenommen.

Für das angegebene Lötstopplackvolumen V ergibt sich so ein Gewicht von $m_{LSL}(V) = \rho_{LSL} \cdot V = 7,13 \text{ mg}$. Um die theoretisch maximal mögliche hydrolisierte Chlorkonzentration zu ermitteln, der eine Anodenspitze nach Wanderung der Cl⁻-Ionen im elektrischen Feld ausgesetzt sein kann, wird das aus Abbildung 50 abgeschätzte Volumen und die abgeschätzte Masse des Lötstopplacks $m_{LSL}(V)$ verwendet.

900ppm Chlor bedeuten einen Anteil von $900 \cdot 10^{-6}$ des Lötstopplackgewichts im abgeschätzten Volumen. $m_{Cl^-}(V)$ gibt das Gewicht der Chloridionen im abgeschätzten Volumen an.

Die Anzahl der Chloridionen $n_{Cl^-}(V)$ im abgeschätzten Volumen wird über die Masse eines Chloratoms genähert. Diese ergibt sich zu 35,453u, wobei $u \approx 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ für die atomare Masseneinheit steht [75]. Die maximal mögliche Anzahl der Chloridionen, die eine Kupferanode korrodiert, wird damit zu $n_{Cl^-}(V) = 1,09 \cdot 10^{17}$ abgeschätzt. Die molare Konzentration mol/m³ entspricht der Einheit mM = 10⁻³M. Damit ergibt sich für die Abschätzung der maximalen Chlorkonzentration (Molarität) an einer Anodenspitze ein Wert von $c_{Cl^-,max} \approx 40,6 \text{ mol/m}^3 = 0,04 \text{ M} = 0,025 \text{ mol/kg}$.

Im nächsten Abschnitt sollen die Umgebungsbedingungen die zur Ausbildung von Cu₂O als das migrierende Material anhand von Pourbaix-Diagrammen diskutiert werden.

Diskussion der Umgebungsbedingungen für die Bildung von Cu₂O anhand von Pourbaix-Diagrammen

Durch die an der Leiterplatte anliegende elektrische Spannung wird das in der Leiterplatte absorbierte Wasser aufgespalten und es entsteht ein pH-Gradient zwischen Kathode und Anode. An der Anode liegt durch die Elektrolyse von Wasser im elektrischen Feld eine erhöhte Konzentration an H₃O⁺-Ionen vor (niedriger pH-Wert, saure Wirkung) und an der Kathode eine erhöhte Konzentration an OH⁻-Ionen (höherer pH-Wert, alkalische, basische Wirkung). Die chemischen Reaktionen nach Anlegen der elektrischen Spannung an die Kupferelektroden bezüglich Wasser sind [70]:

Anode:



Kathode:



Die Kenntnis über den an der Anode und Kathode vorliegenden pH-Wert erlaubt es, mittels Pourbaix-Diagrammen thermodynamisch stabile Kupferverbindungen zu ermitteln.

Pourbaix-Diagramme sind Phasendiagramme, die graphisch die thermodynamisch stabilen Kupferverbindungen in einem Elektrolyten in Abhängigkeit des Potentials der Standardwasserstoffelektrode und des pH-Werts der Lösung darstellen. Es kann abgelesen werden, unter welchen Bedingungen Cu als thermodynamisch stabiles Cu_2O ausfällt. Die möglichen Kupferzustände sind abhängig von der Art des Elektrolyts, aber auch der Menge der jeweiligen Komponenten in der Lösung, sowie der Temperatur. Im Nachfolgenden sollen die Umgebungsbedingungen für die Ausbildung von Cu_2O für das AMP in dieser Arbeit diskutiert werden.

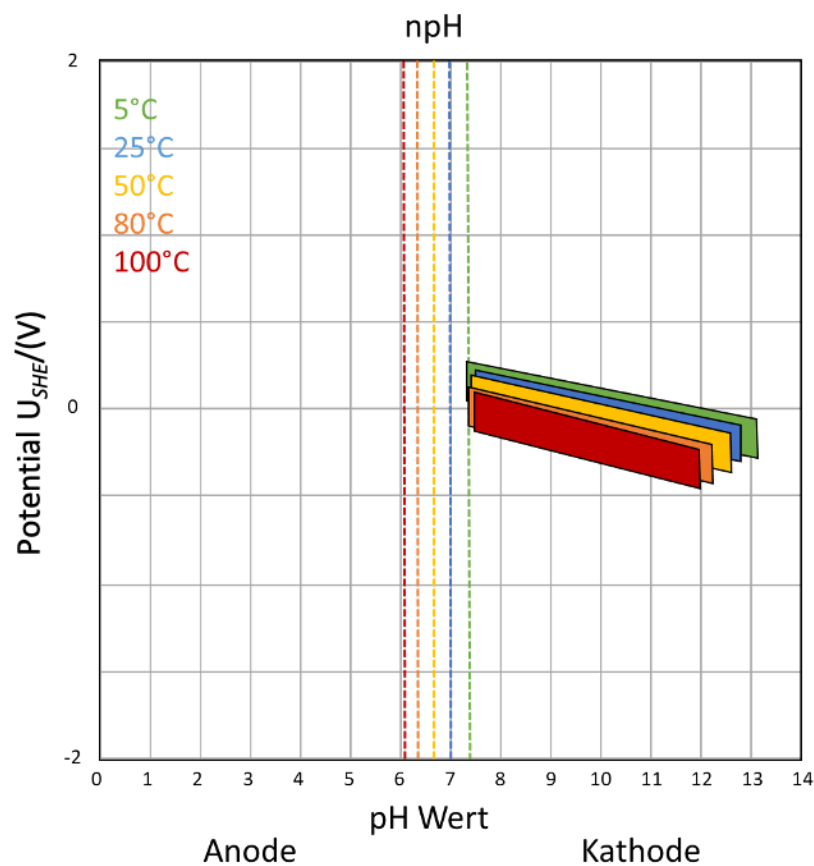


Abbildung 51: Pourbaix Diagramm für die thermodynamisch stabilen Bereiche von Cu_2O für Kupfer in einer Lösung mit 10^{-4} mol/kg Kupfer und $0,2 \text{ mol/kg}$ Chlor bei unterschiedlichen Temperaturen, dargestellt durch unterschiedliche Farben. Auf der x-Achse ist der pH-Wert und -Wertebereich für die Anode und Kathode verzeichnet, auf der y-Achse das Potential zur Wasserstoffelektrode in V. Die senkrechten gestrichelten Linien verzeichnen die temperaturabhängigen neutralen pH-Werte (npH).

In **Abbildung 51** ist beispielhaft in einem Pourbaix-Diagramm für Kupfer in Abhängigkeit der Temperaturen zwischen 5°C und 100°C der thermodynamisch stabile Bereich für Cu_2O verzeichnet. Das Diagramm gilt für eine Lösung mit 10^{-4} mol/kg Kupfer und $0,2 \text{ mol/kg}$ Chlor [76]. Auch verzeichnet ist der anodische und kathodische pH-Wertbereich durch die Elektrolyse von Wasser. Deutlich zu erkennen ist, dass sich in dieser Beispielzusammensetzung

Cu_2O bevorzugt an der Kathode ausbildet. Eine Berechnung oder Abschätzung des vorliegenden Potentials gegen die Standardwasserstoffelektrode ist im vorliegenden Fall eines polymeren Feststoffelektrolyten nicht möglich. Deshalb soll unabhängig vom Potential und lediglich in Abhängigkeit des pH-Werts über Pourbaix-Diagramme ermittelt werden, unter welchen Bedingungen die Ausbildung von Cu_2O möglich ist.

In **Abbildung 52** wurden aus [76] [77] und [78] unterschiedliche Pourbaix-Diagramme für thermodynamisch stabile Bereiche von Cu_2O zusammengetragen (Die Beschriftung und Skalierung der x- und y-Achse ist für alle Graphen dieselbe wie in Abbildung 51).

Im linken Diagramm ist die Ausbildung von Cu_2O in einer chlor- und kupferhaltigen Lösung dargestellt. Demnach bildet sich bei den dort gezeigten Chlor- und Kupferkonzentrationen bei einer Temperatur von 85°C kein Gleichgewichtszustand von Cu_2O an der Anode aus. Jedoch liegt der abgeschätzte maximale Chlorgehalt von $0,025\text{ mol/kg}$ an einer Anodenspitze auch weit unter dem Chlorgehalt der in Abbildung 52 links aus der Literatur zusammengetragenen Daten. Da die Pourbaix-Diagramme links die klare Tendenz aufzeigen, dass sich der thermodynamisch stabile Bereich von Cu_2O mit steigender Kupfermenge und sinkendem Chlorgehalt in Richtung niedrigen pH-Wert verlagert, kann sich auch bei 85°C Cu_2O bei anodischem pH-Wert ausbilden.

Auch untersucht wurde, wie sich weitere Elemente zusätzlich zu Kupfer und Chlor in der Lösung auf das Gleichgewicht von Cu_2O auswirken.

Alle in der Literatur aufgeführten Pourbaix-Diagramme mit zusätzlichen Elementen zu Kupfer und Chlor in der Lösung sind im rechten Diagramm aufgeführt. Zu den zusätzlichen Stoffen gehören $[\text{HS}^-]$, $[\text{PO}_4^{3-}]$, $[\text{N}_{\text{ges}}]$ und $[\text{CO}_3^{2-}]$. Der Chlorgehalt der Lösungen variiert, der Kupfergehalt der untersuchten Lösungen liegt konstant bei $[\text{Cu}]_{\text{TOT}} = 10^{-6}\text{ mol/kg}$. Deutlich zu erkennen ist, dass Kupfer mit und ohne zusätzlichem Chlor in der Lösung in Anwesenheit von noch anderen Elementen dazu führt, dass sich der Gleichgewichtszustand von Cu_2O weiter in Richtung niedrigerem, anodischem pH-Wert verlagert.

Zusammengefasst zeigen die Pourbaix Diagramme mit nur Kupfer und Chlor in der Lösung, dass ein thermodynamisch stabiler Zustand von Cu_2O an der Anode bei 85°C möglich ist. Weitere Elemente in der Lösung begünstigen zusätzlich einen Gleichgewichtszustand von Cu_2O bei niedrigem pH-Wert. Hierzu könnten die gefundenen Schwefelverbindungen gehören, aber auch viele weitere Inhaltsstoffe einer Lötstopplackformulierung.

Im nächsten Abschnitt werden die möglichen chemischen Reaktionen, die zur Ausbildung des halbleitenden Cu_2O -Pfads führen, dargestellt.

Pourbaix Diagramme für Kupfer

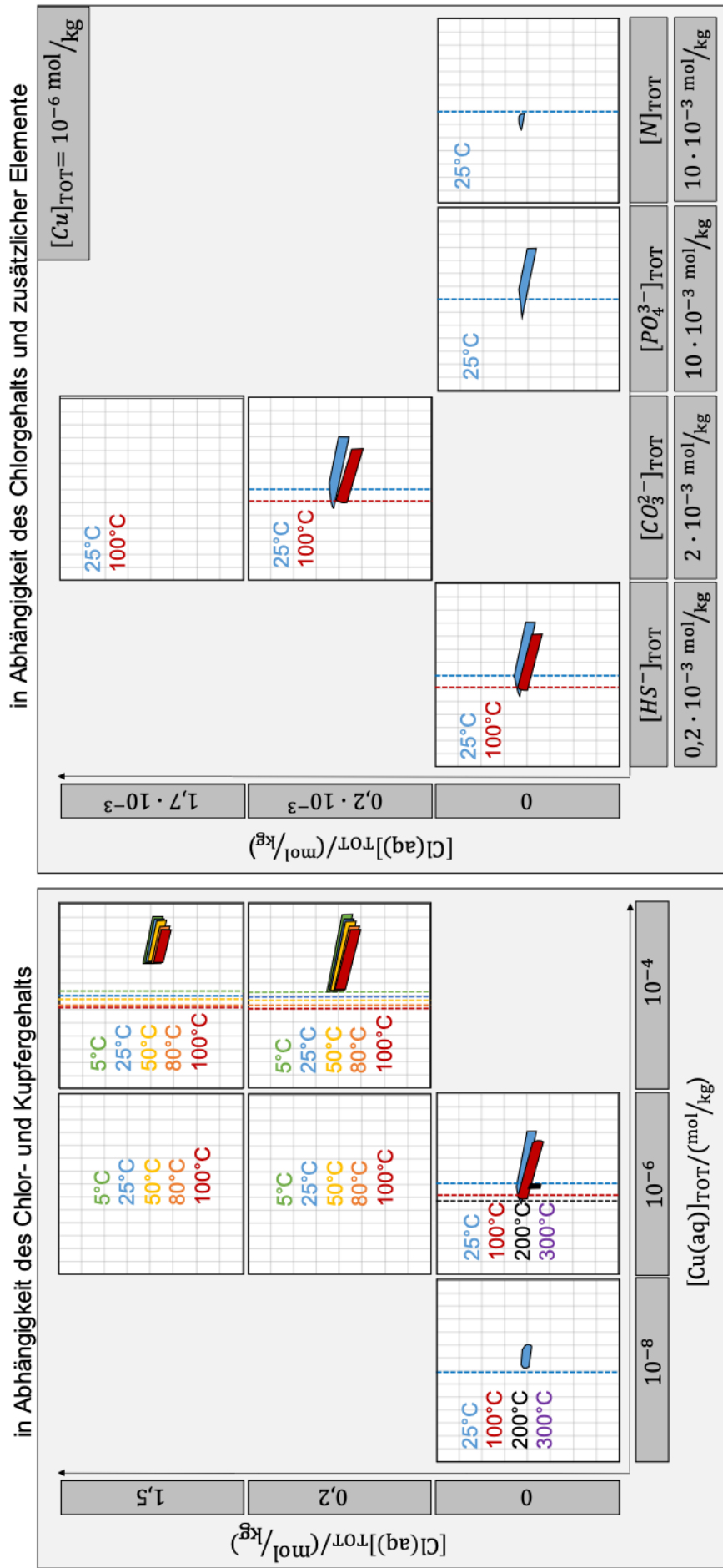


Abbildung 52: Pourbaix-Diagramme für Kupfer für den thermodynamisch stabilen Bereich von Cu_2O . Die Daten sind [76] [77] und [78] entnommen.

Links: Pourbaix-Diagramme für Kupfer in einer Lösung mit Chlor. Die Diagramme sind in Abhängigkeit des Chlorgehalts der Lösung auf der y-Achse und des Kupfergehalts auf der x-Achse dargestellt.

Rechts: Pourbaix-Diagramme für Kupfer mit unterschiedlichen Stoffen in der Lösung $[\text{HS}^-]$, $[\text{PO}_4^{3-}]$, $[\text{N}_{\text{ges}}]$ und $[\text{CO}_3^{2-}]$, teilweise mit zusätzlichem Einfluss von Chlor. Der Kupfergehalt liegt bei konstanten 10^{-6} mol/kg . Auf der y-Achse ist der Chlorgehalt der Lösung verzeichnet für die unterschiedlichen Elemente in der Lösung auf der x-Achse.

Mögliche chemische Reaktionen

Bei der Ausbildung des halbleitenden Cu_2O -Pfads werden zwei grundlegende Möglichkeiten der Kupferoxidation betrachtet. Die erste Variante stellt die im Lötstopplack stattfindende chemische Reaktion unter Einfluss von Chlor dar, die zweite die chemischen Reaktionen ohne den Einfluss von Chlor. Bei den in dieser Dissertation untersuchten Lötstopplacken werden vermutlich beide Oxidationsreaktionen parallel ablaufen.

Im Folgenden sind die aus [56] [73] [76] [78] [79] [80] [81] [82] [83] [84] [85] [86] herausgearbeiteten möglichen Oxidationsreaktionen von Kupfer in einer chlorhaltigen Umgebung mit $c_{\text{Cl}^-, \text{max}} < 0,1 \text{ M}$, beziehungsweise in einer chlorfreien Umgebung aufgeführt.

In Tabelle 12, Tabelle 13 und Tabelle 14 sind für $n, m \in [1, 2]$ die möglichen chemischen Reaktionen aufgeführt, die zur Ausbildung von Cu_2O entlang des AMP-Pfads führen.

Für die Aufstellung der möglichen chemischen Reaktionsgleichungen wurden die wahrscheinlichsten Oxidationsstufen +1 und +2 von Kupfer angenommen. Auch berücksichtigt bei der Aufstellung der chemischen Reaktionsgleichungen wurde der zu Beginn dieses Abschnitts 6.1.3.1 abgeschätzten niedrige Chlorgehalt der Lösung.

In Tabelle 12 ist der vermutete Beginn der Oxidation von Kupfer dargestellt. In Tabelle 13 werden mögliche Folgereaktionen des oxidierten Kupfers im Cu^{m+} Oxidationszustand unter Feuchteinfluss gezeigt. Tabelle 14 zeigt weitere Folgereaktionen der in Tabelle 12 begonnenen Oxidationsreaktion von Kupfer unter Chloreinfluss.

Tabelle 12: Beginn der Oxidation von Kupfer mit und ohne Chlor- und Feuchteinfluss.

BEGINN OXIDATION VON Cu		
OXIDATION	$\text{Cu} \rightleftharpoons \text{Cu}^{m+} + m \cdot e^-$	Weitere Reaktion von Cu^{m+} zu Cu_2O in Tabelle 13.
		Bei Rückreaktion zu Cu siehe Reaktionen für Cu zu Cu_2O in aktueller Tabelle.
UNTER CHLOREINFLUSS	$\text{Cu} + n \cdot \text{Cl}^- \rightleftharpoons \text{CuCl}_n^{(1-n)} + 1e^-$	Weitere Reaktion von $\text{CuCl}_n^{(1-n)}$ zu Cu_2O in Tabelle 14.
		Bei Rückreaktion zu Cu siehe Reaktionen zu Cu_2O in aktueller Tabelle.
UNTER FEUCHTEINFLUSS	$2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2$ oder $2\text{Cu} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_{\text{ads}} \rightarrow \text{Cu}_2\text{OH} + \text{H} \text{ dann } \text{Cu}_2\text{OH} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{H}$ oder $\text{Cu} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Cu}(\text{H}_2\text{O})_{\text{ads}} \rightarrow \text{CuOH} + \text{H} \text{ dann } 2\text{CuOH} \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$ oder $2\text{Cu} + 2\text{OH}^- - 2e^- \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O} \text{ (für pH}<9\text{)}$	

Tabelle 13: Weiterführende mögliche Reaktionen von Cu^{m+} mit Wasser.

WEITERFÜHRENDE MÖGLICHE REAKTIONEN VON Cu^{m+} MIT WASSER		
Cu^+	$2Cu^+ + 2OH^- \rightarrow 2CuOH \rightarrow Cu_2O + H_2O$ oder $2Cu^+ + 2OH^- \rightarrow Cu_2O + H_2O$ oder $2Cu^+ + H_2O \rightleftharpoons Cu_2O + 2H^+$	
Cu^{2+}	$Cu^{2+} + Cu \rightarrow 2Cu^+$	Weitere Reaktion von Cu^+ zu Cu_2O in aktueller Tabelle

Tabelle 14: Weiterführende mögliche Reaktionen von Cu^{m+} mit $n \cdot Cl^-$ Chlor und von $CuCl_n^{(1-n)}$.

WEITERFÜHRENDE MÖGLICHE REAKTIONEN VON Cu^{m+} MIT $n \cdot Cl^-$ CHLOR UND VON $CuCl_n^{(1-n)}$		
$Cu^{m+} + n \cdot Cl^- \rightleftharpoons CuCl_n^{(m-n)}$		
FÜR	n = 1	n = 2
m = 1	$CuCl \rightarrow Cu^{2+} + Cl^- + 1e^-$	$CuCl_2^-$ $2CuCl_2^- + 2OH^- \rightleftharpoons Cu_2O + H_2O + 4Cl^-$
	Weitere Reaktion von Cu^{2+} zu Cu_2O siehe Tabelle 13 und Tabelle 14	Bei Rückreaktion von $CuCl_2^-$ zu Cu^+ und $2Cl^-$ siehe Tabelle 13 und Tabelle 14 für Reaktionen von Cu^+ zu Cu_2O
	Bei Rückreaktion von $CuCl$ zu Cu^+ und Cl^- siehe Tabelle 13 und Tabelle 14 für Reaktionen von Cu^+ zu Cu_2O	
m = 2	Bei Rückreaktion von $CuCl^+$ zu Cu^{2+} und Cl^- siehe Tabelle 13 und Tabelle 14 für Reaktionen von Cu^{2+} zu Cu_2O	Bei Rückreaktion von $CuCl_2$ zu Cu^{2+} und $2Cl^-$ siehe Tabelle 13 und Tabelle 14 für Reaktionen von Cu^{2+} zu Cu_2O

6.2 Untersuchungen des AMP in Abhängigkeit von Testzeit, elektrischer Spannung und der Höhe des elektrischen Felds

In diesem Abschnitt werden die Untersuchungsergebnisse an den AMP-Pfaden der Lötstopplackvariante A1 bei 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Testzeit, der elektrischen Spannung sowie des Leiterbahnabstands diskutiert. Dabei werden zu Beginn in Abschnitt 6.2.1 Untersuchungen der Ausprägung des AMP an Kammstrukturen mit 500 V und 1000 V Testspannung bei gleicher elektrischer Feldstärke behandelt. In Abschnitt 6.2.2 wird das Leiterplattenlayout vorgestellt, welches es erlaubt, das AMP an Strukturen ohne lokale Feldüberhöhungen zu untersuchen. Abschnitt 6.2.3 beschreibt die Durchführung des Hochvolt-Tests der Leiterplatten mit vier verschiedenen Spannungen über die Testzeit von 2024 Stunden. Die Auswertung der aufgenommenen Daten wird in Abschnitt 6.2.4 behandelt, wobei zuerst die Vorgehensweise bei der Analyse der AMP-Pfade erläutert wird und anschließend in Abschnitt 6.2.4.1 und 6.2.4.2 die Analyseergebnisse vorgestellt werden.

Die Entwicklung des Lebensdauermodells aus den aufgenommenen AMP-Daten ist Gegenstand von Abschnitt 6.2.5. Zum Schluss werden in Abschnitt 6.2.6 die Ergebnisse verglichen und zusammengefasst.

6.2.1 Voruntersuchungen mit 500 V und 1000 V elektrischer Spannung

In diesem Abschnitt werden die mit 500 V und 1000 V Testspannung durchgeführten Voruntersuchungen der AMP-Pfade in Abhängigkeit der Testspannung vorgestellt und diskutiert. Für die Analysen wurde das Leiterplattenlayout L1 verwendet. Details zum Layout und den durchgeführten HV-SIR-Tests können Tabelle 3 und Tabelle 4 entnommen werden. Die Leiterplatten wurden mit Lötstopplack P1 auf Basismaterial R bei 500 V und 1000 V über vergleichbare Zeiträume getestet.

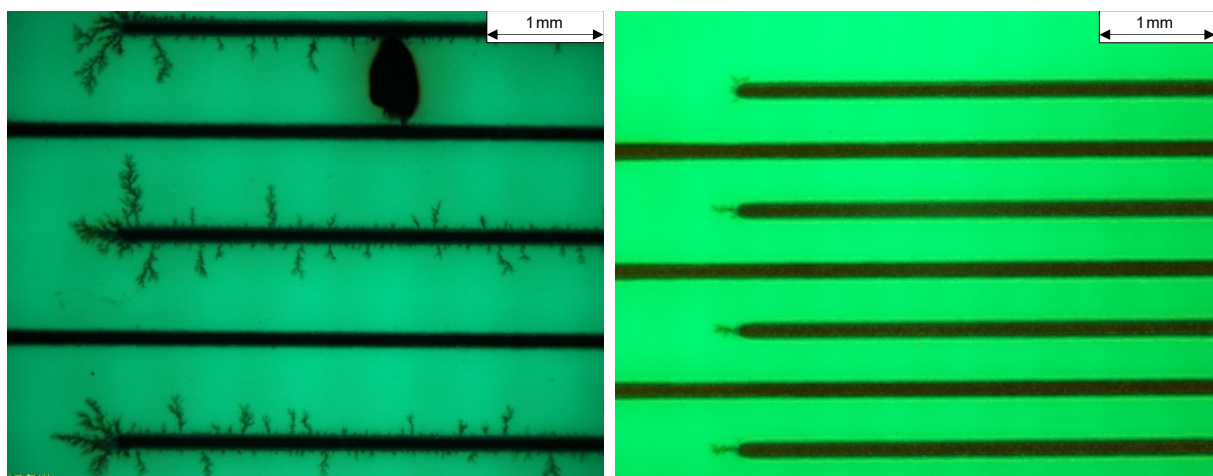


Abbildung 53: Aufnahme mit dem Lichtmikroskop im BF-Modus senkrecht zur Leiterplattenoberfläche des Leiterplattenlayouts L1. Links: Kammstruktur mit 800 µm Leiterbahnabstand getestet für 1381 h mit 1000 V bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte. Rechts: Kammstruktur mit 400 µm Leiterbahnabstand getestet für 1355 h mit 500 V bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte.

Beim direkten Vergleich der AMP an den Kammstrukturen in Abbildung 67 in Abschnitt 6.3 zeigt sich, dass das AMP-Wachstum bei mit 1000 V getesteten Kammstrukturen stärker ausgeprägt ist, als das bei mit 500 V getesteten Kammstrukturen. Bei allen mit 500 V und 1000 V getesteten Kammstrukturen tritt das Migrationsphänomen bevorzugt an der Leiterbahnspitze auf, was auf eine Abhängigkeit des AMP von der elektrischen Feldstärke hindeutet, da dort bei der Kammstruktur der Ort mit der lokal höchsten elektrischen Feldstärke vorliegt.

In **Abbildung 53** ist eine mit 500 V getestete Kammstruktur mit 400 µm Leiterbahnabstand und eine mit 1000 V getestete Kammstruktur mit 800 µm Leiterbahnabstand gezeigt, die für vergleichbare Testzeiten getestet wurden. Auffällig ist, dass bei gleicher elektrischer Feldstärke E zwischen den Leiterbahnen mit Abstand d (beschrieben durch einen Plattenkondensator mit $E = U/d$) zwar bei beiden ein AMP an der Leiterbahnspitze auftritt, aber lediglich bei der mit 1000 V getesteten Kammstruktur auch zwischen den Leiterbahnen.

Auf Basis dieser Voruntersuchungen wurde eine gezielte Versuchsreihe aufgesetzt. Deren Auswertung und mathematische Ableitung zur Kinetik beschreibt die Ausbildung der AMP in Abhängigkeit von Testzeit, Spannung und elektrischer Feldstärke (Leiterbahnabstand) beispielhaft für Lötstopplack A1 bei 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte.

6.2.2 Entwicklung Leiterplattenlayout

Für die Untersuchungen der Abhängigkeit des anodischen Migrationsphänomens von der Testzeit, der elektrischen Spannung und des elektrischen Felds wurde ein spezielles Leiterplattenlayout (L4, Details siehe Tabelle 3 und Tabelle 4) entwickelt, welches in **Abbildung 54** dargestellt ist.

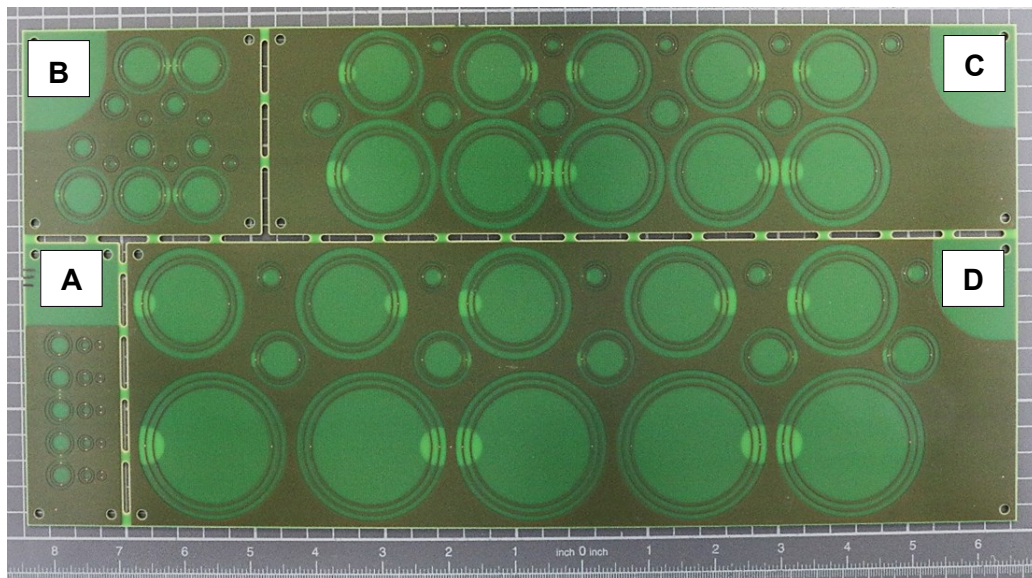


Abbildung 54: Vorderseite des verwendeten Leiterplattenlayouts L4. Die Leiterplatten A, B, C und D werden vor der Durchführung des HV-Tests in der Klimakammer vereinzelt und an getrennte Spannungsversorgungen angeschlossen.

Die kreisförmige Struktur der Testleiterbahnen sorgt für eine einheitliche elektrische Feldstärke entlang der kompletten Teststruktur. Durch ausreichend großen Radius der Testleiterbahnen wird ein paralleler Verlauf von Anode und Kathode angenähert.

Für jede Testspannung wurden Leiterbahnabstände nach den Vorgaben der IPC2221 [59] für mit Polymer beschichtete unbestückte Leiterplatten gewählt. Zudem wurden Leiterbahnabstände gezielt unterschritten, um das Auftreten des AMP im späteren HV-Test durch höhere elektrische Feldstärken zu provozieren. Dabei wurde bei der Wahl der Kombination aus Testspannung und Leiterbahnabstand insbesondere darauf geachtet, dass Strukturen mit unterschiedlicher elektrischer Testspannung aber gleicher elektrischer Feldstärke vorliegen, um den Einfluss der Testspannung und Feldstärke auf das AMP separat bewerten zu können.

Durch einen erst später entdeckten Layoutfehler auf der Leiterplatte konnten nicht alle geplanten Abstandsvarianten zur Bewertung verwendet werden. Die für die Analyse des AMP genutzten Strukturen sind in **Tabelle 15** vermerkt.

Bei der gegebenen Größe der Leiterplatte wurde die Geometrie der Kreisstrukturen in **Abbildung 55** so gewählt, dass die elektrische Feldstärke zwischen innerem und äußerem Kreis nicht um mehr als 10 % variiert. Näherungsweise kann die elektrische Feldstärke nach [42]

Für jede Testspannung wurden Leiterbahnabstände nach den Vorgaben der IPC2221 [59] für mit Polymer beschichtete unbestückte Leiterplatten gewählt. Zudem wurden Leiterbahnabstände gezielt unterschritten, um das Auftreten des AMP im späteren HV-Test durch höhere elektrische Feldstärken zu provozieren. Dabei wurde bei der Wahl der Kombination aus Testspannung und Leiterbahnabstand insbesondere darauf geachtet, dass Strukturen mit unterschiedlicher elektrischer Testspannung aber gleicher elektrischer Feldstärke vorliegen, um den Einfluss der Testspannung und Feldstärke auf das AMP separat bewerten zu können. Durch einen erst später entdeckten Layoutfehler auf der Leiterplatte konnten nicht alle geplanten Abstandsvarianten zur Bewertung verwendet werden. Die für die Analyse des AMP genutzten Strukturen sind in **Tabelle 15** vermerkt.

84

durch Gleichung (12) beschrieben werden. Erhöhungen des elektrischen Felds durch die Ätzkante der Kupferleiterbahn, wie sie in Abschnitt 5.3 beschrieben sind, werden in dieser Näherung nicht betrachtet. Es wird immer die äußere elektrische Feldstärke E_a angegeben, Details können Abschnitt 2.5 entnommen werden.

$$E_a = \frac{U}{d} \quad (12)$$

Die elektrische Verschaltung der Vier-Lagen-Leiterplatte ist in Abbildung 55 skizziert.

Alle inneren Kreise einer Leiterplatte werden über ein gemeinsames negatives Potential elektrisch verbunden. Die jeweils fünf äußeren Kreise gleicher Größe sind auf der Rückseite, wie in Abbildung 55 gezeigt, elektrisch miteinander verbunden und liegen auf Positivpotential.

Tabelle 15: Leiterplatten A, B, C und D, sowie die daran angelegte Testspannung. Zusätzlich vermerkt sind die Leiterbahnabstände zwischen innerem und äußerem Kreis, sowie die elektrische Feldstärke zwischen den Leiterbahnen. Ein „✓“ zeigt an ob die Leiterbahnabstände IPC konform sind. Ein „✓“ in der Spalte „Ok“ bedeutet, dass die AMP zur Ermittlung eines Lebensdauermodells herangezogen werden können.

PCB	SPANNUNG IN V	NAME	ABSTAND d IN µm	IPC KONFORM	ELEKTRISCHE FELD- STÄRKE IN V/m	OK
A	250	A1	400	✓	$0,625 \cdot 10^6$	x
		A2	200	x	$1,250 \cdot 10^6$	x
		A3	100	x	$2,500 \cdot 10^6$	x
B	500	B1	800	✓	$0,625 \cdot 10^6$	x
		B2	400	x	$1,250 \cdot 10^6$	✓
		B3	200	x	$2,500 \cdot 10^6$	x
C	750	C1	1563	✓	$0,480 \cdot 10^6$	x
		C2	1200	x	$0,625 \cdot 10^6$	✓
		C3	600	x	$1,250 \cdot 10^6$	✓
		C4	300	x	$2,500 \cdot 10^6$	x
D	1000	D1	2325	✓	$0,430 \cdot 10^6$	x
		D2	1600	x	$0,625 \cdot 10^6$	✓
		D3	800	x	$1,250 \cdot 10^6$	✓
		D4	400	x	$2,500 \cdot 10^6$	x

6.2.3 Versuchsdurchführung

Der Versuchsaufbau zur Analyse des AMP in Abhängigkeit von Testzeit, elektrischer Feldstärke und Spannung ist in **Abbildung 56** gezeigt.

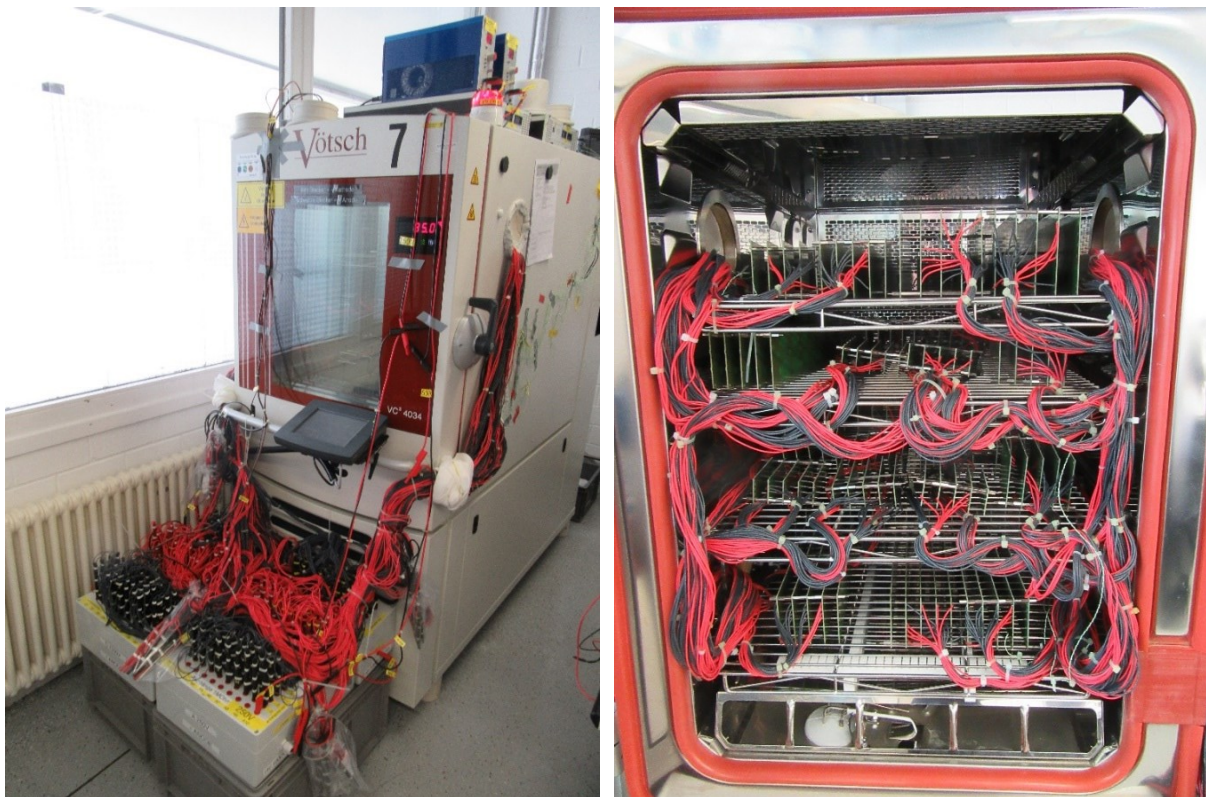


Abbildung 56: Versuchsaufbau. Links: Klimakammer mit angeschlossenen Spannungsversorgungen und Vorwiderständen. Rechts: Anordnung der Leiterplatten in der Klimakammer.

Die Leiterplatten wurden bei 85 °C / 85 % relativer Luftfeuchte unter elektrischer Spannung getestet; Leiterplattentyp A mit 250 V, Typ B mit 500 V, Typ C mit 750 V und Typ D mit 1000 V. Details zu den verwendeten Messgeräten finden sich in Abschnitt 9.1 im Anhang IX. Das AMP-Wachstum wird zu zehn Zeitpunkten in Abständen von circa 200 h (**Tabelle 16**) analysiert.

Tabelle 16: Zeitstufen ab initialem Einschalten der Spannungsversorgung: Zu den angegebenen Zeitpunkten wurden die betreffenden Leiterplatten von der Spannungsversorgung getrennt.

STUFE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zeit	235 h	394 h	612 h	802 h	1042 h	1212 h	1403 h	1571 h	1760 h	2024 h

Hierfür wurden je Zeitstufe und Testspannung eine Gruppe von drei wie in Abbildung 55 verschaltete Testleiterplatten, eine gegensätzlich gepolte Leiterplatte und eine nicht elektrisch angeschlossen Leiterplatte in den Test gegeben. Am Ende jeder Zeitstufe wurden die entspre-

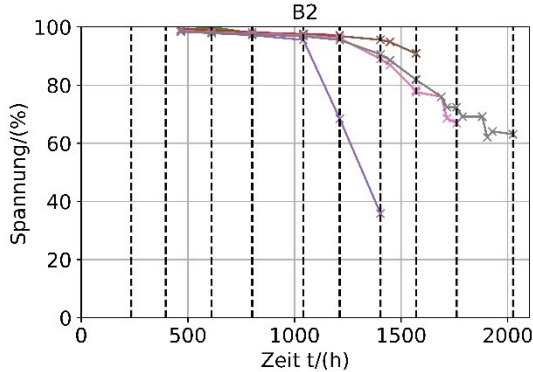
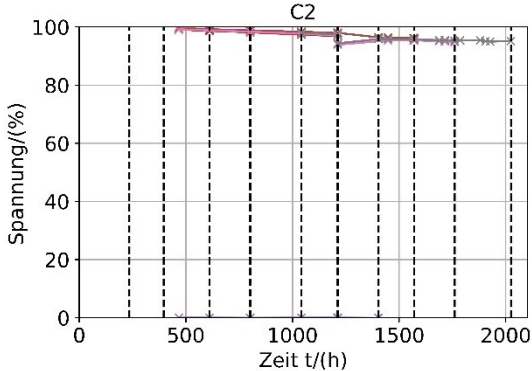
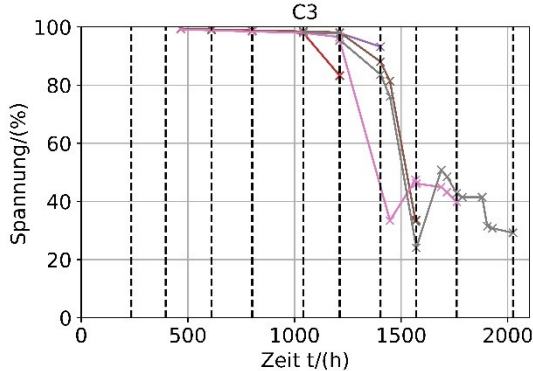
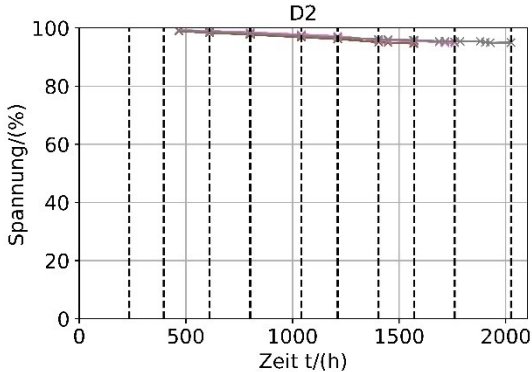
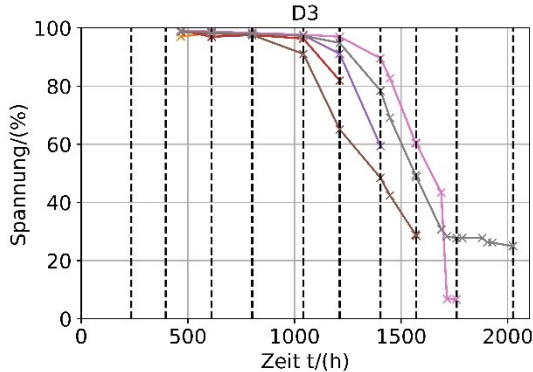
chenden Leiterplatten abgeschaltet durch Trennen von der Spannungsversorgung und anschließendes Kurzschließen der Teststrukturen. Das Kurzschließen verhindert weiteres AMP-Wachstum durch kapazitive Aufladungen der Teststrukturen oder offenen Anschlusskabel auf undefinierte Potentiale. Eine einmalige Unterbrechung der Prüfklimabedingungen für eine Zwischenentnahme der Testleiterplatten erfolgte nach der sechsten Zeitstufe.

Auf jeder Testleiterplatte befinden sich Kreisstrukturen mit unterschiedlichen Leiterbahnabständen. Alle Kreisstrukturen einer Testspannung, eines Leiterbahnabstands und einer Zeitstufe werden parallel zusammengeschlossen und hinter einen Vorwiderstand von $1\text{ M}\Omega$ geschaltet. Im Falle eines Kurzschlusses durch AMP limitiert der Vorwiderstand so den fließenden Strom, um die gewachsenen Strukturen für die nachfolgende Analyse zu erhalten. Da bei Kreisstrukturen mit kleinen Leiterbahnabständen zu erwarten ist, dass ein Kurzschluss frühzeitiger eintritt als bei größeren Leiterbahnabständen, wurde für jede Kreisgröße eines Leiterbahnabstands und einer Zeitstufe ein eigener $1\text{ M}\Omega$ Vorwiderstand verwendet.

Die gegensätzlich gepolte Leiterplatte ermöglicht es, Einflüsse durch die Herstellung oder das Layout der Leiterplatte ausschließen zu können. Die spannungsfreie Leiterplatte erlaubt es, zwischen Effekten, die rein durch die klimatischen Bedingungen auftreten, und Effekten, die unter zusätzlichem Spannungseinfluss auftreten, zu differenzieren. Es zeigten sich bei beiden Referenz-Leiterplatten keine Auffälligkeiten.

Die Kontrolle der elektrischen Isolationswiderstände der Teststrukturen wurde in diesem Versuch manuell vorgenommen. Da der zu messende Isolationswiderstand zu groß ist für eine direkte Messung mit einem Multimeter, wurde ersatzweise die an den Vorwiderständen der Teststrukturen abfallende elektrische Spannung gemessen. Hieraus kann die am Prüfling anliegende elektrische Spannung errechnet werden und daraus wiederum der elektrische Isolationswiderstand der Teststruktur, der auf diese Weise über die gesamte Testzeit überwacht werden kann. Die Messung des Spannungsabfalls am Vorwiderstand wurde mindestens wöchentlich und gegen Ende der Testzeit, wo sich schnellere Veränderungen des Leiterplattenwiderstands gezeigt haben, sogar bis zu täglich vorgenommen. Die Daten sind in **Tabelle 17** graphisch dargestellt. Aufgetragen ist auf der y-Achse die am Prüfling anliegende Testspannung von 0 bis 100 % über der Testzeit in Stunden. Die senkrechten Linien stellen die Zeitstufen für Zwischenwerte nach Tabelle 16 dar. Durch die senkrechte rote Linie ist der Zeitpunkt der Zwischenentnahme gekennzeichnet. Ein Messpunkt gibt den gemessenen elektrischen Isolationswiderstand der Kreisstrukturen eines Leiterbahnabstands und einer Zeitstufe wieder. Es wird deutlich, dass ab Zeitstufe 5 bis 6 unabhängig von der Testspannung lediglich die engeren Leiterbahnabstände mit einhergehender größerer elektrischer Feldstärke einen Abfall des elektrischen Isolationswiderstands der Teststruktur zeigen.

Tabelle 17: Testspannungsverlauf von 0 bis 100 % aufgetragen über der Testzeit. Durch senkrechte gestrichelte Linien sind die Zeitpunkte vermerkt, zu denen Leiterplatten von der Spannung getrennt wurden. Dargestellt sind die Werte für Kreisgröße 2 bei 500V, 750V und 1000V Testspannung und Kreisgröße 3 bei 750V und 1000V Testspannung. Die Einzelkurven stellen die zeitlichen Verläufe der Testspannung an den einzelnen Kreisgrößen einer Zeitstufe dar. Zusätzlich vermerkt sind die Leiterbahnabstände der untersuchten Kreisstrukturen sowie die elektrische Feldstärke zwischen äußerer und innerer Leiterbahn.

U	SPANNUNGSABFALL AN DER TESTSTRUKTUR	
500 V		B2: 400 μm, $1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$
		
750 V	C2: 1200 μm, $0,625 \cdot 10^6 \text{ V/m}$	C3: 600 μm, $1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$
		
1000 V	D2: 1600 μm, $0,625 \cdot 10^6 \text{ V/m}$	D3: 800 μm, $1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$
		

6.2.4 Versuchsauswertung

Bei allen in Tabelle 15 als auswertbar gekennzeichneten Teststrukturen wurde innerhalb der Testzeit von 2024 h ein anodisches Migrationsphänomen zwischen dem äußeren und inneren Kreis festgestellt. Ein Einfluss der Innenlagen der vierlagigen Leiterplatte auf das Wachstum der AMP ist auszuschließen. Dies wurde bereits bei Layout L2, beispielhaft gezeigt in Abschnitt 4.1 in Abbildung 20, analysiert. Dort konnte kein Unterschied der AMP-Pfade im Bereich der Leiterplatte mit und ohne Innenlage beobachtet werden.

Wie in Tabelle 17 ersichtlich, sind nur C2 und D2 mit 750 V und 1000 V Testspannung und einer elektrischen Feldstärke von $0,625 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ zwischen den Leiterbahnen nicht im Laufe der Testzeit von 2024 h ausgefallen. B2, C3 und D3 mit 500 V, 750 V und 1000 V und höherer elektrischer Feldstärke von $1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ zeigen hingegen Ausfälle.

In **Tabelle 18** ist beispielhaft für die Kreisstruktur mit der höchsten Testspannung von 1000 V und der höchsten elektrischen Feldstärke von $1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ das AMP zwischen dem äußeren und inneren Kreis gezeigt. Deutlich zu erkennen sind die mit zunehmender Testzeit längeren AMP-Pfade.

Aufgrund der Voruntersuchungen in Abschnitt 6.2.1 ist zu erwarten, dass die AMP bei den Leiterplatten mit der höchsten elektrischen Spannung und Feldstärke (Kreisstruktur D3) am schnellsten und ausgeprägtesten auftreten. Da bei Kreisstruktur D3 erst ab 612 h erste AMP-Pfade detektiert werden können, wurde dieser Zeitpunkt für die erste Auswertung der AMP auch für alle anderen Kreisstrukturen festgelegt.

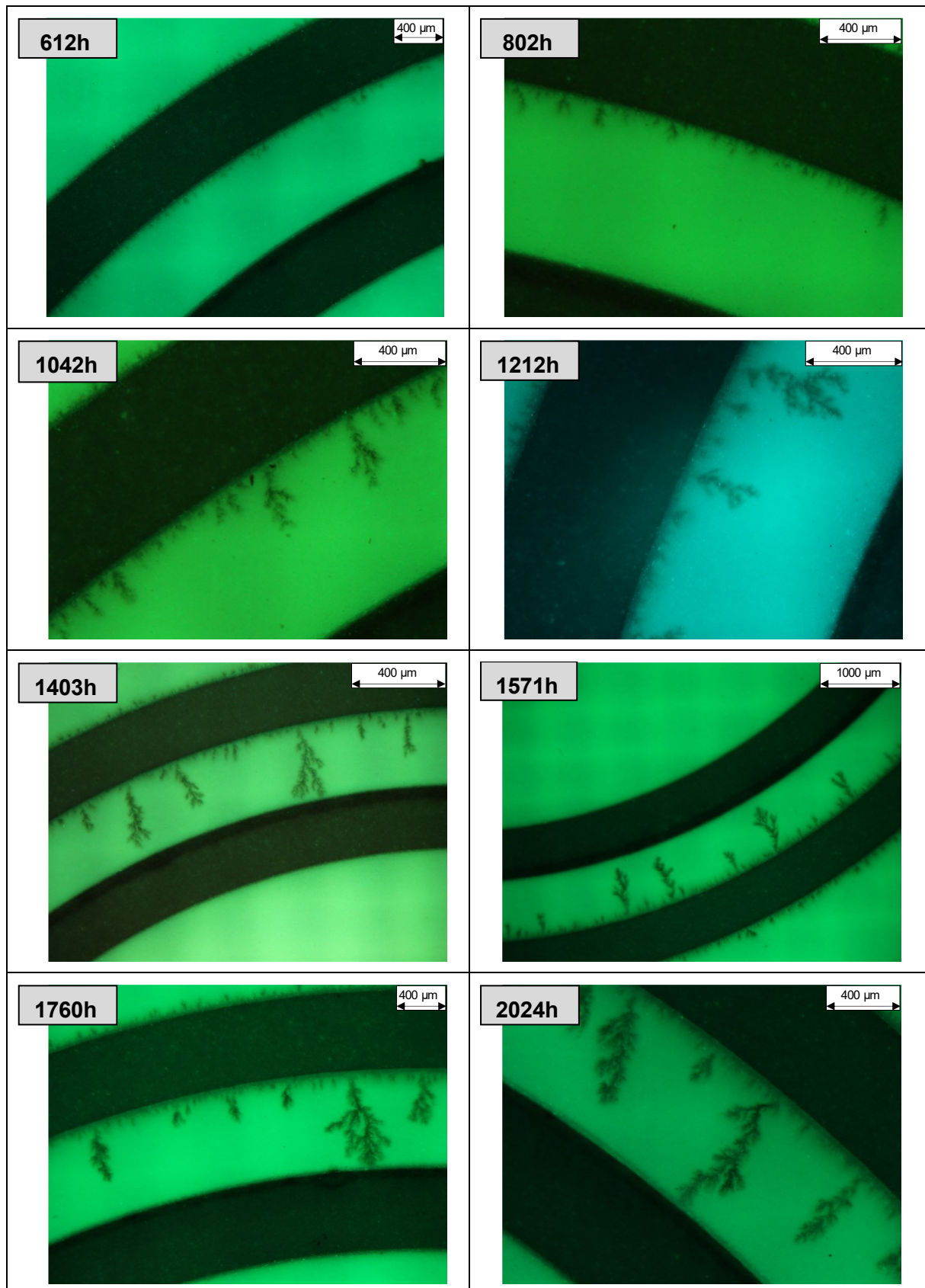
Für die Analyse der AMP-Pfade wurde aufgrund der Rotationssymmetrie der Teststruktur mit einem Zufallsverfahren auf jeder Leiterplatte für jeden Leiterbahnabstand ein auf das AMP zu untersuchendes Kreisviertel als repräsentativ ausgewählt. Damit ergeben sich pro Zeitstufe drei ausgewertete Kreisviertel einer elektrischen Spannung und Feldstärke.

In **Abbildung 57 links** ist die AMP-Verteilung eines kompletten Kreises C3 nach 1212 h mit einer Testspannung von 750 V und einem Leiterbahnabstand von 600 μm gezeigt.

Um die Migrationspfade sicher von der geätzten Leiterbahnkante unterscheiden zu können, wurden die Migrationseffekte erst ab einer Länge von 30 μm berücksichtigt. Die Vermessung ist in **Abbildung 57 rechts** beispielhaft dargestellt und erfolgt senkrecht zur Leiterbahnkante. Eingezeichnet ist die Linie, welche die Ätzkante wiedergibt, sowie eine zweite Linie äquidistant dazu im Abstand von circa 30 μm . Alle AMP-Pfade, die über die zweite Linie ragen, werden in ihrer Länge l_{AMP} ab der ersten Ätzkantenlinie vermessen.

In **Tabelle 19** ist die Anzahl an AMP, welche je Kreisgröße und Zeitstufe vermessen wurde, vermerkt.

Tabelle 18: Beispielaufnahmen des AMP für die unterschiedlichen Zeitstufen von Kreisstruktur D3 (Testspannung 1000V, Leiterbahnabstand 800 μm). Die Aufnahmen wurden senkrecht zur Leiterplattenoberfläche mittels Lichtmikroskop mit UV-Filter aufgenommen. Der Kreis, von dem das AMP ausgeht, ist auf Positivpotential, der innere, gegenüberliegende auf Negativpotential geschaltet.



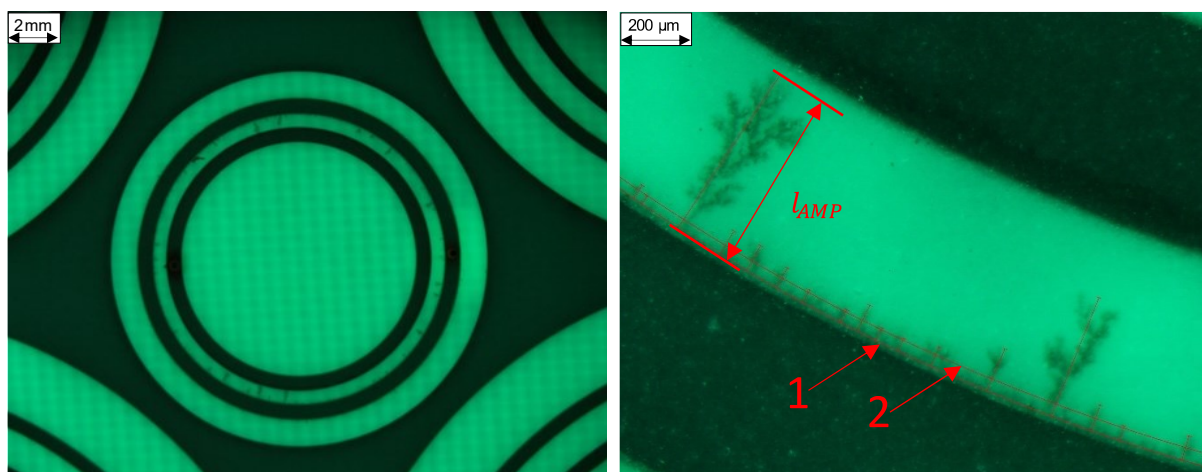


Abbildung 57: Links: AMP bei Kreisgröße C3 (Testspannung 750 V, Leiterbahnabstand 600 µm), getestet für 1212 h. Rechts: Vermessung des AMP eines Teilabschnitts des linken Kreises. Linie „1“ markiert die Ätzkante der Leiterbahn, Linie „2“ eine parallel dazu gezogene Linie im Abstand von einer Ätzkantenbreite (entspricht ca 30 µm). Migrationspfade, welche über die zweite Linie ragen, werden senkrecht von Linie „1“ der Ätzkante in ihrer Länge l_{AMP} vermessen. Beide Aufnahmen wurden senkrecht zur Leiterplattenoberfläche mittels Lichtmikroskop mit eingebautem UV-Filter aufgenommen.

Tabelle 19: Anzahl der vermessenen AMPs je Zeitstufe und Kreisgröße. Von jeder Kreisgröße wurde auf jeder der drei getesteten Leiterplatten je ein zu vermessendes Kreisviertel zufällig ausgewählt (Gesamtzahl vermessener Kreise = 3/4). Mit * markiert und eingeklammert sind AMP-Anzahlen, bei welchen Daten aus einem Vollkreis und zwei Viertelkreisen vorlagen (Gesamtzahl vermessener Kreise = 6/4). Für Kreisstruktur C2, Zeitstufe 7, liegen aufgrund eines Defekts keine Daten vor.

KREIS- STRUKTUR	ZEITSTUFEN							
	10	9	8	7	6	5	4	3
D3	351	379	362	359	443 (885*)	435	351	169
D2	425	321	637	460	200 (400*)	185	184	36
C3	172	235	206	171	176	156	115	50
C2	157	218	226	-	185	37	13	3
B2	71	94	70	89	78	73	76	14

6.2.4.1 Bestimmung der mittleren AMP-Länge

Die zeitabhängige mittlere Länge der AMP-Pfade $l_m(t)$ wird durch Mittelung aller vermessenen AMP bei einer Kreisgröße, Spannung und Zeitstufe bestimmt.

In **Abbildung 58** ist $l_m(t)$ und für eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Leiterbahnabstände untereinander der normierte Wert $l_m(t)/d_{LB}$ für 750 V und 1000 V dargestellt.

Abbildung 59 zeigt $l_m(t)$ und $l_m(t)/d_{LB}$ für die elektrische Feldstärke von $0,625 \cdot 10^6$ V/m und $1,250 \cdot 10^6$ V/m.

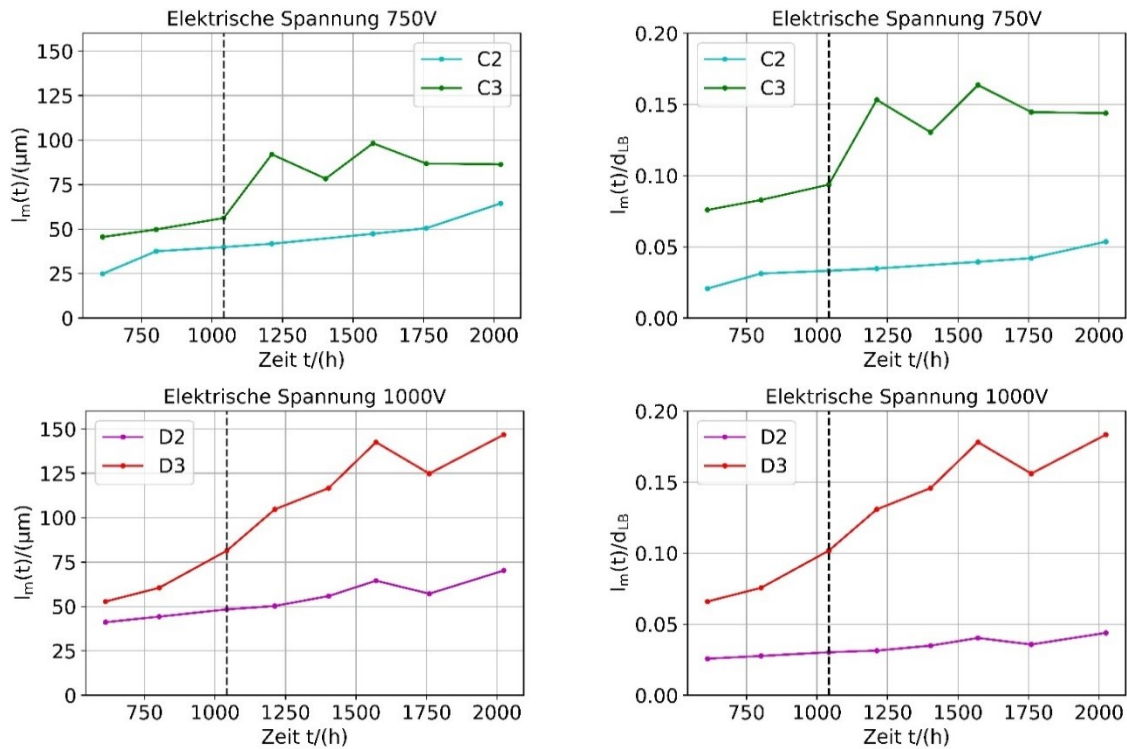


Abbildung 58: Mittlere AMP-Länge in Abhängigkeit der Testzeit t . Oben links: $l_m(t)$ für 750 V für Kreisstruktur C2 ($d_{LB} = 1200 \mu\text{m}$) und C3 ($d_{LB} = 600 \mu\text{m}$), unten links für 1000 V für Kreisstruktur D2 ($d_{LB} = 1600 \mu\text{m}$) und D3 ($d_{LB} = 800 \mu\text{m}$). Die senkrechte Linie stellt den Zeitpunkt der ersten Entnahme nach 1212 h dar. In der rechten Spalte sind die jeweils auf den Leiterbahnabstand normierten gemittelten AMP-Längen $l_m(t)/d_{LB}$ aus der linken Spalte dargestellt.

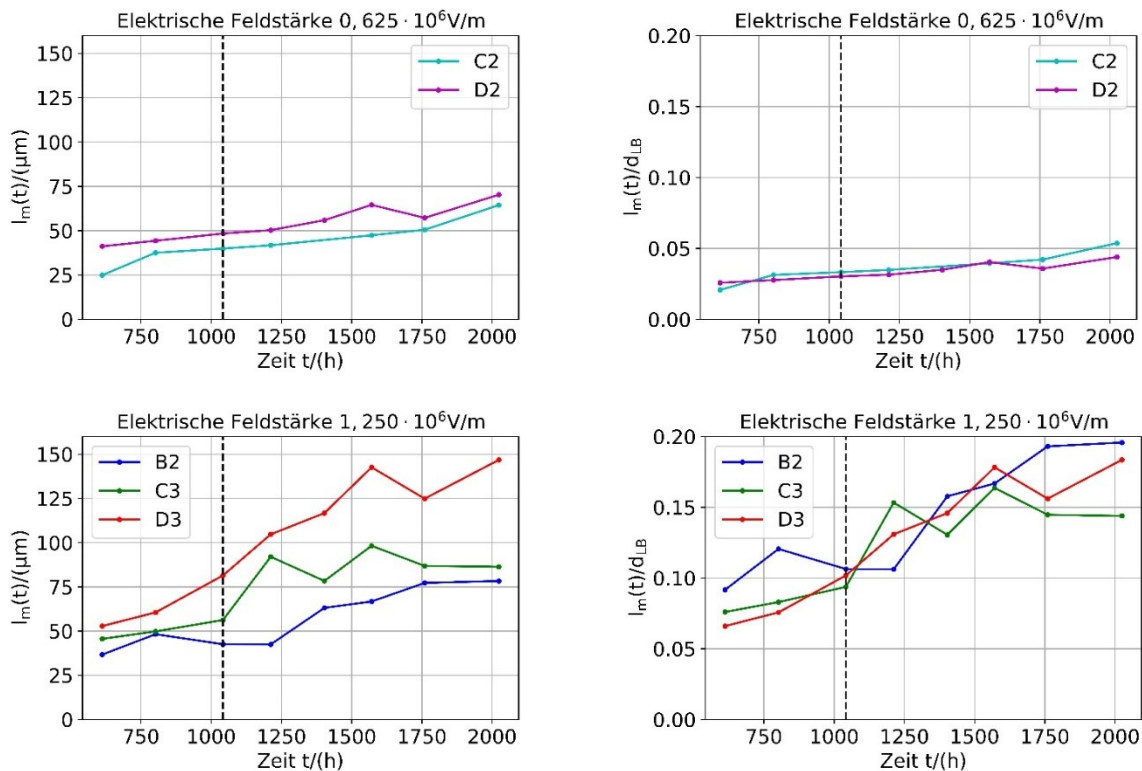


Abbildung 59: Mittlere AMP-Länge $l_m(t)$ in Abhängigkeit der Testzeit t . Oben links: $l_m(t)$ für die elektrische Feldstärke von $0,625 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ für Kreisstruktur C2 (750 V) und D2 (1000 V), unten links für $1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ für Kreisstruktur B2 (500 V), C3 (750 V) und D3 (1000 V). Die senkrechte Linie stellt den Zeitpunkt der ersten Entnahme nach 1212 h dar. In der rechten Spalte sind die jeweils auf den Leiterbahnabstand normierten, gemittelten AMP-Längen $l_m(t)/d_{LB}$ aus der linken Spalte dargestellt.

Alle mittleren AMP-Längen $l_m(t)$ nehmen mit zunehmender Testzeit zu. Der Ausfall der Teststrukturen aufgrund den Leiterbahnabstand überbrückender AMP-Pfade wird durch ein Abflachen der Kurve bei den Strukturen B2, C3 und D3 für längere Testzeiten sichtbar. Dies wird später bei der Analyse der AMP-Anzahl im nächsten Abschnitt 6.2.4.2 weitergehend diskutiert. Aufgrund unterschiedlicher Leiterbahnabstände wird die Betroffenheit von AMP durch Vergleich der normierten mittleren AMP-Längen der verschiedenen Kreisstrukturen ermittelt. Diese zeigt, dass die normierte mittlere Länge bei einheitlicher Feldstärke unabhängig von der Testspannung in gleichem Maße zunimmt. Die vergleichende Analyse der normierten mittleren AMP-Länge bei gleicher Spannung aber unterschiedlicher Feldstärke zeigt einen deutlich steileren Anstieg der normierten mittleren AMP-Länge bei der höheren Feldstärke.

Um den Einfluss der Spannung und der elektrischen Feldstärke auf die normierte mittlere AMP-Länge tiefergehend zu analysieren, ist in **Tabelle 20** die normierte mittlere Gesamtlänge $l_{m,ges}$ der AMP-Pfade verzeichnet. Diese wird nach Gleichung (13) berechnet als die Summe der mittleren auf den Leiterbahnabstand d_{LB} normierten Einzel-AMP-Längen über Zeitstufen nach Tabelle 16. Die normierte mittlere Gesamtlänge stellt damit ein Maß für die Betroffenheit der Teststruktur von AMP über die komplette Testzeit dar.

$$\sum_t \frac{l_m(t)}{d_{LB}} = l_{m,ges} \quad (13)$$

Ein direkter Einfluss der Testspannung auf $l_{m,ges}$ ist bei konstant gehaltenem elektrischen Feld nicht erkennbar. Deutlich zu erkennen ist aber, dass die normierte mittlere Gesamtlänge $l_{m,ges}$, also die Betroffenheit der Leiterbahnen von AMP, mit zunehmender elektrischer Feldstärke bei konstant gehaltener elektrischer Spannung größer wird. Bei der höheren elektrischen Spannung von 1000 V zeigt eine Verdopplung der Feldstärke mit einem Faktor von 3,9 einen ähnlichen Einfluss auf $l_{m,ges}$ wie bei 750 V mit einem Faktor von 3,4.

Tabelle 20: Normierte mittlere Gesamtlänge $l_{m,ges}$ nach Gleichung (13) in Abhängigkeit der elektrischen Spannung und Feldstärke. Auch verzeichnet sind die Einflussfaktoren von elektrischer Spannung und Feldstärke auf $l_{m,ges}$.

NORMIERTE MITTLERE GESAMTLÄNGE $l_{m,ges}$		ELEKTRISCHE SPANNUNG				
		500 V	750 V		1000 V	
ELEKTRISCHES FELD	$0,625 \cdot 10^6 \text{ V/m}$		0,29	↓ · 3,4	0,27	↓ · 3,9
	$1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$		0,99		1,04	

Kein direkter Einfluss erkennbar

6.2.4.2 Bestimmung der AMP-Anzahl

In diesem Abschnitt soll die Anzahl der anodischen Migrationsphänomene in Abhängigkeit von der Testzeit, der elektrischen Spannung, sowie des elektrischen Felds analysiert werden. Auch wird die Längenverteilung der AMP-Pfade diskutiert.

Zur einfacheren Klassifizierung und Vergleichbarkeit werden die Längen der anodischen Migrationspfade $l_{AMP}(t, U, E)$ im Verhältnis zu dem für die Migration zu überwindenden Leiterbahnabstand $d_{LB}(U, E)$ angegeben. Die auf den Leiterbahnabstand normierten und in Prozent angegebenen Längen der Migrationspfade $l'_{AMP}(t, U, E) \%$ werden nach Gleichung (14) berechnet. Sie hängen ab von der Zeit t , der elektrischen Spannung U sowie dem elektrischen Feld E . Die Leiterbahnabstände $d_{LB}(U, E)$ sind Tabelle 15 zu entnehmen.

$$\frac{l_{AMP}(t, U, E)}{d_{LB}(U, E)} \cdot 100 \% = l'_{AMP}(t, U, E) \% \quad (14)$$

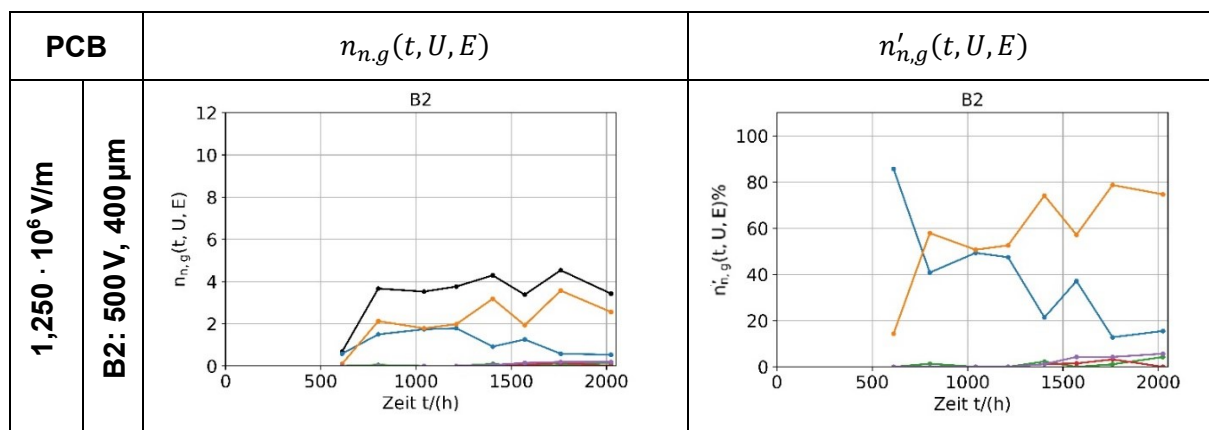
Die auf den Leiterbahnabstand normierten Längen der AMP-Pfade nach Gleichung (14) werden klassifiziert nach den Gruppen 0-10 %, 10-30 %, 30-50 %, 50-70 % und 70-100 %.

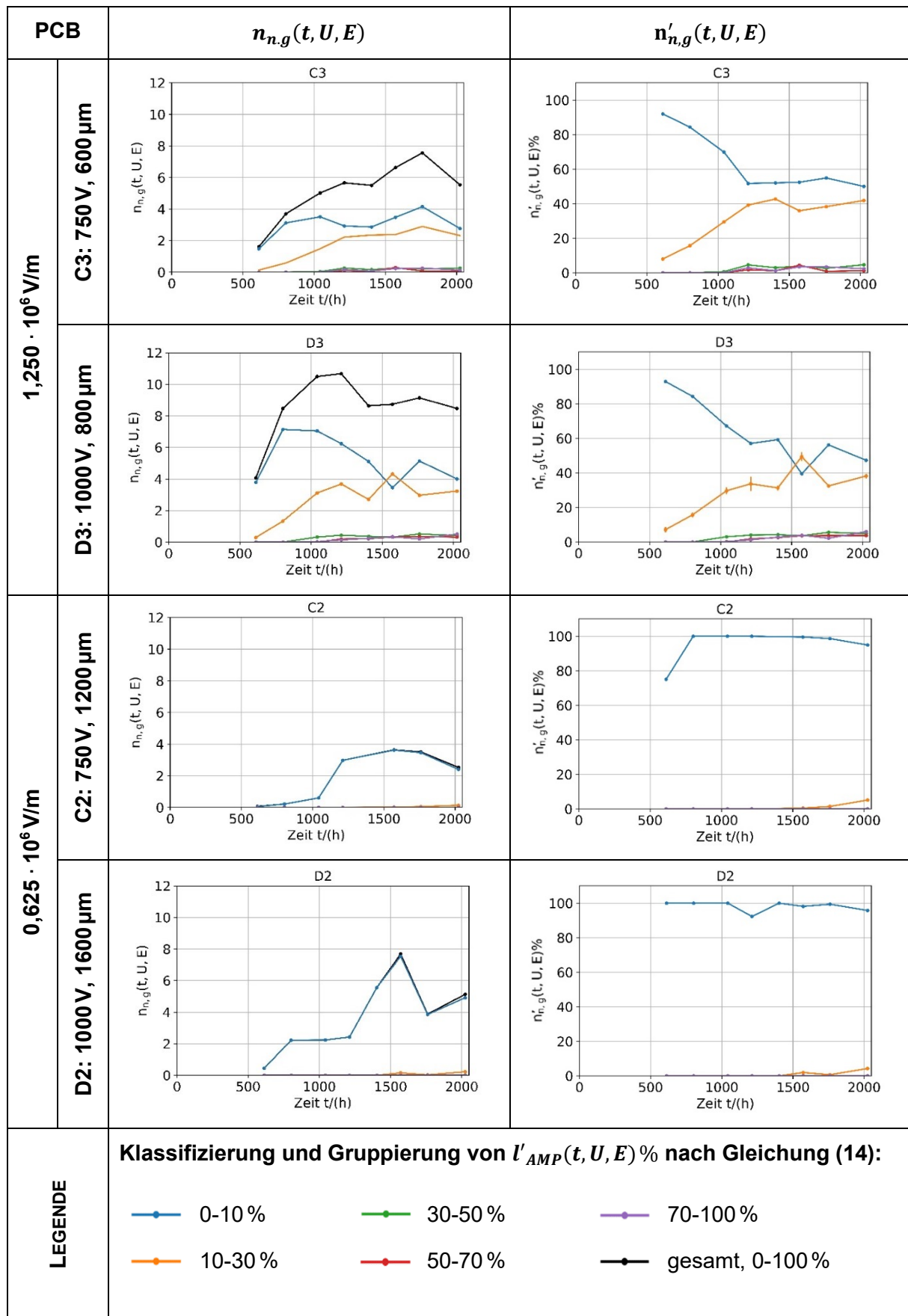
Um die Anzahl der AMP $n_{n,g}(t, U, E)$ zwischen den unterschiedlichen Kreisstrukturen vergleichen zu können, wird die AMP-Anzahl auf einer Leiterbahnlänge von 1000 μm angegeben.

Zusätzlich werden die detektierten AMP-Längen nach der Häufigkeit ihres Auftretens gruppiert. Diese wird nach Gleichung (15) errechnet. $n_{n,g}(t, U, E)$ stellt die Anzahl AMP in einer Gruppe dar, $n_{n,ges}(t, U, E)$ alle auf 1000 μm Leiterbahnlänge gefundenen AMP.

$$n'_{n,g}(t, U, E) \% = \frac{n_{n,g}(t, U, E)}{n_{n,ges}(t, U, E)} \cdot 100 \% \quad (15)$$

Abbildung 60: Links: Normierte Gesamtanzahl und normierte eingruppierte AMP $n_{n,g}(t, U, E)$ auf 1000 μm Leiterbahnlänge über der Testzeit in Stunden. Rechts: Anteil der normierten eingruppierten AMP $n'_{n,g}(t, U, E) \%$ bezogen auf die Gesamtanzahl AMP, aufgetragen über der Testzeit in Stunden.





In **Abbildung 60** sind die nach Gleichung (14) und (15) klassifizierten AMP-Anzahlen dargestellt. In der linken Spalte $n_{n,g}(t, U, E)$ als Anzahl AMP pro 1000 μm Leiterbahnlänge, in der rechten Spalte $n'_{n,g}(t, U, E) \%$ als prozentualer Anteil der AMP in einer Einzelgruppe bezogen auf die Gesamtanzahl AMP. Beide Werte werden über der Testzeit t aufgetragen. Im Folgenden werden die in **Abbildung 60 links** gezeigten Daten diskutiert. Bei initialem Einschalten der Spannungsversorgung weisen die Kammstrukturen keine AMP auf und die elektrische Feldstärke entlang der Leiterbahnen ist homogen. Nach ausreichender Feuchteaufnahme und Alterung des Lötstopplacks beginnt die Leiterbahn zu oxidieren, und AMP bilden sich entlang der Leiterbahn aus. Dabei zeigen die Daten in **Abbildung 60 links**, dass die AMP-Dichte nur zu Beginn des Testzeitraums ansteigt und dann keiner deutlichen Zunahme mehr unterliegt. Vermutlich hat sich zu diesem Zeitpunkt eine inhomogene Verteilung der elektrischen Feldstärke ausgebildet, wodurch bestehende AMP wegen der lokal an der Spitze erhöhten elektrischen Feldstärke länger werden, aber sich keine weiteren AMP mehr bilden. Die Streuung der Messkurven über der Zeit ist auf das verwendete Messverfahren mit unterschiedlichen Leiterplatten je Zeitpunkt zurückzuführen.

Es lässt sich auch eine Tendenz zu höherer AMP-Anzahl mit zunehmender elektrischer Spannung und Feldstärke erkennen.

Tabelle 21: Über die komplette Testzeit aufsummierte normierte eingruppierte AMP-Anzahl $N_{n,g}(U, E)$ auf 1000 μm Leiterbahnlänge nach **Abbildung 60**. Bei Leiterplattentyp C2 wurde, um die Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Leiterplatten zu erhalten, für die fehlende Entnahmestufe 7 ersatzweise die zwischen Entnahmestufe 6 und 8 gemittelte AMP-Anzahl verwendet. Zusätzlich verzeichnet ist der Verstärkungsfaktor (V-Faktor) bei einer Spannungsverdopplung bei konstantem E-Feld und einer E-Feldverdopplung bei konstanter Spannung.

TESTSTRUKTUR		0,625 · 10 ⁶ V/m		1,250 · 10 ⁶ V/m		
		C2, 750 V	D2, 1000 V	B2, 500 V	C3, 750 V	D3, 1000 V
V-FAKTOR (0-100 %)	U · 2, E KONST.				· 2,5	
	E · 2, U KONST.				· 2,3	
					· 2,5	
GESAMT, 0-100 %		16,8	29,5	27,3	41,2	68,6
0-10 %		16,6	29,1	8,87	24,3	41,9
10-30 %		0,20	0,39	17,2	14,3	21,6
30-50 %		0,0	0,0	0,34	1,16	2,34
50-70 %		0,0	0,0	0,24	0,58	1,37
70-100 %		0,0	0,0	0,58	0,84	1,43

Spannungs- und E-Feldeinfluss erkennbar →

In **Tabelle 21** ist die über die komplette Testzeit aufsummierte, auf den Leiterbahnabstand normierte und nach Abbildung 60 eingruppierte AMP-Anzahl $N_{n,g}(U, E)$ dargestellt, als weiterer, das AMP-Wachstum beschreibender Parameter. Die Berechnung ist in Gleichung (16) gezeigt.

$$N_{n,g}(U, E) = \sum_t n_{n,g}(t, U, E) \quad (16)$$

Die höchste Summe ergibt sich mit 68,6 für Kreisstruktur D3 mit der höchsten elektrischen Testspannung und Feldstärke. Bei konstant gehaltener elektrischer Feldstärke zeigt $N_{n,g}(U, E)$ dabei sowohl in den einzelnen Gruppen als auch im Gesamten mit größerer Testspannung die Tendenz zu größeren Werten. Dasselbe Verhalten zeigt sich bei $N_{n,g}(U, E)$ auch bei konstant gehaltener Testspannung mit größerer elektrischer Feldstärke. Eine Verdopplung der elektrischen Feldstärke und der elektrischen Spannung zeigt dabei auf $N_{n,g}(U, E)$ für die Gesamt-AMP-Anzahl einen ähnlichen Verstärkungsfaktor zwischen 2,3 und 2,5.

Damit korreliert die AMP-Dichte auf der Leiterbahn sowohl mit der elektrischen Spannung als auch der Feldstärke. Eine Korrelation zwischen $N_{n,g}(U, E)$ und einem Ausfall der Teststruktur innerhalb der Testzeit kann nicht festgestellt werden, da sowohl Strukturen mit niedrigem, als auch hohem $N_{n,g}(U, E)$ ausgefallen sind. Aber es zeigt sich, dass bei gleicher elektrischer Feldstärke die Strukturen zeitlich nach der Höhe ihrer Testspannung ausfallen: zuerst D3 mit der höchsten Testspannung, dann C3 und schließlich B2 mit der niedrigsten Testspannung, siehe hierzu auch Abbildung 62 in Abschnitt 6.2.5.1.

Am häufigsten sind bei allen Teststrukturen AMP mit einer Länge in der Gruppe 0-10 % und 10-30 % des Leiterbahnabstands. Bei Kreisstruktur C2 und D2 mit $0,625 \cdot 10^6 \text{ V/m}$, der niedrigeren elektrischen Feldstärke, wiesen die meisten AMP-Pfade nur 0-10 % des Leiterbahnabstands auf.

AMP-Pfade länger als 10-30 % des Leiterbahnabstands treten nur bei den Kreisstrukturen mit $1,25 \cdot 10^6 \text{ V/m}$ auf, den Teststrukturen mit der höheren elektrischen Feldstärke. Die Dichte der AMP-Pfade je Gruppe liegt dabei aber deutlich unter einem AMP auf 1000 μm Leiterbahnlänge.

Die Analyse des prozentualen Anteils der Gruppe je Zeitschritt in **Abbildung 60 rechts** zeigt deutlich die Zeitabhängigkeit der AMP-Verteilungen auf. So nimmt bei allen Teststrukturen der Anteil sehr kurzer AMP (0-10 %) mit steigender Testzeit ab und etwa in gleichem Maße nimmt der Anteil längerer AMP (10-30 %) zu. Dies bestätigt die Analyse der Daten in Abbildung 60 links, dass die AMP mit zunehmender Testzeit eher in ihrer Länge zulegen, als dass sich neue AMP-Pfade bilden.

Bei Kreisstruktur C3 und D3 ist nach der Abnahme des Anteils an 0-10 % langen AMP-Pfaden und Zunahme des Anteils an 10-30 % langen AMP-Pfaden ein deutliches Abflachen der beiden Kurven zu erkennen. Bei B2 ist dieses Abflachen vermutlich aufgrund der geringeren Datenmenge an AMP-Pfaden (vergleiche hierzu auch Tabelle 19) etwas weniger deutlich zu erkennen. Das Abflachen der Kurven zeigt den Ausfall der Strukturen durch AMP-Pfade an, die den Leiterbahnabstand überbrücken und die Teststruktur so kurzschließen. In diesem Fall liegt keine Spannung mehr an der Kreisstruktur an, die AMP können nicht mehr wachsen und auch die AMP-Verteilung ändert sich nicht mehr.

Aber nicht nur bei den Teststrukturen mit der größeren elektrischen Feldstärke, auch bei der kleineren elektrischen Feldstärke bei Kreisstruktur D2 und C2 deutet sich dieser Verlauf ansatzweise zum Ende der Testzeit hin an.

Die Analyse der Verteilung der AMP-Längen bei während der Testzeit ausgefallenen Strukturen zeigt deutlich, dass der Anteil an AMP mit einer Länge ab 30 % des Leiterbahnabstands bis zum Ende der Testzeit je Gruppe unter 6 % bleibt.

Im Vergleich zur Gesamtanzahl an beobachteten AMP entlang der Leiterbahn erreicht nur ein geringer Anteil an AMP eine Länge, die zum Ausfall der Teststruktur führt, siehe hierzu auch die Bilder der AMP in Tabelle 18.

6.2.5 Entwicklung eines Lebensdauermodells für unter hohen elektrischen Spannungen und Feuchtelast betriebene Leiterplatten

In diesem Abschnitt soll aus den in Abhängigkeit von der Testzeit, der elektrischen Spannung und des elektrischen Felds (beziehungsweise des Leiterbahnabstands) gewonnenen AMP-Daten ein Lebensdauermodell für unter hohen elektrischen Spannungen und unter Feuchtelast betriebene Leiterplatten entwickelt werden. Das Modell wird beispielhaft für Lötstopplack P1 auf Basismaterial A für eine Temperatur von 85 °C und eine relative Luftfeuchte von 85 % ermittelt, kann aber durch Anpassen der Parameter, die abhängig sind vom untersuchten Material und den Umgebungsbedingungen, auf weitere Lötstopplacke angewandt werden. Als Ausfall wird der Zeitpunkt gewertet, zu dem ein AMP-Pfad den Leiterbahnabstand überwunden hat.

Die Abhängigkeit der Ausprägung der AMP-Pfade von der elektrischen Feldstärke (bzw. vom Leiterbahnabstand), sowie der elektrischen Spannung wurde bereits in den vorangegangenen Abschnitten analysiert. Auf Basis dieser Untersuchungen wird folgende in Gleichung (17) gezeigte Abhängigkeit der maximalen AMP-Länge $l_{max}(t, d, U)$ von der Testzeit t in Stunden, des Leiterbahnabstands d_{LB} , sowie der an die Teststruktur angelegten elektrischen Spannung U vorgeschlagen, wobei a und k Parameter darstellen, die durch die Umgebung und den Lötstopplack definiert sind.

$l_{max}(t, U, d_{LB})$ ist definiert für den Bereich $0 \leq l_{max}(t, U, d) \leq d_{LB}$ und gilt für alle elektrischen Spannungen, wobei bei $U \geq 500V$ elektrische Feldstärken von $U/d_{LB} \geq 2,5 \cdot 10^6$ V/m ausgeschlossen sind (diese Einschränkung wird in Abschnitt 6.2.5.2 erläutert).

$$l_{max}(t, U, d_{LB}) = a \cdot U^2 \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{d_{LB}} \cdot k \cdot t\right) - 1 \right) \quad (17)$$

Der exponentielle Anteil der Funktion kann als zeitabhängige Alterung des Lötstopplacks in Abhängigkeit des elektrischen Felds $E = U/d_{LB}$ gewertet werden. Die Konstante k ist ein Parameter, der die Widerstandsfähigkeit des Lötstopplacks gegen Materialalterungseffekte durch das elektrische Feld angibt. Materialalterung durch ein elektrisches Feld ist bereits aus der Literatur bekannt [43].

Der Vorfaktor a enthält die temperaturabhängige Arrhenius-Gleichung, eingeführt in Abschnitt 2.4 in Gleichung (1). Diese gibt die Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeitskonstanten einer chemischen Reaktion von der Temperatur T , der Aktivierungsenergie E_A , der Boltzmann-Konstante k_B und einer Konstanten A an. Somit gilt für a :

$$a \propto A \cdot \exp\left(-\frac{E_A}{k_B \cdot T}\right) \quad (18)$$

Zusätzlich enthält a den Einfluss der Umgebungsfeuchte [87] auf die Bildung eines leitfähigen Pfads, der unerlässlich ist für die Bildung eines AMP.

Im nachfolgenden Abschnitt sollen Parameter a und k für den HV-SIR-Test unter $85^\circ\text{C}/85\%$ relativer Luftfeuchte beispielhaft für den Lötstopplack P1 ermittelt werden.

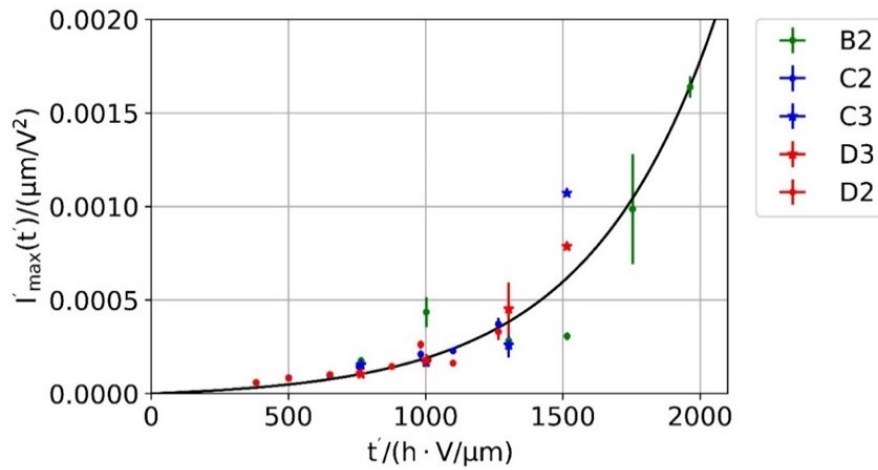


Abbildung 61: Skalierte AMP-Längen $l'_{max}(t')$ in Abhängigkeit der gewichteten Zeit t' . Eingezeichnet ist auch die gefittete Funktion aus Gleichung (21) mit den optimalen Parametern a und k aus Tabelle 22.

6.2.5.1 Bestimmung der Parameter a und k

Der Ausfallzeitpunkt der Teststruktur ist der Zeitpunkt, zu dem die AMP-Länge den Leiterbahnabstand erreicht hat. Aus diesem Grund werden je Zeitstufe und Kreisstruktur die drei längsten AMP-Pfade ausgewählt, gemittelt und inklusive ihrer Standardabweichung über der Testzeit aufgetragen. Um alle Datensätze mit einer gemeinsamen Funktion mit einheitlichen Parametern a und k , unabhängig vom Leiterbahnabstand d_{LB} und der elektrischen Spannung U , annähern zu können, wird die Funktion gewichtet.

Die gewichtete Zeit t' ergibt sich zu:

$$t' = \frac{U}{d_{LB}} \cdot t \quad (19)$$

Die skalierten AMP-Längen $l'_{max}(t')$ ergeben sich zu:

$$l'_{max}(t') = \frac{l_{max}(t')}{U^2} \quad (20)$$

Mit der in Gleichung (19) und (20) vorgenommenen Datenskalisierung ergibt sich die neue AMP-Längenfunktion zu:

$$l'_{max}(t') = a \cdot (\exp(k \cdot t') - 1) \quad (21)$$

Diese wird an die skalierten Daten gefittet, siehe dazu **Abbildung 61**. Dargestellt sind dort die skalierten AMP-Längen $l'_{max}(t')$ in Abhängigkeit der gewichteten Zeitachse t' .

Tabelle 22: Fitparameter a und k mit ihren Standardabweichungen.

PARAMETER	WERT	STANDARDABWEICHUNG
a IN $V^{-2} \cdot \mu m$	$2,568 \cdot 10^{-5}$	$0,49 \cdot 10^{-5}$
k IN $\mu m \cdot (V \cdot h)^{-1}$	$2,126 \cdot 10^{-3}$	$0,10 \cdot 10^{-3}$

Der Fit wurde mit der nichtlinearen Methode der kleinsten Quadrate mit Scipy, für Details siehe Abschnitt 9.1, durchgeführt. Zusätzlich ist die Standardabweichung der drei längsten AMP-Pfade einer Zeitstufe, Spannung und eines Leiterbahnabstands verzeichnet. Der Fit liefert für a und k die in **Tabelle 22** aufgeführten Fitparameter und ihre Standardabweichungen.

Die Länge der längsten AMP-Pfade pro Zeitstufe $l_{max}(t, U, d_{LB})$ ergibt sich damit für Lackvariante P1 auf Basismaterial A bei einer Umgebungstemperatur von 85 °C und einer relativen Umgebungsfeuchte von 85 % zu:

$$l_{max}(t, U, d_{LB}) = \frac{2,57 \cdot 10^{-5} \cdot \mu m}{V^2} \cdot U^2 \cdot \left(\exp\left(\frac{U}{d_{LB}} \cdot \frac{2,13 \cdot 10^{-3}}{V/\mu m \cdot h} \cdot t\right) - 1 \right) \quad (22)$$

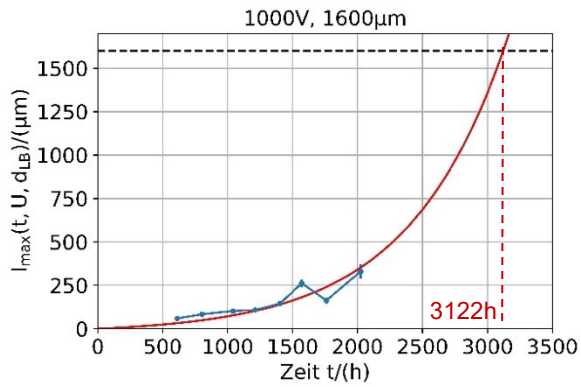
$l_{max}(t, U, d_{LB})$ ist nach Gleichung (17) definiert für den Bereich $0 \leq l_{max}(t, U, d) \leq d_{LB}$ und gilt für alle elektrischen Spannungen, wobei bei $U \geq 500 V$ elektrische Feldstärken von $U/d_{LB} \geq 2,5 \cdot 10^6 V/m$ ausgeschlossen sind. Diese Einschränkung wird in Abschnitt 6.2.5.2 erläutert.

Im nächsten Schritt wird das Ergebnis der Funktion $l_{max}(t, U, d_{LB})$ aus Gleichung (22) zusammen mit den gemittelten drei längsten AMP-Pfaden einer Zeitstufe dargestellt, siehe **Abbildung 62**. In Zeile 1 der Abbildung ist das Ergebnis für 1000 V Testspannung, in Zeile 2 für 750 V Testspannung und in der letzten Zeile für 500 V Testspannung dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist auch, dass die vorgeschlagene Funktion sehr gut die maximalen AMP-Längen einer Zeitstufe für alle elektrischen Spannungen wiedergibt. Auch lässt sich nun durch die Anwendung des Lebensdauermodells der Ausfallzeitpunkt der noch nicht innerhalb der Testzeit ausgefallenen Teststrukturen C2 und D2 voraussagen.

Es zeigt sich sowohl ein Einfluss der elektrischen Spannung als auch der Feldstärke auf die Ausfallzeit der Strukturen. So zeigen die experimentell ermittelten Ausfallzeiten ebenso wie das daran angepasste Modell, dass die Ausfallzeit bei einer Erhöhung der Feldstärke bei konstant gehaltener Spannung und bei einer Erhöhung der Testspannung bei konstant gehaltenem elektrischen Feld reduziert wird.

$0,625 \cdot 10^6 \text{ V/m}$



$1,250 \cdot 10^6 \text{ V/m}$

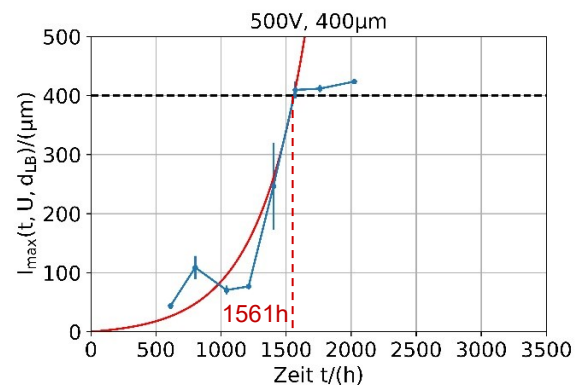
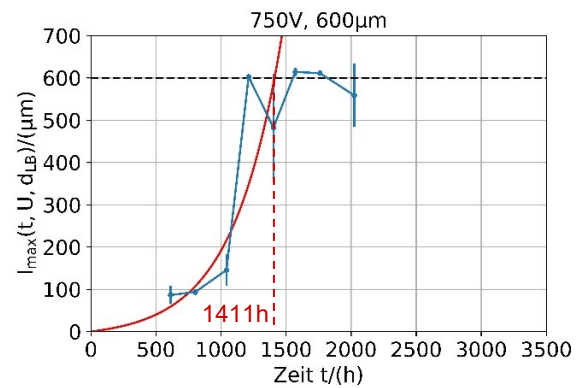
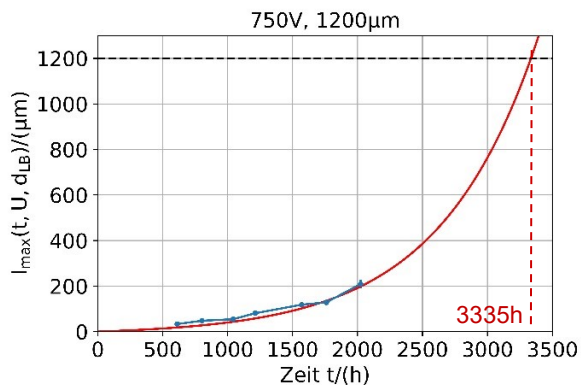
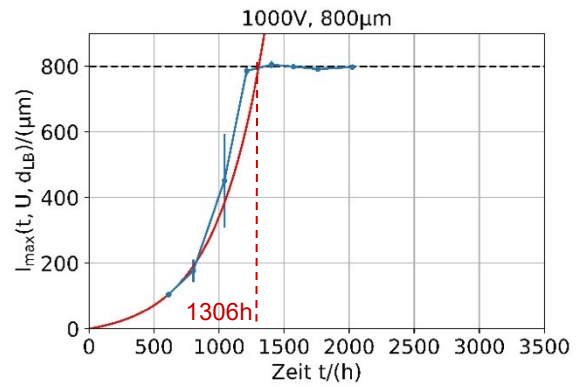


Abbildung 62: In allen Graphen ist die gemittelte Länge der längsten AMP-Pfade in μm mit Standardabweichung über der Testzeit in Stunden aufgetragen, wobei je Zeitstufe über die drei längsten AMP-Pfade gemittelt wurde. Zusätzlich verzeichnet ist die für alle elektrischen Spannungen und Leiterbahnabstände einheitlich definierte Funktion der maximalen AMP-Länge nach Gleichung (22). Die leichten Überschreitungen der Maximalwerte sind bedingt durch Messunsicherheiten durch die Konturenschärfe des Mikroskopbildes bei der Bestimmung der AMP-Längen.

6.2.5.2 Ermittlung der Zeit bis zum Ausfall

In diesem Abschnitt soll aus Gleichung (22) der funktionale Zusammenhang für den Ausfallzeitpunkt der Teststruktur (TTF, englisch Time To Failure) in Abhängigkeit der Testspannung U , sowie des Leiterbahnabstands d_{LB} errechnet werden.

Im Fall eines Ausfalls gilt:

$$l_{max}(TTF, U, d) = d_{LB} \quad (23)$$

Damit folgt nach Umstellen der Gleichung für Lackvariante P1 auf Basismaterial A bei 85 °C / 85 % relativer Luftfeuchte:

$$TTF = \frac{\ln\left(\frac{d_{LB}}{a \cdot U^2} + 1\right) \cdot d_{LB}}{k \cdot U} \quad (24)$$

Die Werte von a und k sind Tabelle 22 zu entnehmen.

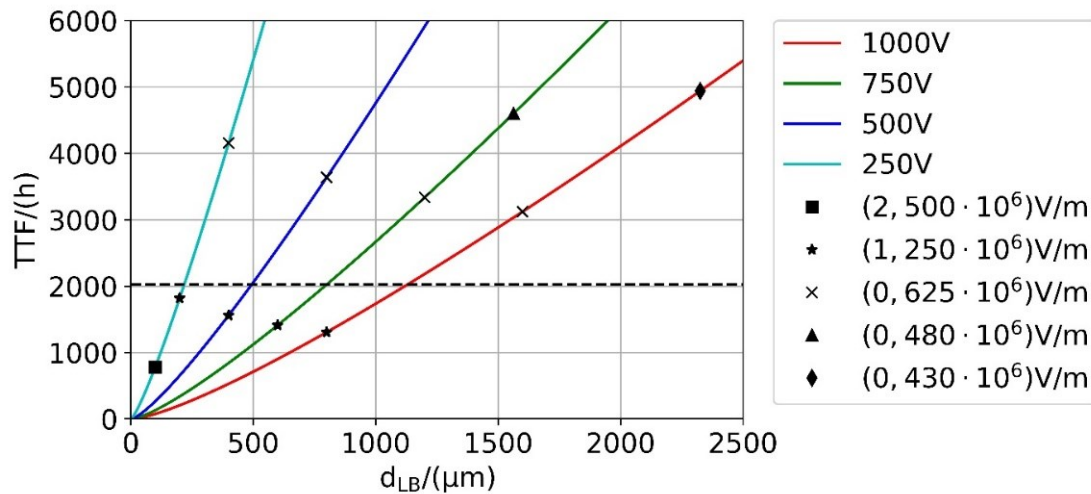


Abbildung 63: TTF in Stunden in Abhängigkeit des Leiterbahnabstands d_{LB} in μm . Die durchgezogenen Linien stellen die TTF für 1000V, 750V, 500V und 250V dar. Zusätzlich verzeichnet sind die errechneten Ausfallzeitpunkte für die in Tabelle 15 aufgeführten Leiterbahnabstände. Gleiche elektrische Feldstärken sind mit demselben Symbol gekennzeichnet, diese finden sich in der Legende. Zusätzlich verzeichnet ist als horizontale schwarz gestrichelte Linie die Testlaufzeit von 2024 Stunden der für dieses Lebensdauermodell getesteten Leiterplatten.

Abbildung 63 zeigt die TTF in Abhängigkeit des Leiterbahnabstands d_{LB} für die vier untersuchten elektrischen Spannungen 250V, 500V, 750V und 1000V. Je höher die Testspannung, desto mehr müssen die Leiterbahnabstände erweitert werden, um die TTF zu erhöhen. Deutlich zu erkennen ist, dass mit steigender Testspannung bei gleicher elektrischer Feldstärke die TTF sinkt. Die stärkere Ausprägung des AMP mit steigender elektrischer Spannung wird in Gleichung (22), welche die maximale AMP-Länge in Abhängigkeit der Testzeit, des

Leiterbahnabstands und der Spannung beschreibt, durch U^2 als Vorfaktor vor der Exponentialfunktion ausgedrückt. Da die Leiterbahngeometrien mit kleinen Abständen der Strukturen B3, C4 und D4 aufgrund anderer Phänomene als AMP ausgefallen sind, werden diese im Lebensdauermodell nicht mitbetrachtet. Damit gilt das Modell für elektrische Spannungen $U \geq 500 \text{ V}$ nicht für Feldstärken $U/d_{LB} \geq 2,5 \cdot 10^6 \text{ V/m}$.

Im Folgenden wird der Einfluss einer Spannungsverdopplung (bei konstantem elektrischen Feld) und einer elektrischen Feldverdopplung (bei konstanter elektrischer Spannung) auf die Ausfallzeit nach dem in Gleichung (24) beschriebenen Zusammenhang für die TTF ermittelt. Hierfür wird die Ausfallzeit nach der jeweiligen Verdopplung mit der Ausfallzeit einer Teststruktur $TTF(U, d_{LB})$ mit einem Leiterbahnabstand von d_{LB} und einer Spannung von U verglichen. Bei gleichbleibender elektrischer Feldstärke gilt für das Verhältnis der $TTF(2U, 2d_{LB})$ mit verdoppelter elektrischer Spannung im Vergleich zu $TTF(U, d_{LB})$:

$$\frac{TTF(2U, 2d_{LB})}{TTF(U, d_{LB})} = \frac{\ln\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{d_{LB}}{a \cdot U^2} + 1\right)}{\ln\left(\frac{d_{LB}}{a \cdot U^2} + 1\right)} = f(d_{LB}, U) \quad (25)$$

Gleichung (25) gilt für $U > 0$ und $d_{LB} > 0$, damit ergibt sich:

$$0 < f(d_{LB}, U) \leq 1 \quad (26)$$

Der Ausfallzeitpunkt einer Teststruktur nach einer Verdopplung der elektrischen Spannung $TTF(2U, 2d_{LB})$ kann somit nach Gleichung (25) und (26) in Abhängigkeit der TTF vor der Verdopplung $TTF(U, d_{LB})$ beschrieben werden als:

$$TTF(2U, 2d_{LB}) = f(d_{LB}, U) \cdot TTF(U, d_{LB}) \quad (27)$$

Für den Ausfallzeitpunkt einer Teststruktur nach einer Verdopplung der elektrischen Feldstärke bei gleichbleibender Spannung ergibt sich mit $f(d_{LB}, U)$ nach Gleichung (25) und (26):

$$TTF\left(U, \frac{1}{2}d_{LB}\right) = \frac{f(d_{LB}, U)}{2} \cdot TTF(U, d_{LB}) \quad (28)$$

Damit zeigt eine Verdopplung der elektrischen Feldstärke einen im Vergleich zu einer Verdopplung der elektrischen Spannung doppelt so großen Einfluss auf den Ausfallzeitpunkt der Teststrukturen.

6.2.6 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Ziel der Untersuchungen war es, sowohl die Ausbildung der AMP-Pfade über die Testzeit hinweg beschreiben zu können, als auch die AMP-Ausbildung in Abhängigkeit von der elektrischen Spannung und Feldstärke zu untersuchen und ein Lebensdauermodell für Leiterplatten unter hohen elektrischen Spannungen und Feuchtelast zu entwickeln. Hierfür wurden Leiterplatten mit Lötstopplack P1 auf Basismaterial A bei 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte über einen Zeitraum von 2024 Stunden mit vier verschiedenen elektrischen Spannungen (250 V, 500 V, 750 V und 1000 V) getestet. Das speziell für diese Untersuchung entwickelte Leiterplattenlayout verfügt über kreisförmige Strukturen unterschiedlicher Radien und Abstände, sodass nach Anlegen der Testspannung eine annähernd homogene elektrische Feldstärke innerhalb der kompletten Teststruktur herrscht. Elektrische Feldstärkeüberhöhungen durch Leiterbahnenden, wie sie bei den üblicherweise verwendeten Kammstrukturen auftreten, sind dadurch ausgeschlossen.

Für die statistische Auswertung der AMP-Pfade wurden mehr als 7300 AMP-Pfade in ihrer Länge vermessen und ausgewertet. Untersucht wurden die aufgenommenen AMP-Daten hinsichtlich der AMP-Dichte, also der Anzahl an AMP je 1000 µm Leiterbahnlänge, der mittleren AMP-Zahl, der AMP-Anzahlen und der Verteilung der AMP-Längen.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die AMP-Dichte mit Spannung und Feldstärke zunimmt, wobei eine hohe AMP-Dichte nicht direkt mit einem Ausfall korreliert.

Als weiteres Maß für die Betroffenheit der Leiterbahnen von AMP wurde die normierte mittlere Gesamt-AMP-Länge durch die Addition der mittleren AMP-Längen aller Zeitpunkte ermittelt. Die Auswertung der AMP-Längen zeigt deutlich, dass die Betroffenheit der Teststruktur von AMP nicht allein von der elektrischen Feldstärke, sondern auch von der elektrischen Spannung beeinflusst wird. Dabei ist durch die elektrische Feldstärke ein größerer Einfluss beobachtbar als durch die elektrische Spannung. Die Auswertung der Gesamtanzahl AMP über die Testzeit zeigt einen vergleichbaren Einfluss der elektrischen Feldstärke und der Spannung auf die AMP-Anzahl.

Die Analyse der einzelnen AMP-Längen zeigt, dass mit zunehmender Testzeit bestehende AMP-Pfade eher länger werden als dass sich neue AMP-Pfade bilden. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass zu Beginn des Tests die elektrische Feldstärke entlang der kompletten Kreisstruktur homogen verteilt ist. Erst nach einiger Zeit kommt es durch die gebildeten AMP-Pfade zu einer inhomogenen elektrischen Feldstärke und dadurch einem bevorzugten weiteren Wachstum der längeren AMP-Pfade.

Durch die Auswertung der längsten AMP-Pfade der Kreisstrukturen über die Testzeit hinweg konnte ein Lebensdauermodell für Leiterplatten, welche unter hohen elektrischen Spannungen und Feuchtelast betrieben werden, entwickelt werden.

Es beschreibt die Ausfallzeit in Abhängigkeit des Leiterbahnabstands und der elektrischen Spannung für eine vorgegebene Feuchtebedingung und Materialeigenschaft. In dieser Arbeit wurden 85 °C/85 % relative Luftfeuchte und der Lötstopplack P1 als Versuchsparameter gewählt. Eine Verdopplung der elektrischen Feldstärke bei konstanter Spannung reduziert die Ausfallzeit um den Faktor 2 im Vergleich zu einer Verdopplung der Spannung bei konstanter Feldstärke.

6.3 Untersuchung des Einflusses der Lötstopplackdicke auf das AMP

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Lötstopplackdicke auf die Intensität des anodischen Migrationsphänomens analysiert und diskutiert. Getestet wurden zwei Lötstopplacke verschiedener Hersteller auf Leiterplattenlayout L1 und L3 mit Kammstrukturen (Abschnitt 4.1 Tabelle 3), um einen Einfluss der Lackvariante auf den Effekt der Schichtdickenvariation bewerten zu können. In **Tabelle 23** sind die beiden untersuchten Lackformulierungen mit den untersuchten Parametern aufgeführt.

Tabelle 23: Die Lötstopplacke A1 und P1 unterschiedlicher Hersteller wurden herstellersistenspezifisch einmal mit Doppelbeschichtung und einmal mit höherem Lackgewicht aufgetragen.

	P1		A1	
NOMINAL-KUPFERDICKE	35 µm		18 µm	
AUFTRAGSART	Vorhanggießen		Manuell aufgerakelt	
LÖTSTOPPLACK-DICKE*	Dünn	Dick	Dünn	Dick
	(34 ± 6) µm	(57 ± 6) µm	(51 ± 4) µm	(85 ± 5) µm
HÖHERER LACK-SCHICHTAUFT-RAG	Nasslackge-wicht 3,5g/6dm²	Nasslackge-wicht 6g/6dm²	Einfachbeschich-tung	Doppelbeschich-tung
VORTROCKNEN	Für beide Lackdicken gleiche Temperatur und Dauer		Für beide Lackdicken gleiche Tem-peratur und Dauer, bei dicker Lack-schicht Vortrocknen nach der ersten und zweiten Lackschicht	
BELICHTUNG	für beide Lackdicken gleich			
	350 mJ/cm² und Wellenlängen-verhältnis von 40 % kurz mit 385 nm + 60 % lang mit 405 nm. Anschließend erfolgt eine Nach-belichtung mit 1000 mJ.		siehe Abbildung 4 in Abschnitt 2.2	
AUSHÄRTUNG	1 h25 min @ 160 °C		1 h10 min @150 °C	
UV BUMP	für beide Lackdicken gleich		für beide Lackdicken gleich	
* Die Lötstopplackdicken wurden an der unteren Leiterbahnätzkantenspitze senkrecht vom Basismaterial gemessen.				

Zusätzlich vermerkt sind die Art des Lackauftrags sowie Informationen über die Belichtung und Aushärtung des Lacks. Die einzelnen Prozessschritte können beispielhaft der Darstellung für Lacktyp X in Abbildung 4 in Abschnitt 2.2 entnommen werden. Die Lötstopplackdicke „dünn“ entspricht jeweils einer üblicherweise im späteren Produkt gewählten Schichtdicke bei 18 µm

Nominalkupferdicke. Alle Leiterplatten einer Lackvariante entstammen einer Charge und wurden wie in Abschnitt 4.3 in Tabelle 4 beschrieben, getestet. Die Leiterplatten mit Lötstopplack P1 auf Basismaterial R wurden für 1355 h mit 500 V und für 1000 h beziehungsweise 1381 h mit 1000 V getestet, die Leiterplatten mit Lötstopplack A1 auf Basismaterial A für 1480 h mit 1000 V. Während des HV-SIR-Tests wurde der elektrische Isolationswiderstand der einzelnen Kammstrukturen protokolliert. Im nächsten Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses der Lötstopplackdicke auf die Ausprägung des AMP vorgestellt und in Abschnitt 6.3.2 diskutiert und zusammengeführt.

6.3.1 Beschreibung und Analyse der Ergebnisse

Der Einfluss der Lackdicke wird anhand zweier Kriterien beurteilt, der während der Messung aufgezeichneten SIR-Kurven und der optischen Analyse der AMP-Pfade nach dem HV-SIR-Test. Zu Beginn dieses Abschnitts werden die SIR-Kurven in **Abbildung 64** für Lötstopplack A1 auf Basismaterial A und Lötstopplack P1 auf Basismaterial R vergleichend gezeigt.

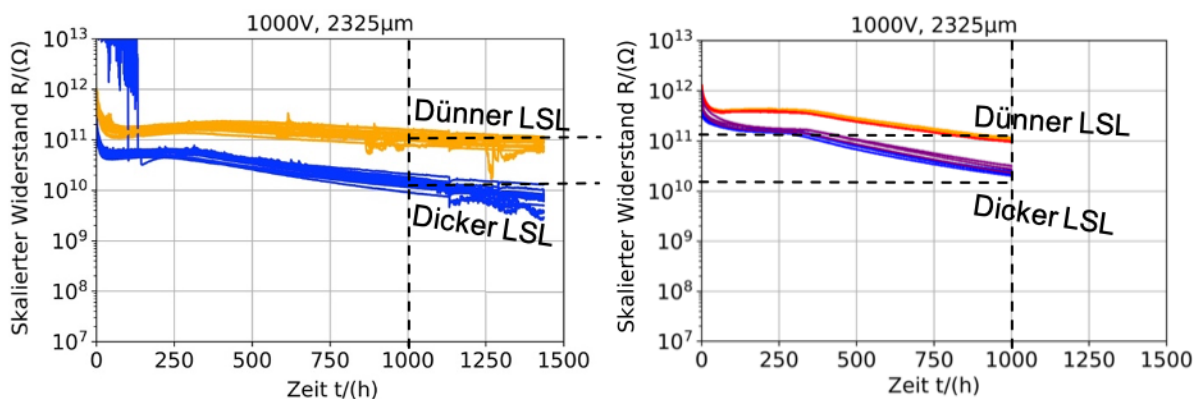


Abbildung 64: SIR-Kurven skaliert nach Abschnitt 4.3. Dargestellt ist der Isolationswiderstand der Teststrukturen in Ω über der Testzeit in h. Einzelne Messfehler des SIR-Systems sind nicht dargestellt. Beide HV-SIR-Tests wurden an Kammstrukturen mit $2325\mu\text{m}$ Leiterbahnabstand durchgeführt. Durch gestrichelte Linien ist die Testdauer von 1000 h markiert. Links: Lötstopplack P1 auf Basismaterial R. Rechts: Lötstopplack A1 auf Basismaterial A, die Legende kann Abbildung 65 entnommen werden.

In **Abbildung 65** werden die SIR-Kurven für Lötstopplack P1 auf Basismaterial R diskutiert. Für die für 1381 h mit 1000 V getesteten Leiterplatten liegen keine SIR-Kurven vor, da der verwendete Messaufbau über keine automatisierte SIR-Kurvenaufzeichnung verfügt. Die SIR-Kurvenverläufe für die ersten 1000 Stunden Testzeit können den für 1000 h mit 1000 V getesteten Leiterplatten in Abbildung 65 entnommen werden. Die Analyse der SIR-Kurven zeigt klar auf, dass der Isolationswiderstand der Kammstrukturen mit dünnem Lötstopplack bei einer Testzeit von 1000 h unabhängig von der Testspannung, dem Leiterbahnabstand, der Leiterbahndicke, der Auftragungsart und dem Leiterplattenmaterial immer etwa um den Faktor 5 bis 10 höher liegt als der des dicken Lötstopplacks. Über die

komplette Testdauer verlaufen die SIR-Kurven des dicken und dünnen Lötstopplacks annähernd parallel zueinander. Sowohl beim dünnen als auch beim dicken Lötstopplack nimmt der Isolationswiderstand der Teststrukturen nach 1000 h Testzeit etwa um den Faktor 10 ab.

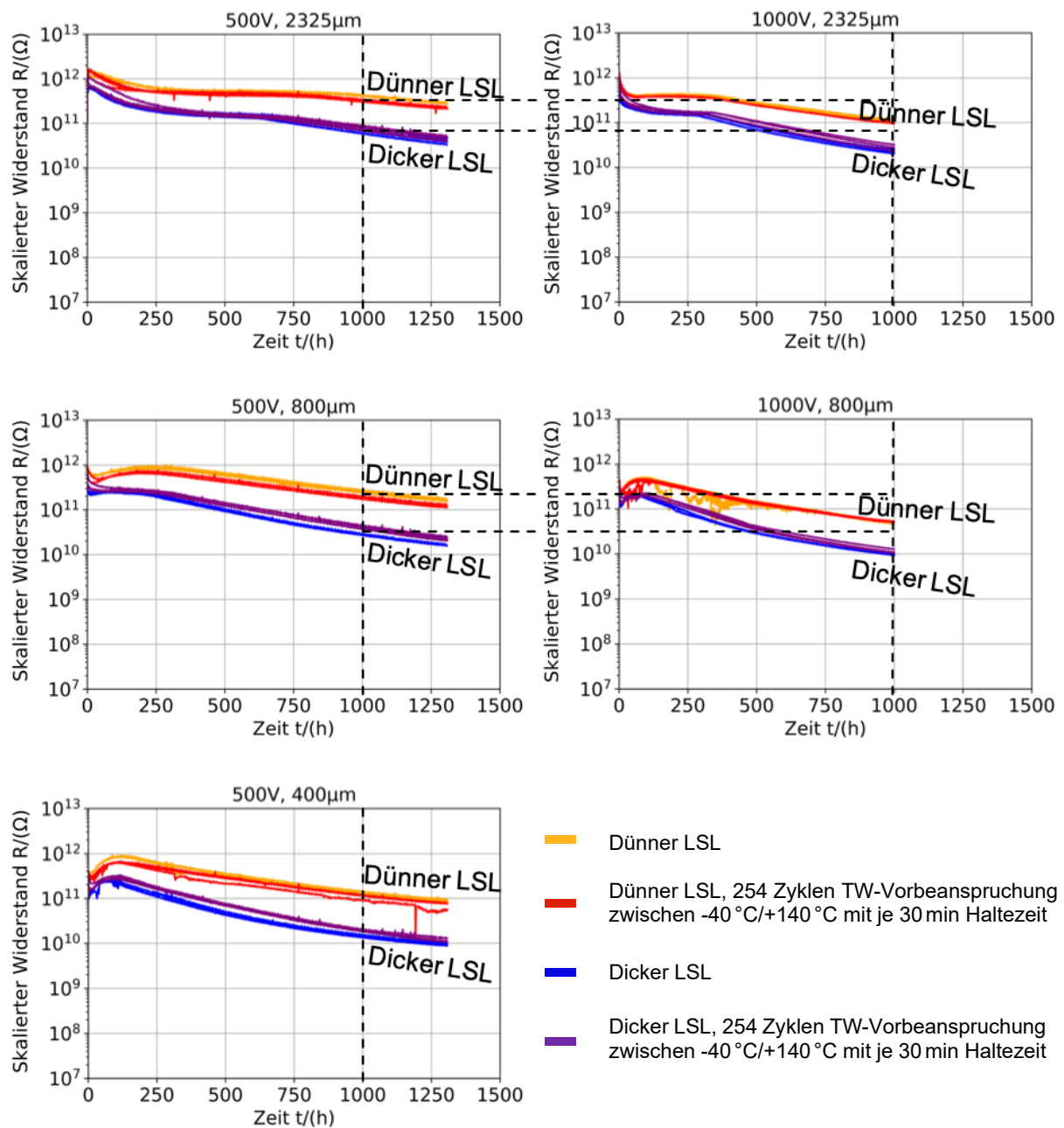


Abbildung 65: SIR-Kurven skaliert nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 von Lötstopplack P1 auf Basismaterial R. Dargestellt ist der Isolationswiderstand der Teststrukturen in Ω über der Testzeit in h. Einzelne Messfehler des SIR-Systems sind nicht dargestellt. Durch gestrichelte Linien sind die Testdauer von 1000 h und die dazugehörigen SIR-Werte markiert. Links: Die drei für 1355 h mit 500 V getesteten Leiterbahnabstände 400 μm , 800 μm und 2325 μm . Rechts: Die beiden für 1000 h mit 1000 V getesteten Leiterbahnabstände 800 μm und 2325 μm .




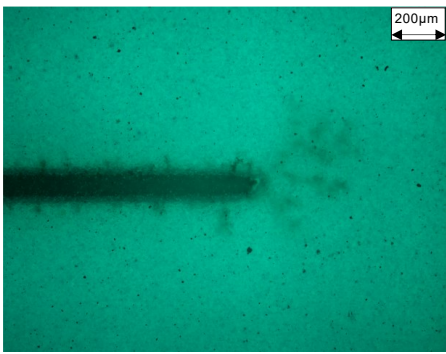
U	d_{LB}	DICKER LSL	DÜNNER LSL
1000 V	2325 μm		
			

Abbildung 66: Typische AMP-Pfade bei Kammstrukturen mit Lackvariante A1 auf Basismaterial A mit 2325 μm Leiterbahnabstand, getestet für 1480 h mit 1000 V, aufgenommen mit dem Lichtmikroskop im DF-Modus (oben) und UV-Modus (unten) senkrecht zur Leiterplattenoberfläche.

Abbildung 66 zeigt typische AMP-Pfade von Leiterplatten mit Lackvariante A1 auf Basismaterial A, bei welchen der Lötstopplack 1 h bei 150 °C eingebrannt, normal belichtet und kein UV-Bump verwendet wurde. In **Abbildung 67** sind typische AMP-Pfade dargestellt, die bei Leiterplatten mit Lackvariante P1 auf Basismaterial R aufgetreten sind.

Deutlich zu erkennen ist, dass das AMP unabhängig von der Lackvariante bei der dickeren Lackschicht deutlich intensivere AMP-Pfade auftreten, als bei der dünnen Lackschicht. Eine stärkere Ausprägung des AMP-Wachstums äußert sich durch längere Migrationspfade, sowie durch verstärktes Wachstum von AMP-Pfaden zwischen den Leiterbahnen, also an Orten, an denen die elektrische Feldstärke geringer ist als an der Kammspitze. Zusätzlich kann bei den dünn aufgetragenen Lackschichten mit Lack P1 im Gegensatz zu A1 oxidiertes Material, Cu_2O , auf der Leiterbahnschleife oberhalb des Lötstopplacks detektiert werden (detaillierte Materialanalysen werden in Abschnitt 6.1. aufgeführt).

Die intensiveren AMP-Pfade der Leiterplatten mit dickem Lötstopplack werden ebenfalls deutlich sichtbar in den Querschliffanalysen der AMP-Pfade. Auch sichtbar wird die Oxidation der Kupferleiterbahn an der Leiterbahnoberfläche bei dünn aufgetragenem Lack P1. Die Querschliffbilder sind in **Abbildung 68**, **Abbildung 69** und **Abbildung 70** sowie **Abbildung 45** und **Abbildung 46** in Abschnitt 6.1.2 gezeigt (Simulationsergebnisse in Abschnitt 5.3.1).

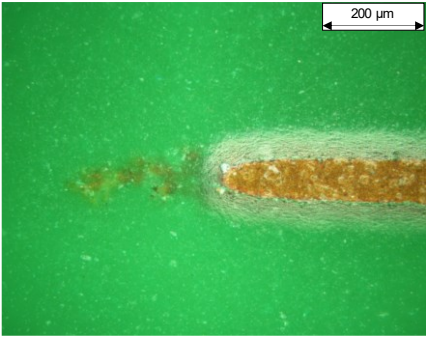

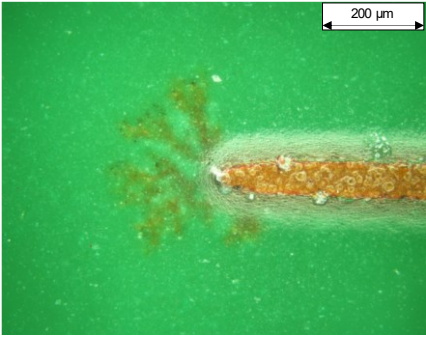
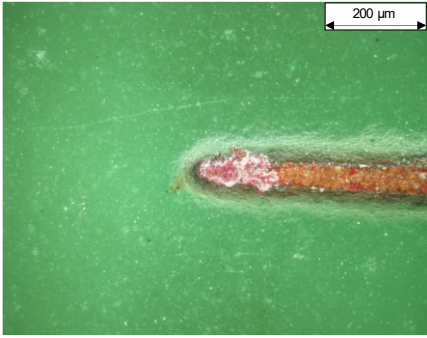


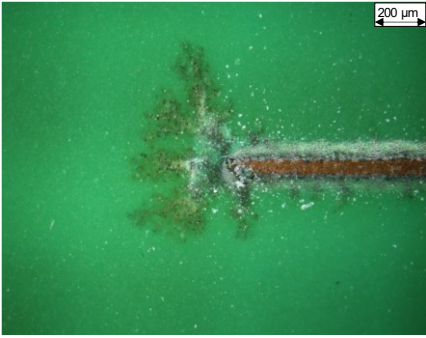

U	d_{LB}	DICKER LSL	DÜNNER LSL
500 V	800 μm		
	2325 μm		
1000 V	800 μm		
	2325 μm		

Abbildung 67: Typische AMP-Pfade bei Kammstrukturen mit Lackvariante P1 auf Basismaterial R mit 800 μm und 2325 μm Leiterbahnabstand, getestet bei 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte für vergleichbare Zeiten mit 500 V, beziehungsweise 1000 V, aufgenommen mit dem Lichtmikroskop im DF-Modus senkrecht zur Leiterplattenoberfläche. Typische AMP-Pfade bei Kammstrukturen mit 400 μm Leiterbahnabstand, getestet mit 500 V, finden sich in Abbildung 43 und Abbildung 45 in Abschnitt 6.1.2.

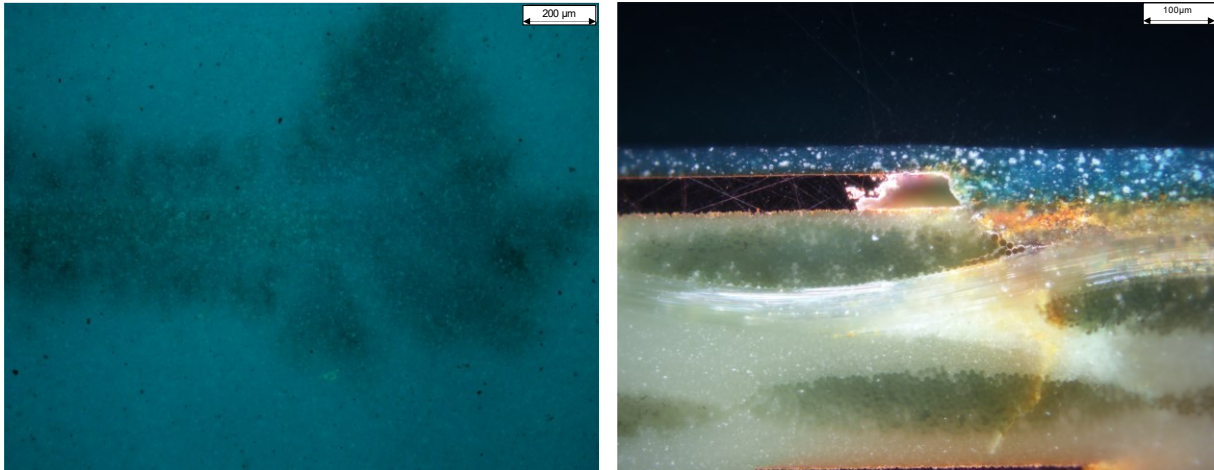


Abbildung 68: Typische anodische Kammspitze ($d_{LB} = 2325 \mu\text{m}$, LSL A1, dick aufgetragen, BM A, getestet für 1480 h mit 1000 V bei 85 °C / 85 % relativer Luftfeuchte).
Links: Mit dem Lichtmikroskop senkrecht zur Leiterplattenoberfläche im UV- Modus aufgenommen.
Rechts: Querschliff des AMP links, aufgenommen mit dem Lichtmikroskop im DF- Modus.

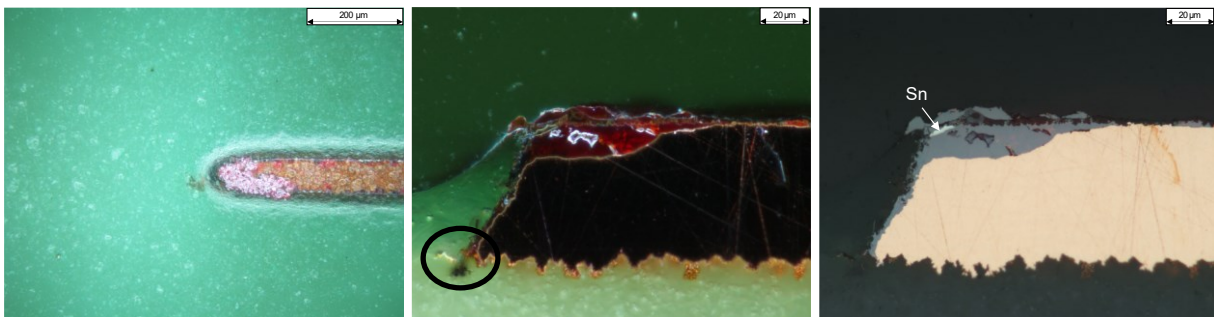


Abbildung 69: Typische anodische Kammspitze ($d_{LB} = 400 \mu\text{m}$, LSL P1, dünn aufgetragen, BM R, getestet für 1355 h mit 500 V bei 85 °C / 85 % relativer Luftfeuchte).
Links: Aufgenommen mit dem Lichtmikroskop im DF-Modus senkrecht zur Leiterplattenoberfläche. Rechts und Mitte: Querschliff der links gezeigten Anodenspitze aufgenommen mit dem Lichtmikroskop im DF-Modus (Mitte) und im BF-Modus (Rechts). Schwarz umkreist: AMP-Pfad an der LSL-BM-Grenze. Rechts markiert: weiß erscheinender Bereich (Sn) im oxidierten Kupfer.

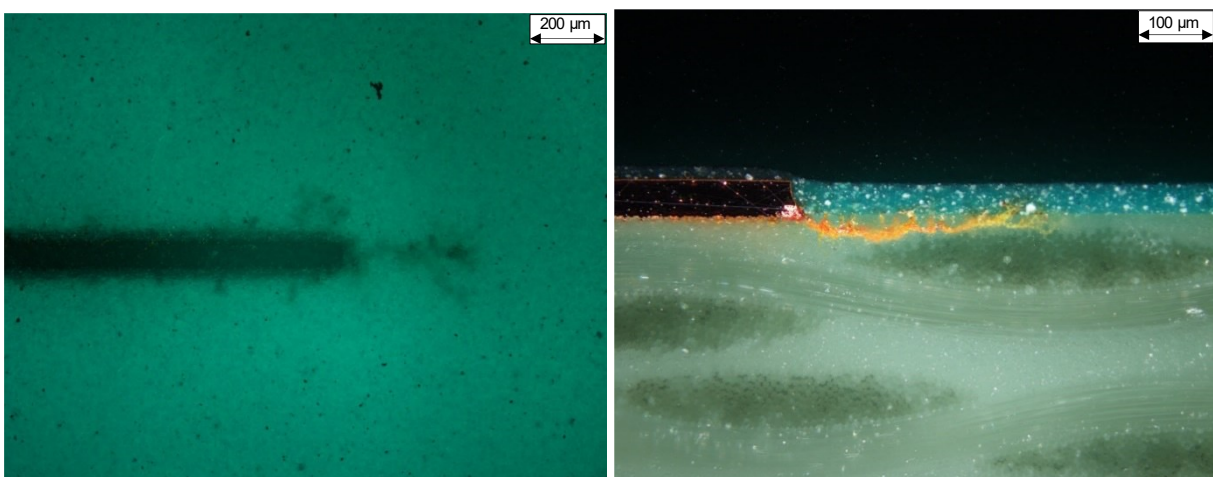


Abbildung 70: Typische anodische Kammspitze ($d_{LB} = 2325 \mu\text{m}$, LSL A1, dünn aufgetragen, BM A, getestet für 1480 h mit 1000 V bei 85 °C / 85 % relativer Luftfeuchte).
Links: Mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus senkrecht zur Leiterplattenoberfläche aufgenommen.
Rechts: Querschliff des AMP links, aufgenommen mit dem Lichtmikroskop im DF-Modus.

Die Analyse der AMP-Pfade mit dem REM-EDX bei Lackvariante A1 und P1 zeigen die Elemente Kupfer, Sauerstoff und Chlor entlang des AMP-Pfads auf, sowie punktuell eine erhöhte Schwefelkonzentration. Dies und die orangene Färbung der AMP-Pfade bei der Analyse der Querschliffbilder mit dem Lichtmikroskop weisen auf Cu_2O als das migrierende Material hin (Details in Abschnitt 6.1).

Auffällig bei der doppelt aufgetragenen Lackvariante A1 im Vergleich zu P1 ist, dass diese zu einer massiven Auflösung der anodischen Leiterbahnspitze während dem HV-SIR-Test führt. Dies kann den mit dem Lichtmikroskop aufgenommenen Bildern des Querschliffs der Leiterbahn in Abbildung 70 und Abbildung 68 entnommen werden. Dort ist deutlich zu erkennen, dass das Kupfer der Anodenspitze, die mit dickem Lötstopplack bedeckt ist, im Vergleich zur Leiterplatte mit dünner aufgetragenem Lötstopplack vollständig in den Lötstopplack und das Basismaterial der Leiterplatte migriert ist. Ein direkter Vergleich der Intensität des AMP bei Lackvariante A1 und P1 ist nicht möglich, da die getesteten Leiterplatten stark unterschiedliche Lackschichtdicken aufweisen, siehe auch Tabelle 23.

Im Nachfolgenden wird die Ursache der Oxidation der Kupferleiterbahn an der Leiterbahnoberfläche bei dünn aufgetragenem Lötstopplack P1 diskutiert.

Provoziert wird dieser Effekt durch den Auftrag der üblicherweise gewählten Lackschichtdicke für $18\mu\text{m}$ Nominalkupferdicke auf einer dickeren Kupferleiterbahn mit $35\mu\text{m}$ Nominalkupferdicke. Dies führt zum Abreißen der Lackschicht an der Leiterbahnkante und insbesondere an der Leiterbahnspitze.

Deutlich erkennbar sind die Lötstopplackabrisse an der Leiterbahnspitze bei der Betrachtung des Querschliffs einer beispielhaften anodischen Leiterbahn mit dünn aufgetragenem Lötstopplack P1 in Abbildung 69. Die REM-EDX-Analyse der oxidierten Leiterbahnspitzen zeigt Zinn auf den Kupferleiterbahnen an. Dieses resultiert aus dem Chemisch-Zinn-Prozess in der Leiterplattenproduktion, wenn unzureichend abgedeckte Kupferbereiche vorliegen.

Um herauszufinden, ob das AMP bei der dünn aufgetragenen Lackvariante P1 durch die vermehrte oberflächliche Oxidation der Leiterbahn kürzer ausfällt als bei dickem Lack, wurde bei Lackvariante A1 die dünnere Nominalkupferdicke von $18\mu\text{m}$ gewählt. Der Lötstopplack wurde anschließend einfach, sowie doppelt auf die Leiterplatte aufgetragen. Die bei den Leiterplatten mit Lackvariante A1 und P1 erreichten Schichtdicken der dicken und dünnen Beschichtungsarten können Tabelle 23 entnommen werden.

Wie bereits bei Lackvariante P1 kann auch bei Lackvariante A1 in Abbildung 66 beobachtet werden, dass das AMP bei Leiterplatten mit dickem Lötstopplack verstärkt auftritt. Durch die dünnere Nominalkupferdicke der Kupferleiterbahnen liegen hier keine unabgedeckten Kupferbereiche vor und es wird lediglich AMP und kein oxidiertes Material auf dem Lötstopplack detektiert. Eine Verminderung der Intensität des AMP durch Oxidation der Leiterbahn an der Leiterbahnoberfläche kann damit ausgeschlossen werden.

6.3.2 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Durch die Variation der Lackdicke beispielhaft für Lackvariante A1 und P1 konnte nachgewiesen werden, dass das AMP bei Leiterplatten mit hoher Lackdicke ausgeprägter auftritt. Dies zeigt sich durch die Länge der AMP-Pfade sowie der Menge an migrierendem Material. Auch konnte gezeigt werden, dass anodische Leiterbahnen zusätzlich zu AMP auch an der Leiterbahnoberfläche der Leiterbahnspitze oxidieren können, wenn diese unzureichend mit Lötstopplack abgedeckt sind.

Die SIR-Werte von Leiterplatten mit dickerer Lackschicht fallen über die komplette Testzeit hin geringer aus als von Leiterplatten mit dünnerer Lackschicht. Diese Beobachtung lässt sich durch mehrere Umstände erklären:

Zuallererst verteilt sich der durch das isolierende Material fließende Strom über eine größere Querschnittsfläche, wodurch der elektrische Isolationswiderstand des dickeren Lacks geringer ausfällt als der des dünnen Lacks. Hinzu kommt, dass in Abschnitt 2.3.2 beispielhaft für Lackvariante A1 nachgewiesen wurde, dass dickerer Lack über eine höhere Feuchtaufnahme prozentual zum Ursprungsgewicht verfügt als dünnerer Lack. Diese Eigenschaft sorgt in der Folge dafür, dass der Leitwert des Lacks weiter gesteigert wird, wodurch sich leitfähige Pfade besser ausbilden können, was das AMP-Wachstum verstärkt.

Die in Abschnitt 5.3 über die Methode der Teilentladungsmessungen analysierte elektrische Alterung des Lötstopplacks zeigt weitergehend, dass dickerer Lack stärker von elektrischen Alterungseffekten betroffen ist als dünner Lötstopplack, was die Isolationsfähigkeit von Lötstopplacken mit dicker Lackschicht weiter verringert. Die verschiedenen Eigenschaften von dünnem und dickem Lötstopplack werden tiefergehend in Abschnitt 5.4 diskutiert.

Hinzu kommt, wie in Abschnitt 5.1 gezeigt, dass dünnerer Lack bei gleicher Prozessierung über eine höhere Glasübergangstemperatur verfügt als dickerer Lack. Dies führt, wie im SIR-Handbuch [39] beschrieben, durch den höheren Vernetzungsgrad des dünneren Lacks zu höheren SIR-Werten.

6.4 Untersuchung des Einflusses der Lötstopplackaushärtung und TW-Vorbeanspruchung auf das AMP

In Abschnitt 6.4.1 werden die Ergebnisse der Untersuchung von Temperaturwechseln auf den gemessenen SIR-Wert der Kammstrukturen und die Intensität des AMP vorgestellt. Abschnitt 6.4.2 beschreibt die Auswirkungen einer Veränderung der Aushärtetemperatur auf die Intensität des AMP und den gemessenen SIR-Wert der getesteten Leiterplattenstrukturen.

6.4.1 Einfluss von Temperaturwechseln auf den SIR-Wert und das AMP

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Untersuchung des Einflusses von Temperaturwechseln zusätzlich zur Vorbeanspruchung durch den Reflowprozess auf die Intensität des anodischen Migrationsphänomens vorgestellt. Der Test wurde mit dem Leiterplattenlayout L1 auf Basismaterial R mit Lötstopplack P1 mit unterschiedlichem Lackgewicht durchgeführt. Details zum Leiterplattenlayout und den durchgeführten HV-SIR-Tests und Vorbeanspruchungen können Tabelle 3 und Tabelle 4 entnommen werden. Nach dreimaliger Vorbeanspruchung durch einen Reflowprozess wurde die Hälfte der Testleiterplatten für 254 Zyklen Temperaturwechseln (TW) zwischen -40°C und $+140^{\circ}\text{C}$ mit einer Haltezeit von 30 Minuten je Temperatur ausgesetzt. Anschließend wurden sie für 1355 h mit 500 V (Leiterbahnabstand $400\text{ }\mu\text{m}$, $800\text{ }\mu\text{m}$ und $2325\text{ }\mu\text{m}$) und für 1381 h und 1000 h mit 1000 V (Leiterbahnabstand $800\text{ }\mu\text{m}$ und $2325\text{ }\mu\text{m}$) getestet.

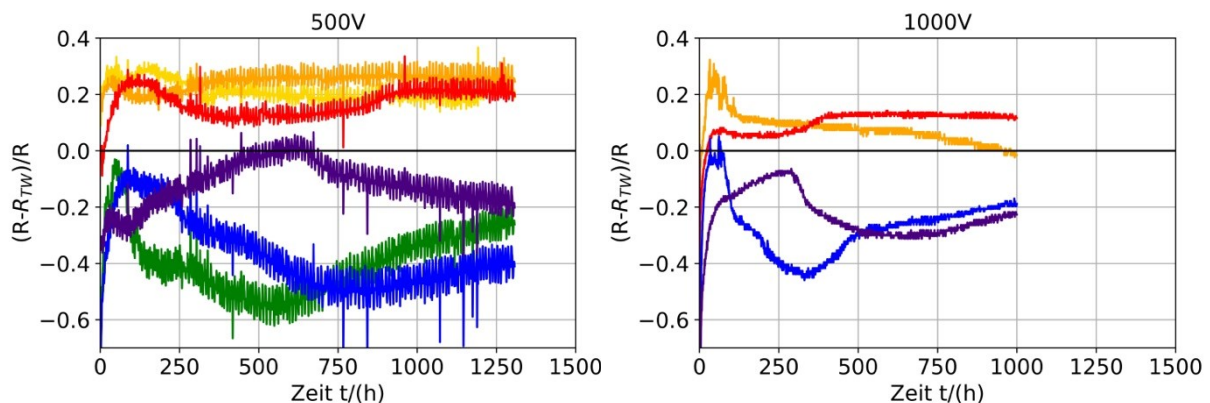


Abbildung 71: $(R - R_{TW})/R$ in Abhängigkeit der Testzeit in Stunden. R stellt den Isolationswiderstand einer Teststruktur ohne zusätzliche Vorbeanspruchung durch TW dar, R_{TW} den Isolationswiderstand einer Teststruktur, zusätzlich vorgealtert mit Temperaturwechseln. Gelb, orange, rot: Dünner Lötstopplack. Grün, blau, lila: Dicker Lötstopplack. Gelb, grün: $400\text{ }\mu\text{m}$ Leiterbahnabstand. Orange, blau: $800\text{ }\mu\text{m}$ Leiterbahnabstand. Rot, lila: $2325\text{ }\mu\text{m}$ Leiterbahnabstand.

In Abschnitt 6.3 in Abbildung 65 sind die während des Tests aufgezeichneten und nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 skalierten SIR-Kurven dargestellt. Unabhängig von der Lackdicke ist ein Unterschied im aufgezeichneten SIR-Wert von Leiterplatten zu erkennen, die vor dem HV-SIR-Test lediglich mit einem Reflowprofil beaufschlagt wurden und derer die zusätzlichen

Temperaturwechseln (TW) ausgesetzt waren. In **Abbildung 71** ist die auf den Isolationswiderstand R normierte Differenz $R - R_{TW}$ über der Testzeit in Stunden aufgetragen. R_{TW} stellt den Isolationswiderstand der Teststruktur von Leiterplatten dar, die vor dem HV-SIR-Test zusätzlichen Temperaturwechseln ausgesetzt waren.

Für die Auswertung wurden die Messkurven gleichartiger Teststrukturen gemittelt. Gleichartig sind Messergebnisse, die bei demselben Leiterbahnabstand, derselben Vorbeanspruchung, Lackdicke und Testspannung erzeugt wurden. Im vorliegenden Fall wurde also über jeweils drei gleichartige Messkurven gemittelt. Lediglich bei der 800 μm mit 1000 V getesteten Struktur bei Leiterplatten mit dünnem Lötstopplack ohne TW wurden aufgrund von Messfehlern nur zwei Kurvenverläufe gemittelt.

Bei dünnem Lötstopplack zeigen die Testmuster, die TW unterzogen wurden, niedrigere Werte als die Vergleichsmuster ohne TW. Bei dickem Lötstopplack verhält es sich genau umgekehrt. Teile mit TW-Vorbeanspruchung zeigen höhere Isolationswiderstände als die Vergleichsmuster. Die Auswertung in **Abbildung 71** zeigt durchgängig positive Werte von $(R - R_{TW})/R$ für Leiterplatten mit dünn aufgetragenem Lötstopplack, unabhängig von Testzeit, Leiterbahnabstand und Testspannung. Bei Leiterplatten mit dick aufgetragenem Lötstopplack werden durchgängig negative Werte von $(R - R_{TW})/R$ erreicht. Bei dünnem Lötstopplack zeigen die Testmuster, die TW unterzogen wurden, damit niedrigere Werte als die Vergleichsmuster ohne TW. Bei dickem Lötstopplack verhält es sich genau umgekehrt. Teile mit TW-Vorbeanspruchung zeigen höhere Widerstandswerte als die Vergleichsmuster. Insgesamt führt die zusätzliche Temperaturwechselbelastung bei allen Kammstrukturen zu einer Veränderung des Isolationswiderstand um maximal 50 %.

Ein direkter Einfluss auf die Intensität des anodischen Migrationsphänomens wurde nicht festgestellt. Dies ist wahrscheinlich auf den nur geringen Unterschied der elektrischen Isolationswiderstände bei den unterschiedlich vorgealterten Strukturen zurückzuführen. Typische AMP-Pfade der verschiedenen Leiterbahnabstände und Testspannungen für Leiterplatten mit und ohne zusätzlichen TW können **Abbildung 67** und **Abbildung 66** in Abschnitt 6.3 entnommen werden.

Die Ursachen eines höheren SIR-Werts der Leiterplatten mit dickem Lötstopplack und des niedrigeren SIR-Wert bei dünnem Lötstopplack durch zusätzliche TW-Vorbeanspruchung der Leiterplatte werden nachfolgend diskutiert.

Nach dem Lötstopplackauftrag und dem Belichten wird sowohl der dicke als auch der dünne Lack P1 für 85 Minuten bei 160 °C eingebrannt. Durch die gewählten 254 Temperaturzyklen werden die Leiterplatten mit zusätzlicher TW-Vorbeanspruchung für weitere 127 Stunden 140 °C ausgesetzt, einer Temperatur, die sehr nahe der üblichen Aushärtetemperatur von Lötstopplack A1 liegt. Die Analyseergebnisse unterstützen die bereits in Kapitel V und Abschnitt

6.3 beschriebenen Beobachtungen, dass dick aufgetragener Lötstopplack, der mit den gleichen Parametern belichtet und ausgehärtet wurde wie dünner Lötstopplack, andere Lackeigenschaften aufweist. Die in Abschnitt 6.3 aufgestellten Thesen, dass der dicke Lötstopplack im Volumen unvollständig belichtet wurde, werden durch die Analyse des Einflusses von TW auf den SIR-Wert dahingehend unterstützt, dass der elektrische Isolationswiderstand der Teststrukturen durch TW höher ausfällt. Ein höherer SIR-Wert wird auch im SIR-Handbuch [39] mit einem höheren Vernetzungsgrad verknüpft. Es ist denkbar, dass sich die polymerisierbare Doppelbindung der Acrylgruppe nicht nur unter dem Einfluss der radikalisierten Photoinitiatoren aufspaltet, sondern auch durch zusätzliche Temperierung von 127 h bei 140 °C während der Temperaturwechsel. Dadurch vernetzt sich der Lack weitergehend, das Polymernetzwerk verdichtet sich und auch weniger polare Gruppen treten auf. Dies erklärt den höheren SIR-Wert nach zusätzlichen TW, da der stärker vernetzte Lack so weniger Feuchte aufnehmen kann.

Beim dünnen Lack zeigt sich ein gegenteiliger Effekt, hier wird der elektrische Isolationswiderstand der Kammstrukturen, die zusätzlichen TW ausgesetzt waren, verringert. Aufgrund der bereits während der Belichtung und Aushärtung vollständig vernetzten Lackstruktur führen die Temperaturschocks in diesem Fall zu Mikrorissen in der Lötstopplackmaske. Dadurch kann Feuchtigkeit vermehrt aufgenommen werden und der SIR-Wert wird verringert.

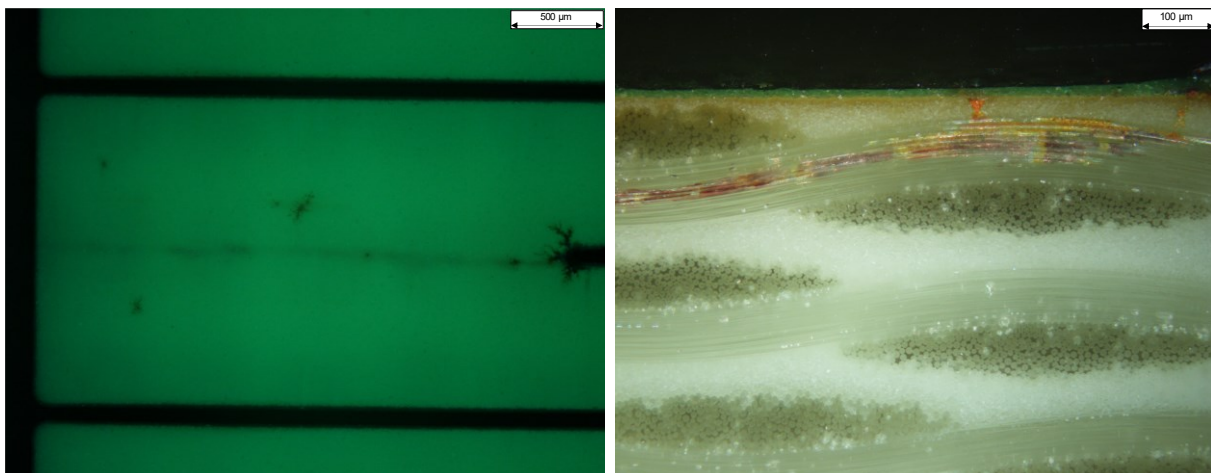


Abbildung 72: Anodische Migration entlang der Glasfasern im Basismaterial der Leiterplatte mit dünner Lötstopplackmaske, die mit 254 TW zwischen -40 °C und 140 °C mit einer Haltezeit von je 30 Minuten vorgealtert wurde. Links: Aufsicht auf die anodische Leiterbahnspitze der Leiterplatte mit dem Mikroskop im UV Modus Rechts: Horizontaler Querschnitt durch das Migrationsphänomen entlang der Leiterbahn im DF Modus des Lichtmikroskops. Die anodische Migration im Basismaterial beginnt an der rechten Bildseite.

Ein zusätzlicher Effekt, der unabhängig von der Lackdicke bei Leiterplatten mit TW-Vorbeanspruchung und einer Testspannung von 1000V nach 1381 Stunden beobachtet werden konnte, ist ein Migrationseffekt entlang der Glasfasern im Basismaterial, beispielhaft dargestellt in **Abbildung 72**. Es konnte keine direkte Korrelation der Länge des Migrationspfads mit den beiden untersuchten Leiterbahnabständen (800 µm und 2325 µm) nachgewiesen werden.

Bei Leiterplatten aus derselben Charge, die mit 500 V Testspannung für 1355 Stunden getestet wurden, konnte dieser Effekt nicht festgestellt werden.

Es ist anzunehmen, dass die zusätzliche Vorbeanspruchung der Leiterplatten mit Temperaturzyklen die Haftung der Glasfasern mit dem umgebenden Epoxid verringert hat. Als Folge dieser Schwächung bildet sich entlang der Glasfasern ein Migrationspfad aus, der ein CAF-Effekt sein kann [58] [88]. Dieser Pfad bildet sich erst nach langen Testzeiten aus. Leiterplatten, welche 1000 h im HV-SIR-Test waren, zeigen diesen Effekt deutlich weniger häufig und mit geringerer Pfadlänge als Leiterplatten, welche 1381 h im Test waren.

6.4.2 Einfluss der Lötstopplackaushärtung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Aushärtevariation des Lötstopplacks A1 vorgestellt. In der Versuchsreihe wurde der Einfluss des Zeitpunkts der Durchführung eines UV-Bumps, sowie der Einfluss unterschiedlicher Aushärtetemperaturen bei dickem und dünnem Lötstopplack untersucht, Details siehe Abschnitt 6.3. und **Tabelle 24**. In **Abbildung 73** sind die während des HV-SIR-Tests aufgezeichneten und nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 skalierten Isolationswiderstände dargestellt.

Deutlich zu erkennen ist, dass die Aushärtevariation keinen sichtbaren Einfluss auf den gemessenen SIR-Wert, unabhängig von der Lackdicke aufweist. Diese Beobachtung deckt sich mit den Analyseergebnissen der AMP-Pfade. Auch hier konnte kein direkter Einfluss der vorgenommenen Aushärtevariation auf das Erscheinungsbild und die Intensität des AMP nachgewiesen werden. Damit haben weder der Zeitpunkt des UV-Bumps, noch die Aushärtetemperatur von 150 °C +/- 10 °C einen Einfluss auf die Intensität des AMP und den SIR-Wert und somit vermutlich auch nicht auf die Vernetzung des Lacks und seine Feuchteaufnahme.

Nach Abschnitt 6.4.1 ist stattdessen lediglich die Veränderung der Dauer der thermischen Aushärtung sowie nach Abschnitt 5.4 die Veränderung der UV-Intensität für eine Änderung der AMP-Intensität und Feuchteaufnahme verantwortlich.

Tabelle 24: Aushärtevariation von Lack A1. Bei allen Varianten wurde der Lack wie in Abbildung 4 in Abschnitt 2.2 beschrieben, belichtet.

LACKAUSHÄRTUNG		NAME
EINFLUSS DER EINBRENN-TEMPERATUR	1 h bei 140 °C Einbrennen, kein UV Bump	A5/B5
	1 h bei 150 °C Einbrennen, kein UV Bump	A1/B1
	1 h bei 160 °C Einbrennen, kein UV Bump	A6/B6
EINFLUSS EINES ZUSÄTZLICHEN UV-BUMPS	1 h bei 150 °C Einbrennen, UV Bump vor Einbrennen	A2/B2
	1 h bei 150 °C Einbrennen, UV Bump nach Einbrennen	A3/B3
	1 h bei 150 °C Einbrennen, Lack UV Bump vor + nach Einbrennen	A4/B4

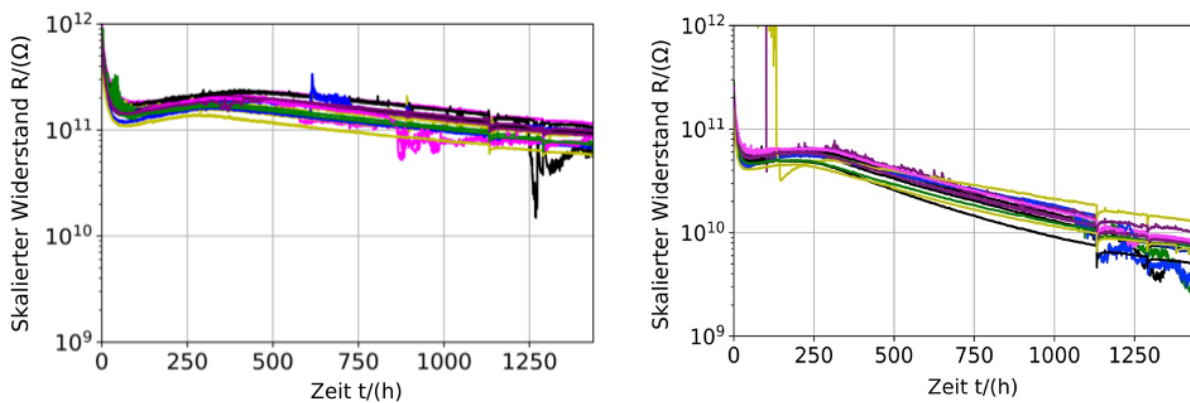


Abbildung 73: Nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 skalierte SIR-Kurven für Leiterplattenlayout L3 mit Lötstopplack A1 auf Basismaterial A. A1/B1 (schwarz), A2/B2 (blau), A3/B3 (grün), A4/B4 (gelb), A5/B5 (lila), A6/B6 (pink). Der Leiterbahnabstand liegt bei 2325 µm, die Testspannung bei 1000 V. Links: Einfachbeschichtung. Rechts: Doppelbeschichtung.

6.5 Untersuchung des Einflusses der Rezeptur des Lötstopplacks auf das AMP

Die Eigenschaften eines Lötstopplacks werden je nach Anwendungsfall maßgeschneidert. Dies geschieht über die verwendeten Harze, die Art und Menge ihrer funktionalen Gruppen, die der Lackformulierung beigegebenen Additive (Beispiele hierfür sind das Dispergiermittel, Mattierungsmittel, Entschäumer und weitere, die beispielsweise den Werken [14] [15] [18] entnommen werden können), die Art und Menge der Photoinitiatoren, des Beschleunigers, der Füllstoffe, der Prozessierung der Lacke und viele weitere Parameter. Über die genaue chemische Formulierung von Lötstopplacken ist wenig publiziert. In Abschnitt 6.5.1 werden die Ergebnisse von AMP-Voruntersuchungen an verschiedenen Lacken vorgestellt. Anschließend wird der Einfluss einzelner Lackinhaltsstoffe am Beispiel von Lack A1 auf das AMP diskutiert und ein Wirkmodell aufgestellt.




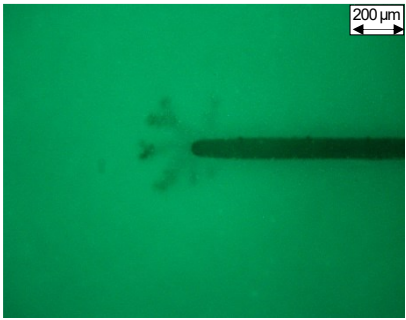



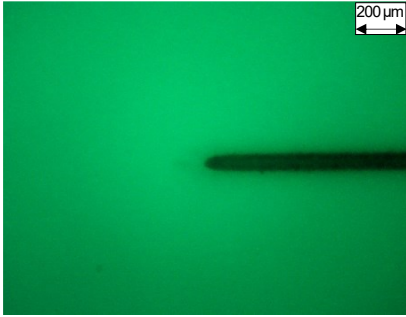
6.5.1 Voruntersuchungen des Einflusses verschiedener Lacke auf das AMP

Um den Einfluss unterschiedlicher Lötstopplacke auf die Intensität und Ausprägung des AMP zu untersuchen, wurde Leiterplattenlayout L2 mit unterschiedlichen Lötstopplacken A1, T1, TX1 und PX1 auf Basismaterial A getestet. Alle Leiterplatten entstammen einer Charge und haben nach der Beschichtung und Aushärtung einen Chemisch-Zinn-Prozess durchlaufen. Als Teststrukturen wurden Kammstrukturen mit Leiterbahnabständen von 2325 µm nach der IPC221 für 1000 V Testspannung verwendet (Details in Kapitel IV in Tabelle 3 und Tabelle 4). Die Leiterplatten wurden in einem Testdurchlauf für 1000 h bis 1500 h bei 85 °C / 85 % relativer Luftfeuchte getestet. Über den kompletten Testdurchlauf hinweg wurden die elektrischen Isolationswiderstände der Teststrukturen gemessen.

In **Tabelle 25** sind die typischen AMP-Pfade der verschiedenen Lötstopplacke abgebildet, die sich nach dem Hochvolt-SIR-Test zeigen. Es wird deutlich, dass die Ausprägung und Intensität des AMP, bewertet durch Anzahl und Länge an der Leiterbahnspitze und zwischen den Leiterbahnen, sich zwischen den Lacken deutlich unterscheidet. Für Vergleichszwecke wird die Intensität des AMP durch + bis +++ gekennzeichnet. Besonders ausgeprägt ist sie bei Lackvariante A1, da hier im Vergleich zu den anderen Lackvarianten AMP an der Leiterbahnspitze und auch die meisten AMP zwischen den Leiterbahnen beobachtet wurden.

Die Analyse der AMP-Pfade im Querschliff zeigt für alle Lackvarianten einen orange-rot gefärbten AMP-Pfad, wie bereits in Abschnitt 6.1 beschrieben. Bei Lackvariante T1 und TX1 wurden AMP-Pfade, welche sich hauptsächlich im Lötstopplack und an der Lötstopplack-Basismaterialgrenze ausgebildet haben, nachgewiesen. Auch bei Lackvariante A1 befand sich der AMP-Pfad bei den meisten untersuchten Leiterbahnspitzen vollständig im Lötstopplack und an der Lötstopplack-Basismaterialgrenze. Lediglich bei Lackvariante PX1 konnten AMP-Pfade, die sich teilweise im Lötstopplack und Basismaterial ausbilden, nachgewiesen werden.

Tabelle 25: Anodische Leiterbahnspitzen mit AMP nach dem HV-SIR-Test für 1500h von Lackvariante A1, TX1, T1 und PX1. Die Aufnahmen wurden mit dem Lichtmikroskop senkrecht zur Leiterplattenoberfläche aufgenommen. Links: mit Normallicht, Rechts: mit UV-Filter. Zusätzlich verzeichnet ist die Intensität „I“ des AMP.

LSL	TYPISCHE ANODISCHE MIGRATIONSPFADE		I
A1			+++
TX1			++
T1			+
PX1			+

Die während des HV-SIR-Tests aufgenommenen und nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 skalierten Isolationswiderstände der Teststrukturen können **Abbildung 74** entnommen werden. Die Kammstrukturen mit unterschiedlichen Lötstopplacken zeigen klar voneinander unterscheidbare Isolationswiderstände. Der direkte Vergleich der Intensität des anodischen Migra-

tionsphänomens an den Leiterbahnsitzen in Tabelle 25 und den gemessenen Isolationswiderständen in Abbildung 74 zeigt, dass die AMP-Intensität nicht direkt mit dem gemessenen SIR-Wert korreliert.

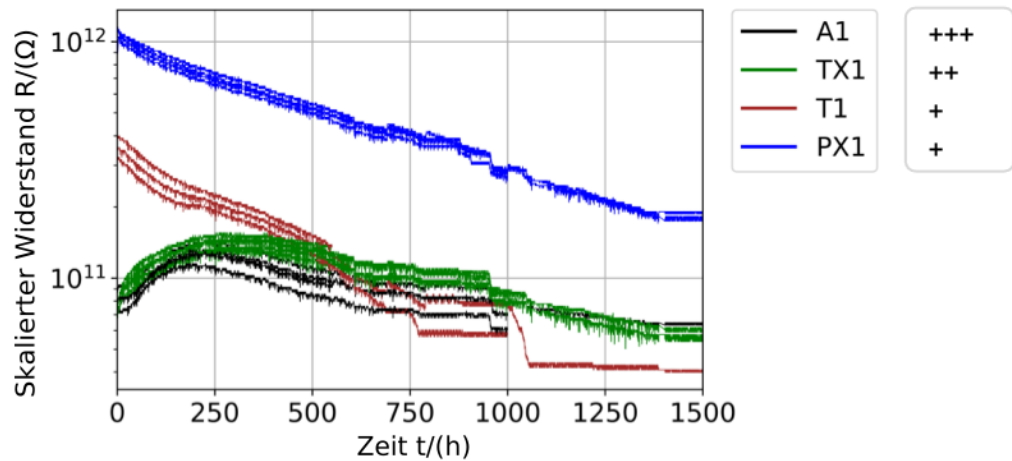


Abbildung 74: Nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 skalierte SIR-Kurven von Leiterplattenlayout L2 mit einem Leiterbahnabstand von 2325 μm , Basismaterial A und den Lötstopplacken A1, TX1, T1, PX1. Die Leiterplatten wurden für 1000-1500 h bei 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte mit 1000 V getestet. Zusätzlich verzeichnet ist die Intensität des AMP nach Tabelle 25.

6.5.2 Wirkmodell für das Auftreten des AMP

Das Wirkmodell für das Auftreten von AMP wird am Beispiel von Lack A1 diskutiert.

Feuchte spielt durch das Bereitstellen eines leitfähigen Pfads für die Kupfermigration eine entscheidende Rolle. Ohne einen leitfähigen Pfad zwischen Anode und Kathode würde die anodische Leiterbahn nicht oxidieren und Kupferionen in Richtung Kathode migrieren. Aus diesem Grund liegt der Fokus der Analyse und Interpretation der Eigenschaften der Lackrezepturen auf den veränderten Feuchteabsorptionseigenschaften des Lötstopplacks durch die veränderte Rezeptur.

Der für die Bildung des AMP notwendige Feuchtepfad wird durch von außen in die Leiterplatte eindringende Feuchte ausgebildet. Die Menge und der Weg der eindringenden Feuchte wird durch die Lackrezeptur beeinflusst.

An chemischen Reaktionen in der Leiterplatte teilnehmende Wassermoleküle können durch die Lötstopplack-Barriere erst zeitverzögert nachbesetzt werden. In Abschnitt 6.3 wurde bereits gezeigt und diskutiert, dass die Feuchtaufnahme des Lötstopplacks die AMP-Bildung im Basismaterial massiv beeinflusst. Für die Beschreibung des Wirkmodells werden im Folgenden die Lackinhaltsstoffe von A1 modellhaft skizziert. Anschließend wird anhand dieser Modelle das Wirkmodell für das Entstehen und die Veränderung des AMP durch eine veränderte Lackrezeptur aufgestellt.

Skizzierung des Modells von Lackvariante A1

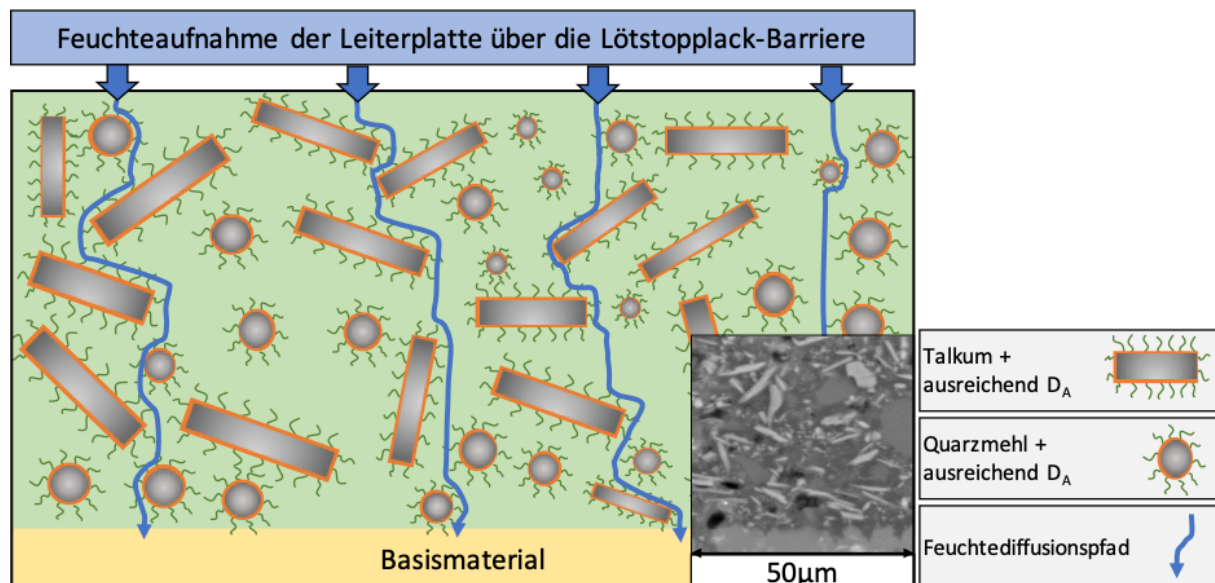


Abbildung 75: Lackvariante A1, Modell der Einbindung der Füllstoffe Talkum und Quarz in den Lötstopplack mittels des sterisch wirkenden Dispergiernittels D_A . Die verwendeten Symbole können Abschnitt 2.2 entnommen werden. Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Es ist zusätzlich eine REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung des Lacks eingezeichnet.

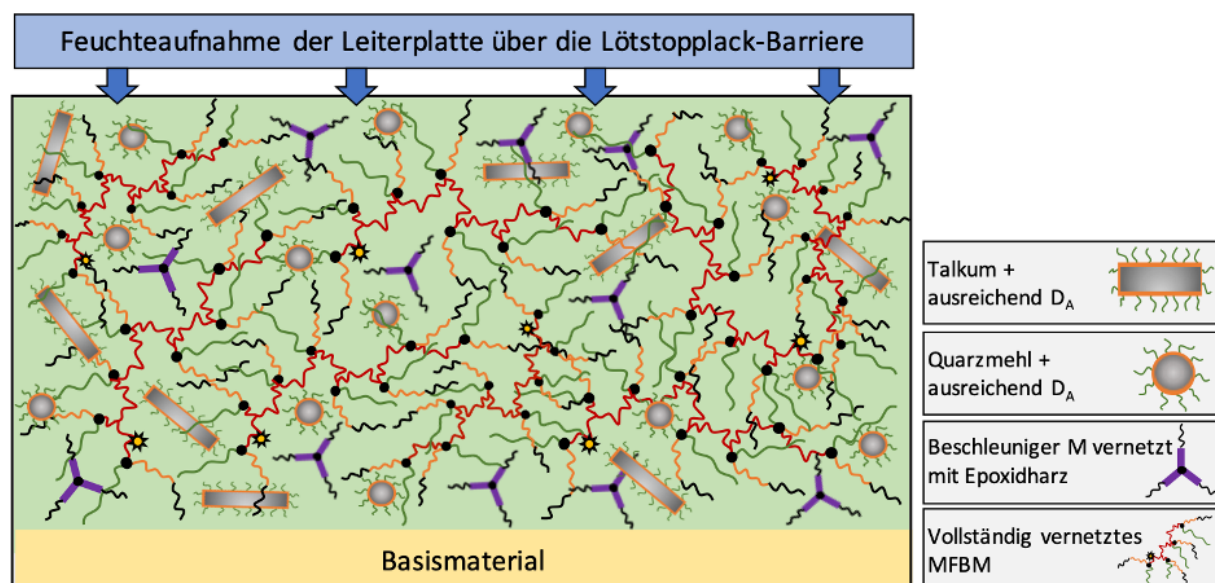


Abbildung 76: Vollständige Vernetzung der Ursprungslackvariante A1. Dargestellt sind das vollständig vernetzte multifunktionale Bindemittel sowie der Beschleuniger in Komponente B. Die verwendeten Symbole können Abschnitt 2.2 entnommen werden. Die REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung kann aufgrund gleicher Füllstoffe Lack A1 in Abbildung 75 entnommen werden.

Abbildung 75 zeigt das Modell von Lackvariante A1 mit Schwerpunkt auf Füllstoffen und Dispergiernitteln im Querschnitt, **Abbildung 76** die vollständige Vernetzung des Ursprungslacks A1. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird das Gesamtlackmodell in die beiden in den Abbildungen skizzierten Teilmodelle unterteilt. Die skizzierten Lötstopplackelemente können den Grundlagen in Abschnitt 2.2 entnommen werden.

In Abbildung 75 ist die zweidimensionale Verteilung der Füllstoffe der als rechteckig angenommenen Talkumpartikel und des runden Quarzmehls im Lötstopplack gezeigt. Zur Vereinfachung der Darstellung wird Talkum nur in einer Orientierung eingezeichnet. Die Füllstoffe sind in diesem Modell ideal im Lötstopplack verteilt und das orangefarbene Dispergiermittel mit den grün eingezeichneten Polymerketten umschließt den Füllstoff vollständig. Zusätzlich verzeichnet sind mögliche Diffusionspfade von Feuchtigkeit in die Leiterplatte, die durch die Füllstoffe definiert werden.

In Abbildung 76 werden die vernetzten multifunktionalen Bindemittel, sowie der vernetzte Beschleuniger M gezeigt. Die Feuchtediffusionspfade sind in dieser Darstellung nicht verzeichnet, sie orientieren sich aber ähnlich Abbildung 75 weiterhin an der Füllstoffverteilung im Lack.

Beschreibung des Wirkmodells für die Ausbildung des AMP

Die Füllstoffe im Lötstopplack verursachen eine inhomogene Feuchteverteilung im Lötstopplack sowie im Basismaterial. Dies ist beispielhaft in **Abbildung 77** gezeigt.

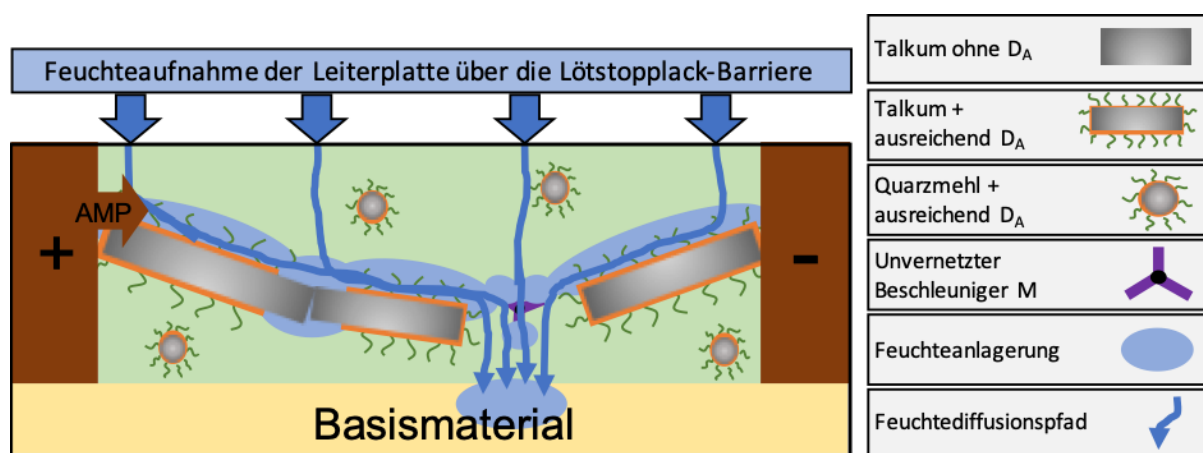


Abbildung 77: Querschnitt durch eine Leiterplatte mit anodischer und kathodischer Leiterbahn. Dargestellt ist die Ausbildung eines horizontalen Feuchtpfads für die Migration von Kupferionen im Lötstopplack. Auch dargestellt ist die Ablenkung der vertikalen Feuchtediffusionspfade durch die Füllstoffe, was zu einer inhomogenen Feuchteverteilung in der Leiterplatte führt.

Eine erhöhte Feuchtekonzentration wird sich in diesem Beispiel aufgrund sich überlagernder Feuchtediffusionspfade in direkter Umgebung der Füllstoffe ausbilden. Die durch die Füllstoffe umgeleiteten Feuchtediffusionspfade haben zusätzlich eine inhomogene Feuchteverteilung im Basismaterial zur Folge. Diese inhomogenen Feuchteverteilungen verursachen die Verzweigung der AMP-Pfade, die sich immer entlang des feuchtereichsten Pfads ausbilden. Dieser kann sich im Basismaterial, aber auch im Lötstopplack ausbilden.

Demnach hat eine Änderung von Art und Dichte der Füllstoffe eine Veränderung der Verzweigung des sich entlang der Feuchtepfade ausbildenden AMPs zur Folge.

Hinzu kommt, dass eine Änderung von Art und Menge der Füllstoffe direkt mit einer Änderung der Art und Menge des Dispergiermittels zusammenhängt. Es können zwei Fälle unterschieden werden. Diese sind in **Abbildung 78** skizziert.

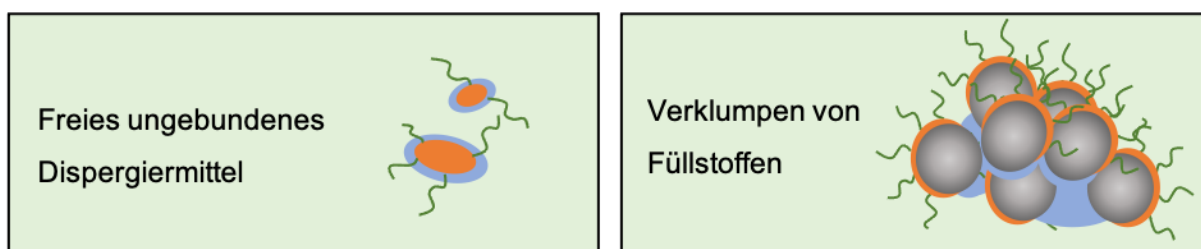


Abbildung 78: Veränderte Feuchteaufnahme des Lötstopplacks durch Änderung der Art und/oder Menge von Füllstoffen und/oder Dispergiermittel.

Sie können alleine oder in Kombination auftreten und führen zu einer im Vergleich zur Ursprungslackvariante erhöhten Feuchteabsorption im Lötstopplack. Wenn dem Lack zu wenig oder unpassendes Dispergiermittel beigegeben ist, kommt es zu einem Verklumpen der Füllstoffe. Bei zu wenig Dispergiermittel werden die Füllstoffe unvollständig mit Dispergiermittel ummantelt. Dies hat eine ungenügende Dispergierung der Füllstoffe zur Folge und es kommt an den Berührungspunkten der Füllstoffe zu einer erhöhten Feuchteaufnahme. Durch die Nutzung von Dispergiermitteln, die zwar über eine auf den Füllstoff passende Haftgruppe verfügen, aber über ein nicht auf das umgebende Bindemittel passendes Polymersegment, kommt es ebenfalls zu einer schlechten Dispergierung. Die Polymerketten können so in Füllstoffnähe verknäulen, wodurch sie unzureichend mit dem Bindemittel wechselwirken. Durch das schlecht ausgebildete Polymernetzwerk wird anschließend vermehrt Feuchte in Füllstoffnähe absorbiert. Zusätzlich kann in Füllstoffagglomeraten weitere Feuchte durch unvernetztes Bindemittel auftreten. Unvernetztes Bindemittel kann innerhalb des Agglomerats vorliegen, da dieses nicht vom UV-Licht zur Belichtung erreicht wird. An den unvernetzten Acrylgruppen kann punktuell mehr Feuchte absorbiert werden (Details siehe Abschnitt 6.5.8).

Bei unpassendem Dispergiermittel haftet das Dispergiermittel gar nicht oder nur unvollständig am Füllstoff. Dies hat zur Folge, dass freies Dispergiermittel im Lötstopplack vorliegt. Aufgrund der hydrophilen Gruppe des Dispergiermittels wird dort bevorzugt Feuchtigkeit absorbiert. Auch können die Haftgruppen des nicht an der Füllstoffoberfläche gebundenen Dispergiermittels über ihre Carboxylgruppen mit dem umgebenden Bindemittel, zum Beispiel dem Epoxidharz in der B-Komponente des Lötstopplacks, vernetzen. Die Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels bleiben dadurch ungebunden und sorgen durch ihre polaren Eigenschaften nun für eine höhere Feuchteaufnahme des Lacks.

Die Feuchteaufnahme des Lacks kann aber nicht nur durch Wahl der Dispergiermittel und Füllstoffe verändert werden. Auch die Menge und Art der Epoxidharze und Beschleuniger besitzt einen großen Einfluss auf die Feuchteaufnahme des Lacks.

Bei Lackvariante A1 ist das Verhältnis von Epoxidharz-, Beschleuniger- und Carboxylgruppen aufeinander abgestimmt. Das Epoxidharz reagiert wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, sowohl mit dem Beschleuniger M, als auch mit den Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels. Es wird bei Lackvariante A1 idealisiert davon ausgegangen, dass alle reaktiven Gruppen abreagiert und vernetzt sind.

Gerät die Reaktion aus dem Gleichgewicht, kommt es zu einer veränderten Feuchtaufnahme des Lötstopplacks. Die Folgen eines vollständig, beziehungsweise unvollständig abreagierten Epoxidharzanteils sind in **Abbildung 79** dargestellt.

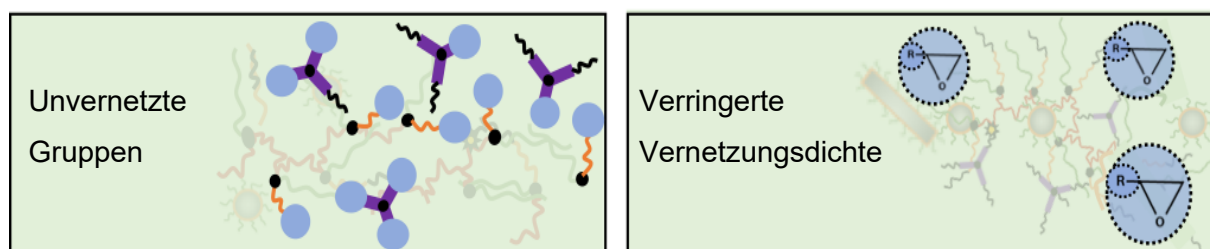


Abbildung 79: Veränderte Feuchtaufnahme des Lötstopplacks durch Änderung der Art und/oder Menge Epoxidharz und Beschleuniger. Die ideal abgestimmte Beschleunigermenge, Epoxidharzmenge und Beschleunigerart kann Abbildung 75 und Abbildung 76 entnommen werden.

Wird dem Lack nun weniger Epoxidharz oder mehr Beschleuniger beigegeben, so vernetzt das Epoxidharz zwar weiterhin vollständig, aber die Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels und die primären funktionalen Gruppen des Beschleunigers verbleiben unvernetzt. Durch die polaren Eigenschaften der funktionalen Beschleunigergruppen kommt es zu einer erhöhten Feuchtaufnahme im Lötstopplackbindemittel im Vergleich zu Lackvariante A1. Durch einen geringeren Epoxidharzanteil in der B-Komponente bildet sich zusätzlich ein weniger dichtes Polymernetzwerk aus. Dies kann zum Beispiel durch die mit einem geringeren Epoxidanteil einhergehende geringere Quervernetzung der im Rest der Epoxidgruppe vorhandenen funktionalen Gruppen verursacht werden. In diesem, nun nicht mit Polymerketten belegten Volumen kommt es zusätzlich zu einer erhöhten Feuchtaufnahme.

Eine verringerte Vernetzungsdichte wird aber vor allem durch erhöhten Epoxidharzanteil und reduzierten Beschleunigeranteil verursacht. Nicht vernetztes Epoxidharz wirkt in der Art, dass die Vernetzungsdichte des umliegenden Lacks herabgesetzt wird, da das zusätzliche Epoxidharz keine Verbindungen mit dem umliegenden Netzwerk eingeht und somit die Vernetzung „stört“. Zusätzlich kann Feuchte am Oxiranring sowie im Rest des Epoxidharzes absorbiert werden. Wird eine andere Art Beschleuniger als der ursprünglich dem Lack beigegebene Beschleuniger verwendet, so definieren die beigegebene Menge sowie die Anzahl reaktiver Amingruppen ob ein Epoxidharzmangel oder -überschuss besteht und welche Art der Feuchtaufnahme erfolgt.

6.5.3 Versuchsparameter und untersuchte Lackvarianten

Ausgehend von der kommerziellen Lackvariante A1 wurden verschiedene Materialvariationen untersucht. Die Auswirkung der Variationen auf die Ausbildung des AMP wurde betrachtet und zur Verifikation des erstellten Wirkmodells der AMP-Ausbildung herangezogen.

Getestet wurde das Leiterplattenlayout L3 mit Basismaterial A (Details in Kapitel IV Tabelle 3 und Tabelle 4). Die Leiterplatten haben keinen Chemisch-Zinn-Prozess durchlaufen. Auf diesen wurde verzichtet, da insbesondere bei den speziell angemischten Lackvariationen nicht bekannt ist, wie sie im Chemisch-Zinn-Prozess reagieren.

Der Leiterbahnabstand liegt bei 2325 μm nach der IPC2221 [59] für 1000 V Testspannung. Die Leiterplatten wurden bei 85 °C und 85 % relativer Luftfeuchte in einer Klimakammer gelagert. In **Tabelle 26** sind die getesteten Lackvarianten aufgeschlüsselt. Die für den Lackvariationstest veränderte Lackkomponente ist jeweils in rot hinterlegt. Alle Lacke wurden mit den in Abbildung 4 in Abschnitt 2.2 beschriebenen Prozessschritten ausgehärtet.

Tabelle 26: Mit 1000 V getestete Lackvariationen auf Basis von Lackvariante A1. Die Unterschiede zur Lackvariante A1 sind rot hinterlegt. Die Änderungen einzelner Komponenten sind immer in Gewichtsprozent angegeben. „n“ bedeutet einen normalen Mahlgrad der Füllstoffe, „f“ steht für feiner vermahlene Füllstoffe.

LACK	KOMPONENTE A										KOMPONENTE B	PROZESSIERUNG
	Füllstoffe				Dispergiermittel			Härter/ Beschleuniger		Epoxidharz		
	Talkum	SiO ₂	BaSO ₄	Mahlgrad	D _A	D _B	D _C	M	D			
A1	20 %	9 %	-	n	1x	-	-	1x	-	1x	1x	40 µm
B1	20 %	9 %	-	n	1x	-	-	1x	-	1x	1x	80 µm
C	-	-	-	-	-	-	-	1x	-	1x	1x	40 µm
D1	28,5 %	-	-	n	1x	-	-	1x	-	1x	1x	40 µm
D2	-	28,5 %	-	n	1x	-	-	1x	-	1x	1x	40 µm
D3	-	-	28,5 %	n	1x	-	-	1x	-	1x	1x	40 µm
E1	20 %	9 %	-	n	-	-	-	1x	-	1x	1x	40 µm
E2	20 %	9 %	-	n	2x	-	-	1x	-	1x	1x	40 µm
E3	20 %	9 %	-	n	-	1x	-	1x	-	1x	1x	40 µm
E4	20 %	9 %	-	n	-	-	1x	1x	-	1x	1x	40 µm
F1	20 %	9 %	-	n	1x	-	-	1x	-	+20 %	40 µm	40 µm
F2	20 %	9 %	-	n	1x	-	-	1x	-	-20 %	40 µm	40 µm
G1	20 %	9 %	-	n	1x	-	-	+30 %	-	1x	40 µm	40 µm
G2	20 %	9 %	-	n	1x	-	-	-30 %	-	1x	40 µm	40 µm
G3	20 %	9 %	-	n	1x	-	-	-	1x	1x	40 µm	40 µm
H	20 %	9 %	-	f	1x	-	-	1x	-	1x	40 µm	40 µm

6.5.4 Allgemeine Beschreibung der Ergebnisse

Bei allen untersuchten Lackformulierungen wurde nach 1480h Lagerung bei 1000V und 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte ein anodisches Migrationsphänomen an den Anodenspitzen festgestellt. Teilweise traten auch anodische Migrationseffekte zwischen den Leiterbahnen auf. Es ist kein Unterschied in der Migrationsintensität und Migrationsart (im Lötstopplack oder Basismaterial) zwischen Bereichen mit und ohne Kupferinnenlage auf Negativpotential zu erkennen. Die Intensität und das Aussehen des AMP, messbar in Kontrast, Länge und Menge der Verzweigungen ist stark durch die Rezeptur des aufgetragenen Lacks bestimmt.

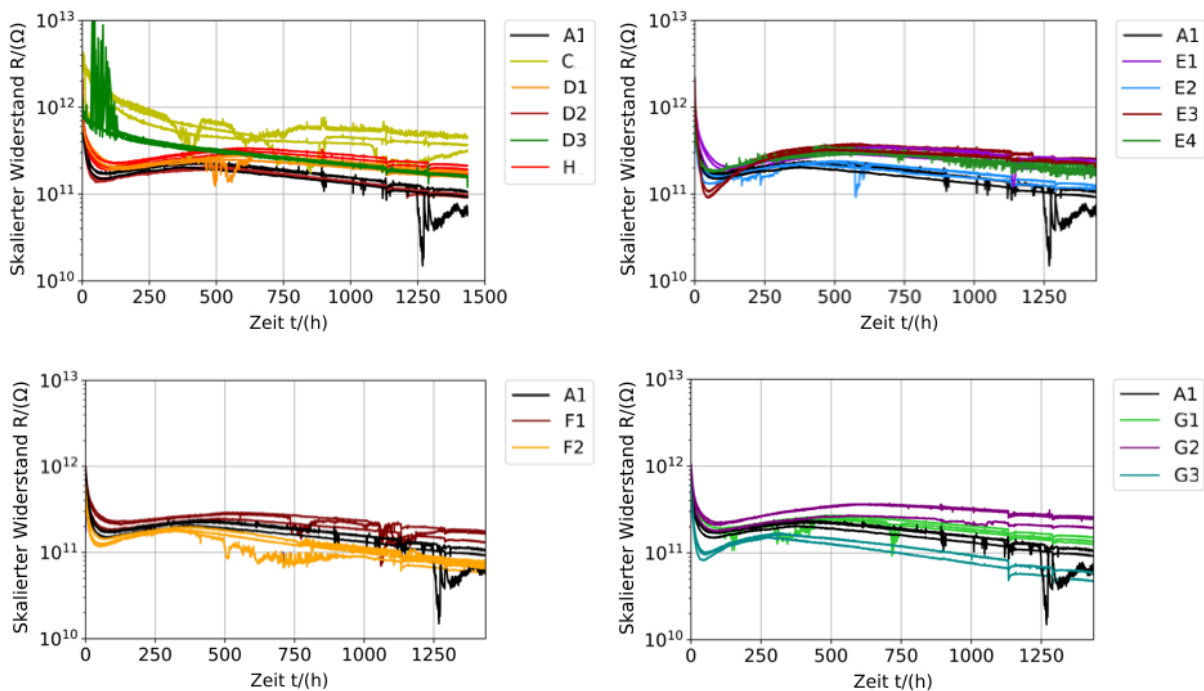


Abbildung 80: Nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 skalierte SIR-Kurven.
Oben links: Variation Füllstoffe. Oben rechts: Variation Dispergiertmittel.
Unten links: Variation Epoxidharzmenge. Unten rechts: Variation Beschleuniger.

In **Abbildung 80** sind die während des HV-SIR-Tests aufgezeichneten und nach Gleichung (7) in Abschnitt 4.3 skalierten SIR-Kurven dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass die Veränderung der Lötstopplackkomponenten Einfluss auf die gemessenen elektrischen Isolationswiderstände hat. Es ist jedoch, wie in Abschnitt 6.5.1 beschrieben, kein direkter Zusammenhang zwischen dem SIR-Wert und der AMP-Intensität erkennbar.

Auffällig ist der hohe Anteil an AMP-Pfaden im Basismaterial der Leiterplatte. Die Kombination von Lackvariante A1 und Basismaterial A wurde bereits zuvor auf Leiterplattenlayout L2 getestet. Es konnte ebenso wie bei dem Lackvariationstest anodische Migration an allen Leiterbahnspitzen beobachtet werden, jedoch trat sie hier in nahezu allen Fällen vollständig im Lötstopplack der Leiterplatte auf. Die Unterschiede des Orts des Auftretens des AMP können in abweichender Prozessierung und Folgeprozessen liegen.

6.5.5 Allgemeine Vorgehensweise bei der Analyse der AMP

In diesem Abschnitt wird die Methode vorgestellt, mit welcher die AMP-Pfade bei den unterschiedlichen Lackvarianten bewertet werden. In Abschnitt 6.5.5.1 wird die Abschätzung der AMP-Längen beschrieben, in Abschnitt 6.5.5.2 die Zuordnung der AMP-Längen zu unterschiedlichen Migrationsebenen.

6.5.5.1 Abschätzung der AMP-Längen

Um die Intensität des AMP zwischen den unterschiedlichen Lackvarianten zu bewerten, wurde das in **Abbildung 81 links** dargestellte Vermessungsverfahren verwendet. Der Kreis in **Abbildung 81 rechts** gibt an, wie hoch der Anteil an Leiterbahnen ist, zwischen welchen AMP festgestellt wurde. Im gezeigten Beispiel tritt zwischen 65 % der Leiterbahnen ein AMP auf.

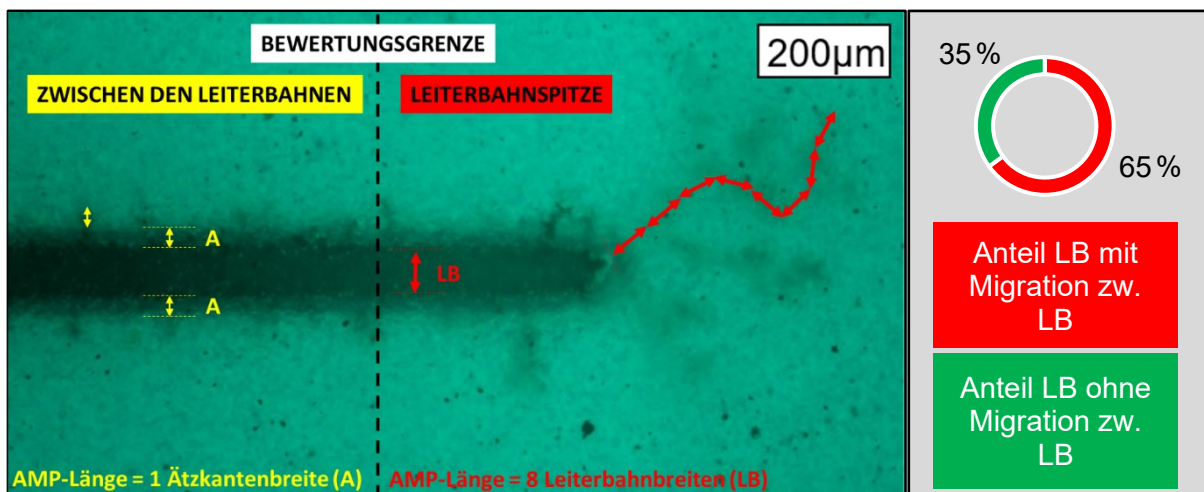


Abbildung 81: Links: Aufnahme einer Leiterbahnspitze mit AMP mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus senkrecht zur Leiterplattenoberfläche. Skizzierung der Abschätzungsmethode der Migrationslänge an der Leiterbahnspitze und zwischen den Leiterbahnen. Rechts: Prozentualer Anteil der untersuchten Leiterbahnen einer Lackvariante mit Migration (rot) und ohne Migration (grün) zwischen den Leiterbahnen.

Ziel der Untersuchung ist es, die AMP-Intensität zwischen den unterschiedlichen Lackformulierungen vergleichen zu können. Der AMP-Pfad wird entlang der Verzweigung des längsten AMP-Pfads vermessen. Je länger der Pfad, desto mehr Material lagert sich entlang des Pfads an und desto intensiver ist die Kupferleiterbahn von AMP betroffen. Die AMP-Länge an den Leiterbahnspitzen wurde durch Abschätzung über die Anzahl an Leiterbahnbreiten bestimmt. Die Abschätzung der Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen erfolgt in Vielfachen von Ätzkantenbreiten. Dabei wurden alle Leiterplatten mit derselben Mikroskopvergrößerung betrachtet und alle Migrationslängen beginnend von der Ätzkante bestimmt. Um die AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen ohne etwaige elektrische Feldüberhöhungseffekte bewerten zu können, wurden diese erst ab der in Abbildung 81 abgeschätzten Grenze gewertet, die den Bereich der Leiterbahn von dem der Leiterbahnspitze trennt.

Eine Leiterbahnbreite ohne Ätzkante wurde vermessen zu 70 µm, eine Ätzkantenbreite zu 20 µm. Kürzere Migrationspfade an der Leiterbahnspitze als eine halbe Leiterbahnbreite wurden als „kein AMP an der Leiterbahnspitze“ gewertet. Für die Bestimmung der Migrationslänge zwischen den Leiterbahnen wird der längste, typische AMP-Pfad gewertet, einzelne Ausreißer wurden verworfen. Durch die hohe Anzahl von bis zu 113 Werten pro Lötstopplackvariante wird eine gute Abschätzung der mittleren AMP-Längen bei den einzelnen Lackvarianten erreicht. Die verwendete Längenabschätzung und die für die AMP-Längenabschätzung verwendeten Gruppen sind in **Tabelle 27** gezeigt.

Tabelle 27: Zuordnung der AMP-Längen an der Leiterbahnspitze und zwischen den Leiterbahnen.

AMP-LÄNGENABSCHÄTZUNG	LÄNGENABSCHÄTZUNG IN	GRUPPIERUNG
AN DER LB-SPITZE	Leiterbahnbreiten	0, ½, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7
ZWISCHEN DEN LB	Ätzkantenbreiten, längere AMP in LB-Breiten	0, 1, 2 (Ätzkantenbreiten) 1 (LB-Breiten)

6.5.5.2 Zuordnung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze zur Migrationsebene

Da die AMP-Pfade der unterschiedlichen Lackvarianten nicht rein im Lötstopplack oder an der Lötstopplack-Basismaterial-Grenze wachsen, werden diese nach dem Ort ihres Auftretens, der Migrationsebene (im Basismaterial oder im Lötstopplack), kategorisiert. Für die Definition der optischen Bewertungskriterien wurden je Lackvariante mehrere AMP-Pfade ausgewählt und Querschliffe angefertigt, sodass die Migrationsebenen der Pfade sichtbar werden. Der Vergleich der Migrationsebenen mit den vor dem Anfertigen der Querschliffe aufgenommenen Bildern der AMP-Pfade mit dem Lichtmikroskop mit UV-Filter senkrecht zur Leiterplattenoberfläche erlaubt es, am Kontrast der AMP-Pfade zum Lötstopplack die Zuordnung zur Ebene zu erkennen. Das Anfertigen mehrerer Querschliffe je Lackvariante ist nötig, um die (zum Beispiel durch Füllstoffe) unterschiedliche Lichtdurchlässigkeit der Lacke bei der Eingruppierung mit berücksichtigen zu können. Die Zuordnung zur Migrationsebene erfolgt wegen der besseren Erkennbarkeit über die AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze.

Abbildung 82 zeigt die Gruppierung der Migrationsebenen an der Leiterbahnspitze:

- Migration rein im Basismaterial (BM)
- Migration rein im Lötstopplack (LSL)
- Migration im Lötstopplack und Basismaterial (BM+LSL)
- Migration im Basismaterial mit Punkten im LSL (BM + Punkte LSL)
- Keine Migration

Bei der Gruppe „BM + LSL“ erfolgt keine gesonderte Betrachtung der Verhältnisse der Migrationsanteile im Lötstopplack und im Basismaterial. Die Gruppe „BM + Punkte LSL“ enthält alle AMP-Pfade, die im Basismaterial migrieren, aber zwischenzeitig in einem dort sofort endenden

AMP-Pfad in den Lötstopplack auftauchen. Diese Erscheinung wird nachfolgend kurz als Punkt im Lötstopplack bezeichnet, weil dies der optischen Erscheinung bei Betrachten der Leiterplattenoberfläche entspricht. Dieses Phänomen tritt vor allem bei Lackformulierung D2 mit lediglich SiO_2 -Füllstoffen auf und wird dort näher erläutert.

Für jede Lackformulierung ist der Anteil an AMP-Pfaden in den unterschiedlichen Migrationsebenen mittels des in Abbildung 82 gezeigten Kreises vermerkt.

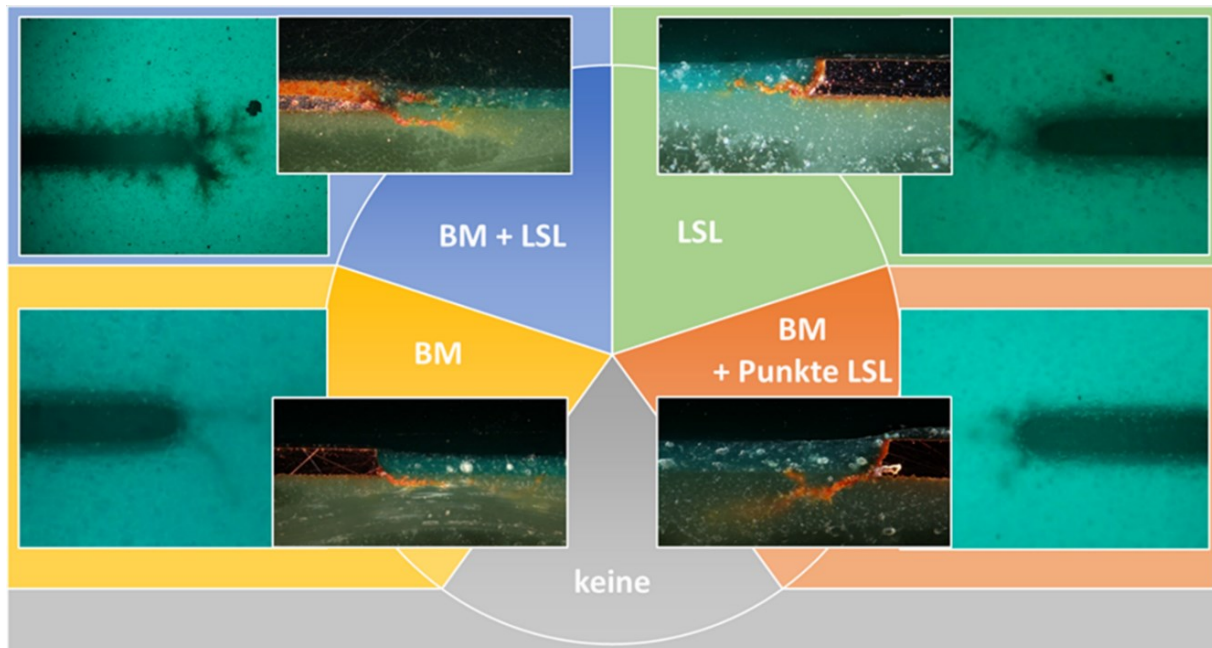


Abbildung 82: Zuordnung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze. Zu jeder Migrationsebene ist ein Beispielbild des AMP mit Blick senkrecht auf die Oberfläche mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus und der entsprechende Querschliff mit dem Lichtmikroskop im DF Modus gezeigt. Durch die Kreisabschnitte wird bei den unterschiedlichen Lackvarianten der prozentuale Anteil der untersuchten Leiterbahnspitzen in den entsprechenden Migrationsebenen angezeigt.

6.5.6 Analyse des AMP bei der Ursprungslackvariante A1

Bei Lackvariante A1 konnte nach 1480 h bei 1000 V und 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte an allen Leiterbahnspitzen ein anodisches Migrationsphänomen beobachtet werden.

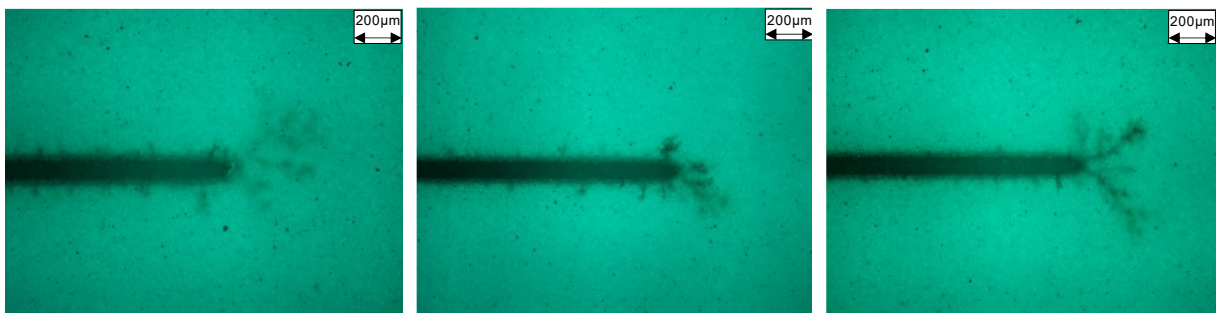


Abbildung 83: Senkrechte Aufsicht auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante A1 mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante A1 kann **Abbildung 83** entnommen werden. Auffällig ist die starke Verzweigung der AMP-Pfade.

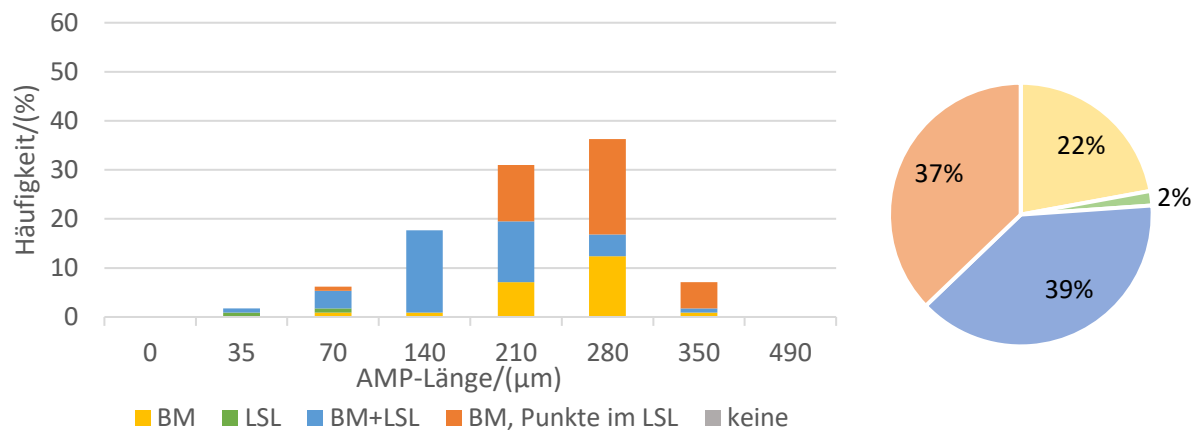


Abbildung 84: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante A1. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade ist in **Abbildung 84** entsprechend Abschnitt 6.5.5 aufgezeigt. Deutlich zu erkennen ist, dass kaum AMP-Pfade rein im Lötstopplack auftreten. Dominierend ist die anodische Migration teilweise im Basismaterial und im Lötstopplack, sowie im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack.

Tabelle 28: Länge der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet sowie die maximale und minimale Länge und die Anzahl der Messwerte.

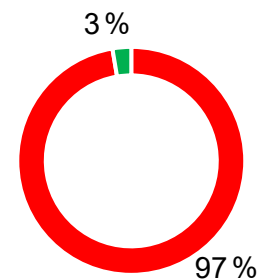
LACK A1		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP-LÄNGE AN LB-SPITZE IN µm	Mittelwert l_{A1}	53 ± 25	245 ± 3	171 ± 2	261 ± 2	218 ± 8
	Maximum	70	350	350	350	350
	Minimum	35	70	35	70	35
ANZAHL LEITERBAHNEN		2	25	44	42	113

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen ist in **Tabelle 28** aufgeführt. Auffällig ist, dass die längsten AMP-Pfade vollständig oder teilweise im Basismaterial der Leiterplatte beobachtet werden können. Die im Mittel kürzesten AMP-Pfade treten rein im Lötstopplack auf. Zusätzlich verzeichnet ist die mittlere AMP-Länge, sowie die maximal und minimal festgestellte AMP-Länge mit der entsprechenden Anzahl an Messwerten als Maß

für die Streuung. Der Mittelwert über alle untersuchten Leiterbahnen in allen Migrationsebenen und seine Streuung sind ebenfalls verzeichnet

Tabelle 29: Links: Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert (MW) wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün).

LACK A1		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{A1}	25 ± 1
	Maximum	70
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		113



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen ist in **Tabelle 29** aufgeführt. Der Mittelwert der AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen wurde unter Einbeziehung der Leiterbahnen ohne AMP-Pfade ermittelt, um als Maß für die Anfälligkeit des Lacks von AMP zwischen den Leiterbahnen zu dienen.

Es wird deutlich, dass bei Lackvariante A1 zwischen annähernd allen untersuchten Leiterbahnen ein AMP beobachtet werden kann. Zusätzlich verzeichnet ist bei allen Lackvarianten als Maß für die Streuung der AMP-Längen zwischen den Leiterbahnen der Fehler des Mittelwerts der AMP-Pfadlängen zwischen den Leiterbahnen.

Auf Basis dieser Analyse, die hier beispielhaft für die Lackgrundformulierung A1 durchgeführt wurde, wurden diverse Lackvarianten betrachtet. Die Einzelbewertungen sind im Anhang in Abschnitt 9.2 aufgeführt. Die erhaltenen Ergebnisse wurden zur Verifikation der aufgestellten Wirkmodelle zur AMP Ausbildung herangezogen.

6.5.7 Analyse und Vergleich der Lackvarianten auf Basis von A1

In diesem Abschnitt werden die Analyseergebnisse der einzelnen Lackvarianten im Vergleich zu A1 zusammenfassend diskutiert. Auch das in Abschnitt 6.5.2 aufgestellte Wirkmodell wird besprochen. Die detaillierten Analyseergebnisse der einzelnen Lackvarianten sind im Anhang in Abschnitt 9.2 beschrieben.

Die Analyse der AMP-Pfade der einzelnen Lackvarianten bestätigt die These des Wirkmodells, dass die AMP-Verzweigung im Basismaterial und im Lötstopplack durch die Füllstoffe im Lötstopplack verursacht wird. So kann bei Lacken mit unveränderten Füllstoffen eine ähnliche Verzweigung der AMP-Pfade wie schon bei Lackvariante A1 beobachtet werden. Bei Lackvarianten mit veränderten Füllstoffen unterscheidet sich diese deutlich von A1. Besonders auffällig ist dies bei Lackvariante C ohne Füllstoffe und Dispergiermittel. Das AMP-Phänomen

findet bei dieser Lackvariante vermehrt im Basismaterial und dort sehr geradlinig statt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass ohne Füllstoffe im Lötstopplack die Feuchte homogen ins Basismaterial gelangt, da sie nicht wie in Abbildung 77 gezeigt durch Füllstoffe abgelenkt werden. Das im Wirkmodell beschriebene Verklumpen der Füllstoffe aufgrund eines Mangels an Dispergiermittel zeigt sich besonders bei Lackvariante D2 mit lediglich Quarzmehl als Füllstoff. Durch den Dispergiermittelmangel und durch die geringeren Ausmaße des Quarzmehls im Vergleich zu Talkum berühren sich die beiden Materialien nicht. So kann sich auch kein leitfähiger Pfad im Lötstopplack ausbilden. Stattdessen kann beobachtet werden, dass die Migration vermehrt im Basismaterial stattfindet und nur an den Stellen im Lötstopplack auftritt, an welchen Füllstoffe sedimentiert sind und aus diesem Grund an dieser Stelle besonders viel Feuchte vorliegt.

Bei Lackvariante E2 mit im Vergleich zu A1 doppelter Dispergiermittelmenge kann der Effekt von freiem Dispergiermittel im Lötstopplack besonders deutlich beobachtet werden. Durch freies Dispergiermittel finden sich bei E2 mehr und längere Migrationspfade rein im Lötstopplack. Die AMP-Pfade im Basismaterial fallen kürzer aus als bei A1, da im Lötstopplack mehr Feuchte absorbiert ist und so dort vermehrt ein AMP auftritt.

Der Effekt von polaren unvernetzten Gruppen, die wie im Wirkmodell beschrieben zu einer erhöhten Feuchteaufnahme im Lötstopplack führen, wird besonders deutlich bei der Analyse von Lackvariante G3 mit Beschleuniger D anstelle von Beschleuniger M. Beschleuniger D bringt eine höhere Anzahl reaktiver Amingruppen in den Lack, wodurch diese unvernetzt bleiben. Die so gesteigerte Hydrophilie des Bindemittels zeigt sich durch die höhere Anzahl und deutlich längere AMP-Pfade im Lötstopplack.

Wie sich unvernetzte Epoxidharzgruppen auf das AMP auswirken, kann zum Beispiel bei Lackvariante F1 beobachtet werden. Hier treten längere und mehr AMP-Pfade als bei Lackvariante A1 auf, was durch die im Wirkmodell beschriebene, geringere Vernetzung des Lacks mit erhöhter Feuchteaufnahme zu erklären ist.

In **Abbildung 85** sind alle untersuchten Lacke und ausgewählte Daten der untersuchten Lackvarianten aus dem Anhang in Abschnitt 9.2 dargestellt. Diese erlauben es, eine Aussage über die Betroffenheit der unterschiedlichen Lackvarianten vom AMP-Wachstum im Vergleich zur Ursprungslackvariante A1 zu treffen. Zu den Wertungsparametern für die Betroffenheit mit AMP zählen die relativen Abnahmen der Mittelwerte der AMP-Längen zwischen den Leiterbahnen und an den Leiterbahnspitzen im Vergleich zu A1 und der prozentuale Anteil an Leiterbahnen ohne AMP zwischen den Leiterbahnen und an den Leiterbahnspitzen. Die Lackvarianten, die bei mindestens drei der Wertungsparameter die größte AMP-Abschwächung zeigen, sind die Lackvarianten mit der größten Unterdrückung des AMP und wurden in Abbildung 85 farbig markiert und umrandet.

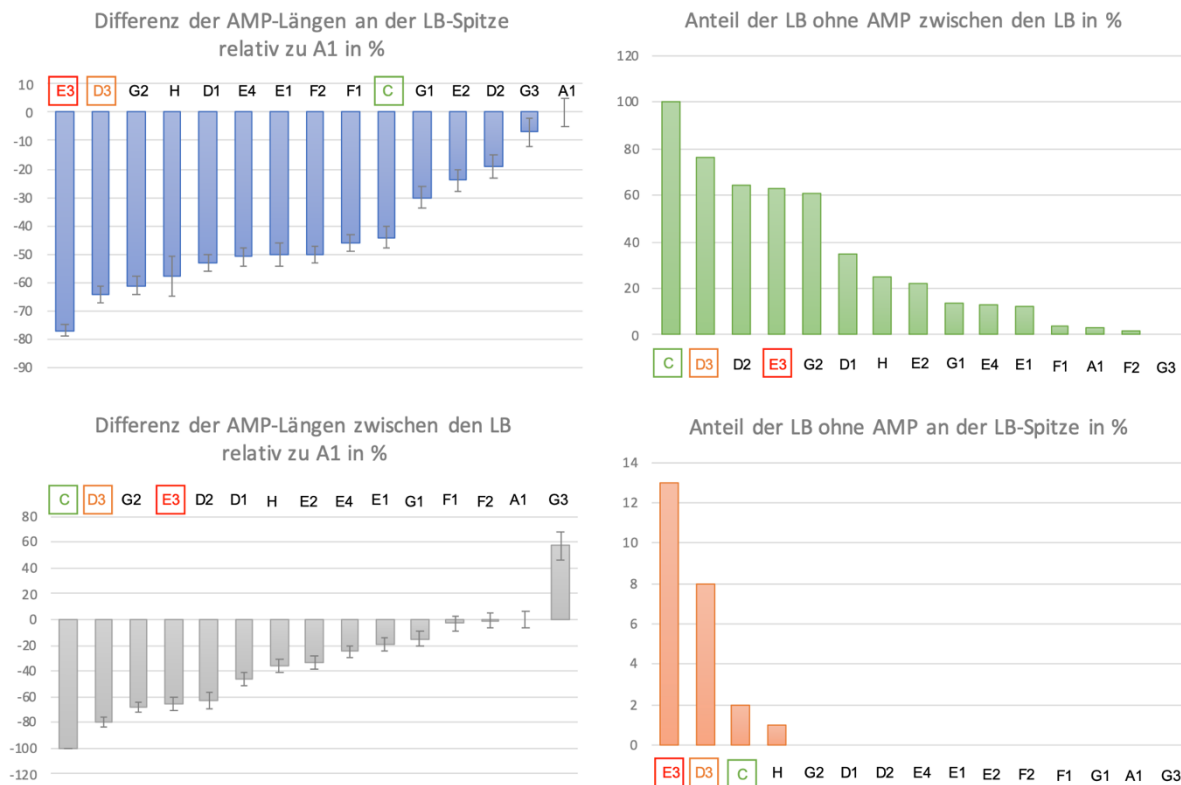


Abbildung 85: Links: Relative Abnahmen der AMP-Längen im Vergleich zu A1 zwischen den Leiterbahnen und an den Leiterbahnspitzen und die Fehler ihrer Mittelwerte. Rechts: Prozentualer Anteil an Leiterbahnen ohne AMP an den Spitzen und zwischen den Leiterbahnen. Markiert sind Lackvarianten mit besonders deutlicher AMP-Unterdrückung.

Auffällig ist, dass Lackvariante G3 mit Beschleuniger D anstelle von Beschleuniger M die einzige Lackvariante darstellt, bei der im Vergleich zu A1 längere AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen auftreten. Zusätzlich werden AMP zwischen allen Leiterbahnen und an allen Leiterbahnspitzen beobachtet. Damit ist sie die einzige Lackvariante, bei der das AMP im Vergleich zu A1 verstärkt auftritt.

Auffällig bei allen anderen Lackvarianten ist, dass die AMP-Bildung trotz meist im Vergleich zu A1 erhöhter Feuchteabsorption im Lötstopplack verringert wird. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die AMP-Pfade bei allen diesen Lacken im Vergleich zu A1 vermehrt im Lötstopplack auftreten. Dort ist die AMP-Pfadbildung aufgrund von größeren Füllstoffen und einer geringeren Feuchteaufnahme als im Basismaterial erschwert (Vergleiche hierzu die Ergebnisse in [61] und des Lötstopplacks in Abschnitt 5.2). Einzig bei Lackvariante C wird die Feuchteabsorption im Lack verringert, wodurch aber auch Feuchte langsamer ins Basismaterial transportiert werden kann und sich die AMP-Bildung verlangsamt und damit verkürzt. Beschleuniger D in Lackvariante G3 wirkt durch seine hohe Anzahl an unvernetzten Amingruppen migrationsfördernd. Es wird mehr AMP zwischen Leiterbahnen und auch an den Leiterbahnspitzen detektiert. Zusammengefasst wirkt sich nach Abbildung 85 der Verzicht auf Füllstoffe (Lack C) oder von Bariumsulfat mit einer geringeren Partikelgröße und Füllstoffdichte (Lack D3) deutlich auf eine

Unterdrückung des AMP aus. Eine Änderung des Dispergiermittels im Lack (Lack E3) führt ebenfalls zu einer hohen Unterdrückung des AMP.

Das in dieser Arbeit entwickelte Wirkmodell für die Ausbildung des AMP ist auf weitere Lackformulierungen übertragbar. Da die Feuchtaufnahme des Lötstopplacks maßgeblich für die AMP-Bildung im Lötstopplack und Basismaterial verantwortlich ist, werden im Folgenden einige allgemeine herausgearbeitete Maßnahmen aufgezählt, die zu einer verringerten Feuchtaufnahme des Lacks führen. Hierzu zählen:

- Verzicht auf Füllstoffe und Dispergiermittel.
- Reduzierung der Anzahl unvernetzter polarer Gruppen im Lötstopplack. Möglich wäre beispielsweise eine Verringerung der Dispergiermittelmenge oder der Menge an Beschleuniger M.
- Erhöhen der Vernetzungsdichte des Lacks mit einhergehender Verringerung des freien Volumens, möglich beispielsweise durch verbesserte Anpassung der Menge an Beschleuniger, multifunktionalem Bindemittel und Epoxidharz.
- Maximierung des Füllstoffabstands zur erschwerten Ausbildung eines leitfähigen Pfads im Lötstopplack. Möglich ist dies beispielsweise durch eine Veränderung des Dispergiermittels und der Füllstoffmenge und -partikelgröße. So führt zum Beispiel eine höhere Haftung des Dispergiermittels am Füllstoff zu verbesserter Einbindung in das Bindemittelnetzwerk und damit Verringerung der Feuchtaufnahme. Eine verbesserte Wechselwirkung des solvatisierbaren Molekülsegments im Dispergiermittel mit dem Bindemittel sorgt ebenfalls für eine bessere Einbindung der Füllstoffe in das Bindemittelnetzwerk. Dies wiederum geht auch einher mit einer Erhöhung des Füllstoffabstands mit verringerter Ausbildungswahrscheinlichkeit eines leitfähigen Pfads entlang der Füllstoffe.

Da sich gezeigt hat, dass die AMP-Pfade im Basismaterial bei annähernd allen Lackvarianten länger ausfallen als im Lötstopplack, ist auch eine Verringerung oder Verlangsamung der Feuchtaufnahme des Basismaterials beeinflusst durch den Lötstopplack denkbar durch zum Beispiel:

- Verringern der Feuchtaufnahme des Lötstopplacks.
- Verlängern der Feuchtediffusionspfade im Lötstopplack durch zum Beispiel eine hohe Füllstoffdichte an Talkum.

6.5.8 Zusammenfassung und Diskussion der Ergebnisse

Auf Basis der Lackformulierung A1 wurden in dieser Untersuchung gezielt Einzelkomponenten variiert, um ihren Einfluss auf die Ausprägung des AMP zu analysieren. Die Analyse der AMP-Ausprägungen bei den verschiedenen Lackvarianten im HV-SIR-Test erlaubt eine Aussage über die Zuverlässigkeit der einzelnen Lacke in HV-Anwendungen.

Untersucht wurden Veränderungen in der Art und Menge der Füllstoffe, des Dispergiermittels, sowie des Beschleunigers und des Epoxidharzes. Für die Analyse wurden insgesamt 14 verschiedene Lötstopplackvarianten auf Basis von Lackvariante A1 hergestellt und auf Leiterplatten mit Basismaterial A aufgetragen. Als Teststruktur wurden Kammstrukturen mit 2325 µm Leiterbahnabstand nach der IPC2221 [59] für eine Testspannung von 1000 V ausgewählt. Die Leiterplatten wurden für 1480 h bei 85 °C/85 % relativer Luftfeuchte getestet, wobei der elektrische Isolationswiderstand der Teststrukturen über die komplette Testzeit hin überwacht wurde. Dies erlaubt einen direkten Vergleich der Ausprägung des AMP mit den gemessenen Widerstandswerten.

Nach dem Hochvolt-SIR-Test konnte bei allen Lackvarianten ein AMP festgestellt werden, wobei sich dieses in seiner Ausprägung und Intensität deutlich zwischen den einzelnen Lacken unterscheidet. Der Vergleich der relativen Höhe der elektrischen Isolationswiderstände der Teststrukturen zeigt, dass die Intensität des AMP nicht direkt mit dem gemessenen Widerstand der Teststruktur korreliert. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer zusätzlichen optischen Analyse der Leiterplatten nach dem HV-SIR-Test, um Fehlerbilder wie das AMP aufzudecken und die Zuverlässigkeit der Leiterplatten im späteren Produkt zu garantieren.

Für die Analyse der AMP-Pfade bei den unterschiedlichen Lackvarianten wurden verschiedene Auswertemethoden entwickelt, die es erlauben, die AMP-Pfadausbildung sowie die beeinflussenden Parameter vergleichend zu beschreiben. So wurde analysiert, wie häufig die AMP-Pfade im Basismaterial beziehungsweise im Lötstopplack verlaufen, was einen Hinweis auf veränderte Lötstopplackeigenschaften gibt. Für eine vergleichende Beschreibung der Intensität und Ausprägung des AMP wurden die Längen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze und zwischen den Leiterbahnen vermessen. Um die Häufigkeit des Auftretens von AMP zu analysieren wurde zusätzlich die Anzahl an Leiterbahnen ohne AMP zwischen den Leiterbahnen und an den Leiterbahnspitzen bestimmt.

Die Analyse der Intensität und Ausprägung des AMP bei den unterschiedlichen Lackvarianten zeigt klar auf, dass es mehrere Möglichkeiten gibt, die Lackrezeptur so anzupassen, dass das AMP in seiner Ausprägung unterdrückt wird und die Zuverlässigkeit des Lacks gesteigert wird. Es konnte dabei kein einzelner die Ausbildung von AMP hauptsächlich unterdrückender Parameter festgestellt werden. Es wurden vielmehr mehrere Lackvarianten und damit mehrere Beiträge ermittelt, die eine im Vergleich zu A1 deutlich geringere AMP-Intensität ermöglichen.

Zusammengefasst ist eine auffällig hohe Unterdrückung des AMP bei Lackvarianten auf Basis von A1 durch einen vollständigen Verzicht auf Füllstoffe und Dispergiermittel erreichbar. Aber auch die Veränderung der Füllstoffe zu Bariumsulfat zeigen einen im Vergleich zu den anderen Lackvarianten hohen Einfluss auf die Unterdrückung des AMP. Eine Veränderung der Art des Dispergiermittels bieten ebenfalls gute Anpassungsmöglichkeiten von Lackvariante A1.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Wirkmodell konnte durch die Lackvariation bestätigt werden. So wird die Verzweigung der AMP-Pfade im Basismaterial und Lötstopplack durch die Füllstoffverteilung im Lötstopplack beeinflusst. Die durch die Lackvariation veränderte Feuchteaufnahme des Lötstopplacks ist nachweislich für die Änderung der Migrationsebene (im Basismaterial oder im Lötstopplack) verantwortlich.

Das entwickelte Wirkmodell erlaubt es, die Haupteinflussfaktoren, die das AMP unterdrücken, modellhaft zu beschreiben. Dies macht es möglich, die für Lackvariante A1 festgestellten Haupteinflussfaktoren auf das AMP auf weitere Lacke und andere Epoxidharz-basierte Isolatoren zu übertragen.

VII. AUSBLICK

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden detaillierte Untersuchungen am anodischen Migrationsphänomen AMP durchgeführt, die Einblicke in das Verhalten von Leiterplatten unter HV- und Feuchtelast erlauben. Die Untersuchungsergebnisse machen es möglich, gezielt Materialien auszuwählen, die unter HV-Last eine höhere Widerstandsfähigkeit gegen feuchteinduzierte Fehlerbilder wie das AMP aufweisen. Auch können erste Layoutregeln abgeleitet werden, mit denen eine quantifizierte Abschätzung der Lebensdauer unter Praxisbedingungen möglich wird.

Für eine umfassende Beschreibung aller zuverlässigkeitsrelevanten Einflussgrößen haben sich im Verlauf der Arbeit Anregungen für eine Verbreiterung der Wissensbasis ergeben, die ergänzend zu einer Steigerung der Zuverlässigkeit beitragen können.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden zusätzlich zum AMP weitere Mechanismen gefunden, die Einfluss auf das Langzeitverhalten von Leiterplatten unter hoher elektrischer Spannung und Feuchtelast haben können. Dazu gehören die Rissbildung im Lötstopplack um die anodische und kathodische Leiterbahn sowie die teilweise massive Kathodenersetzung, bei der nach dem HV-SR-Test Kupfer im Lötstopplack detektiert wurde. Ebenso wurde beobachtet, dass sich das auf der Außenlage initiierte AMP Phänomen entlang der Glasfasern im Leiterplatteninneren ausbreiten kann, wenn die Leiterplatte vor dem Test zusätzlichen Temperaturwechseln ausgesetzt war. Die weitergehende Untersuchung dieser Phänomene kann Teil neuer Forschungsfelder sein.

Ein klares Ergebnis der vorliegenden Arbeit war, dass die auf die Leiterplatte aufgetragene Lackdicke einen starken Einfluss auf das nach dem HV-SIR-Test beobachtete AMP zeigt. So konnte bei dick aufgetragener Lackschicht ein deutlich ausgeprägteres und längeres AMP als bei einer dünneren, gleich prozessierten Schicht festgestellt werden. Zurückgeführt werden konnte diese Beobachtung auf eine unterschiedliche UV-Beleuchtungsintensität in den verschiedenen dicken Lackschichten während der Prozessierung, was zu einer veränderten Lackvernetzung führt. Dieser Zusammenhang kann in zukünftigen Untersuchungen weitergehend erforscht werden.

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Einflusses von Lötstopplack auf das neuartige Phänomen AMP. In einer Veröffentlichung [89] im Rahmen dieser Dissertation wurde der Einfluss des Basismaterials auf die AMP-Intensität bereits grundlegend diskutiert und kann Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein.

Bei der Analyse einzelner Lackinhaltsstoffe konnten einige Inhaltsstoffe ermittelt werden, die das AMP-Wachstum in der Leiterplatte deutlich unterdrücken. Weitergehend untersucht werden könnten Kreuzreaktionen mehrerer die Robustheit der Leiterplatte positiv beeinflussender Inhaltsstoffe, um eine weiter optimierte, AMP-resistente Lackrezeptur zu ermitteln. Die Untersuchungen weiterer Lackvarianten und Rezepturen auf ihre HV-Festigkeit ermöglicht eine Erweiterung des in dieser Arbeit aufgestellten Lebensdauermodells.

In der vorliegenden Arbeit wurde mit der PCB ein Grundbaustein zuverlässiger HV-Technologien detailliert auf seine Zuverlässigkeit unter hohen elektrischen Spannungen und Feuchtelast untersucht. Die ergänzende Untersuchung des Einflusses von Lot, Flussmittel und der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie ihrer Wechselwirkung untereinander kann Teil zukünftiger Forschungsarbeiten sein. Weitergehend untersucht werden kann auch eine mögliche Übertragung der in dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse für HV-Leiterplatten auf weitere Isolationsmaterialien für HV-Anwendungen.

Durch die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführten Analysen konnte ein Zusammenhang zwischen der Feuchteaufnahme, der Glasübergangstemperatur und der Teilentladungsfestigkeit von Lötstopplack festgestellt werden. Diese grundlegenden Kenngrößen der verschiedenen Leiterplattenmaterialien sollten für zuverlässige HV-Produkte zukünftig in Normen spezifiziert und bereits vor der Durchführung zeitaufwändiger HV-SIR-Tests ermittelt werden, um Hinweise auf die HV-Festigkeit der Materialien zu erhalten. Neuartige HV-resistente Materialien können so schneller und kostengünstiger entwickelt und qualifiziert werden.

VIII. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Mit der Elektrifizierung des Kraftfahrzeugantriebs werden neue Applikationen im Fahrzeug eingeführt, in denen elektronische Komponenten bei Spannungen betrieben werden, die mit bis zu 1200 V deutlich über den bisher üblichen Werten liegen. Zuverlässiger Betrieb derartiger Steuergeräte über die komplette Lebensdauer des Fahrzeugs hinweg ist unerlässlich und muss durch Design und Auswahl geeigneter Komponenten, Materialien und Prozesse abgesichert werden.

Ziel dieser Arbeit war es, die in derartigen Applikationen verwendeten Leiterplatten (PCBs) und ihre Materialien auf ihre Zuverlässigkeit unter hohen elektrischen Spannungen und Feuchtelast zu untersuchen, ein Lebensdauermodell zu entwickeln und Kriterien zu Materialauswahl und -einsatz abzuleiten.

Durch die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen konnten mehrere bisher nicht in der Literatur beschriebene Phänomene aufgedeckt, analysiert und hinsichtlich ihres Ausfallrisikos bewertet werden. Der Fokus der vorliegenden Arbeit lag auf dem in diesen HV-Untersuchungen erstmals aufgedeckten, neuartigen Anodischen Migrationsphänomen (AMP), welches zum aktuellen Kenntnisstand das höchste Ausfallrisiko der beobachteten Phänomene birgt.

Das AMP ist ein elektrochemisches, dendritenähnliches Migrationsphänomen, welches sich im Lötstopplack, an der Lötstopplack-Basismaterialgrenze und auch im Basismaterial von der anodischen Leiterbahn ausgehend in Richtung Kathode entwickeln kann. Überbrückt es den Abstand zwischen den gegensätzlich gepolten Leiterbahnen, kann es zum Ausfall des betroffenen Steuergeräts und im schlimmsten Fall sogar zu Bränden und zur Gefährdung von Personen kommen. Das AMP bildet sich im Gegensatz zum CAF-Mechanismus in der Bulkphase des Materials bzw. im Verbund zwischen der Lötstopppmaske und dem Basismaterial aus, aber unabhängig von Glasfasern wie sie im CAF Mechanismus von Bedeutung sind.

Ziel der Arbeit war es, die Entstehung dieses Phänomens tiefergehend zu analysieren und zu verstehen, um zuverlässigere PCBs für HV-Technologien entwerfen zu können.

Analysiert wurde die chemische Zusammensetzung des AMP-Materials. Dieses besteht unabhängig von der elektrischen Spannung, Feldstärke und den verwendeten Leiterplattenmaterialien immer aus einem orange- bis rotfarbigen Material, welches durch eine XRD-Analyse als das halbleitende Cu_2O identifiziert werden konnte.

Ein Modell, das die Ausbildung des AMP und seine chemischen Reaktionen beschreibt, wurde entworfen. Im Unterschied zu klassischen elektrochemischen Migrationsphänomenen bildet sich das AMP in umgekehrter Richtung, von der Anode in Richtung Kathode, aus. Dies wird

durch eine pH-Wert-Verschiebung aufgrund der Wasserelektrolyse im elektrischen Feld zwischen Anode und Kathode ermöglicht. Das oxidierte Kupferion präzipitiert so auf der Anodenseite als das dort thermodynamisch stabile Cu_2O .

Der Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit lag auf der Analyse, welchen Einfluss das Lötstopplackmaterial auf die Ausbildung des AMP hat. Eigenschaften wie die Glasübergangstemperatur, die Feuchteaufnahme, die aufgetragene Lackdicke und die Isolationsfähigkeit des Lacks wurden detailliert untersucht. Um den Einfluss einzelner Lackinhaltsstoffe auf die das AMP beeinflussenden Lackeigenschaften herauszuarbeiten wurde eine gezielte Variation einzelner Lackinhaltsstoffe durchgeführt und die Wirkung auf die Ausbildung des AMP untersucht. Die Hypothesen zum Einfluss der Materialien auf die Ausbildung des AMP konnten bestätigt werden.

Es konnte gezeigt werden, dass das AMP bei dickerer Lackschicht deutlich intensiver auftritt als bei gleichprozessierter dünnerer Lackschicht, was die HV-Zuverlässigkeit der Leiterplatten wesentlich beeinflusst. Begründet werden kann dies durch die niedrigere Glasübergangstemperatur des dicken Lacks, welche eine höhere Feuchteaufnahme des Lacks zur Folge hat im Vergleich mit einer gleichprozessierten dünneren Lackschicht mit höherer Glasübergangstemperatur. Gleichzeitig konnte nachgewiesen werden, dass Teilentladungseffekte mit einhergehender Materialalterung in dickeren Lackschichten bereits bei niedrigeren elektrischen Spannungen auftreten als in dünneren Schichten. Bei dickerem Lack kann so vermehrt Feuchte aufgenommen werden, was die Ausbildung eines leitfähigen Pfads zwischen Anode und Kathode vereinfacht. Die Lackschichtdicke und die Aushärtungsmechanismen der Lötstopplacke konnten somit durch die in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen als die Parameter herausgearbeitet werden, welche die HV-Zuverlässigkeit von Leiterplatten deutlich beeinflussen und in zukünftigen Designnormen HV-resistenter Leiterplatten berücksichtigt werden sollten.

Zusätzlich ist es gelungen, einen Einfluss der Lackvariante sowie einzelner Lackinhaltsstoffe auf die Intensität und die Ausbildung des AMP nachzuweisen. Ein Wirkmodell, welches den Einfluss der einzelnen Inhaltsstoffe auf die Feuchteaufnahme des Lacks und die resultierende Ausprägung des AMP beschreibt, wurde abgeleitet. Es konnte nachgewiesen werden, dass das AMP im Lötstopplack immer kürzere Pfade ausbildet als im Basismaterial. Damit verursachen AMP-Pfade, die sich im Lötstopplack ausbilden, einen späteren Ausfall der HV-Leiterplatten durch AMP als AMP-Pfade im Basismaterial. Die Migrationsebene des AMP, die sich im Lack oder im Basismaterial ausbilden kann, wird wesentlich beeinflusst durch die Lackinhaltsstoffe und die daraus resultierende Feuchteaufnahme des Leiterplattenmaterials.

Eine Veränderung von Art und Menge der Füllstoffe und Dispergiertmittel, beziehungsweise ein Verzicht, konnten als die Einflussfaktoren herausgearbeitet werden, welche die AMP-Ausbildung besonders stark unterdrücken. Die Wahl des Beschleunigers für die Lackvernetzung spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Anfälligkeit des Lötstopplacks für AMP. So führte der Einsatz eines Beschleunigers mit einer höheren Anzahl von Aminogruppen, die teilweise nicht vernetzt wurden, zu einer negativen Beeinflussung des AMP-Verhaltens.

Aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zur Ausbildung des AMP beeinflussenden Lackeigenschaften können Maßnahmen abgeleitet werden, welche die Entwicklung neuer HV-resistenter Lackrezepturen unterstützen.

Ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit war die Untersuchung des Einflusses von Design- und Betriebsparametern wie dem Leiterbahnabstand, der Belastungsdauer, dem elektrischen Feld und der elektrischen Spannung auf den Ausfallzeitpunkt der Leiterplatten durch AMP. Ein Lebensdauermodell, welches den Ausfallzeitpunkt der Leiterplatten durch AMP in Abhängigkeit vom beispielhaft untersuchten Leiterplattenmaterial, von den Umgebungsbedingungen, dem Leiterbahnabstand und der elektrischen Spannung vorhersagt, wurde entworfen. Damit ist es gelungen, einen formalen Zusammenhang zu ermitteln, mit welchem die Zuverlässigkeit von HV-Leiterplatten auf Basis weniger Kennwerte ohne zeitintensive HV-Tests vorhergesagt werden kann.

Untersucht wurde im Besonderen, ob die Ausbildung des AMP rein durch die elektrische Feldstärke beeinflusst ist, oder auch durch die Höhe der elektrischen Spannung. Um den Einfluss der voneinander abhängigen Parameter der elektrischen Feldstärke und der elektrischen Spannung auf das AMP getrennt voneinander untersuchen zu können, wurden für die Untersuchungen gezielte Veränderungen des Leiterbahnabstands und der elektrischen Spannung vorgenommen um jeweils einen der Parameter konstant zu halten während der andere variiert wird.

Sowohl bei der Bestimmung des Ausfallzeitpunkts, als auch bei der Analyse des AMP-Wachstums konnte ein Einfluss der elektrischen Feldstärke und der elektrischen Spannung nachgewiesen werden. Dabei zeigt sich bei der Analyse des Ausfallzeitpunkts ein größerer Einfluss der elektrischen Feldstärke als der elektrischen Spannung. Eine Erhöhung der elektrischen Feldstärke durch Verringerung des Leiterbahnabstands bei gleichbleibender Spannung konnte somit als kritisch für einen zeitigeren Ausfall der Leiterplatte durch AMP ermittelt werden. Die mittlere Länge der AMP-Pfade nimmt ebenfalls mit einer Erhöhung der elektrischen Feldstärke stärker zu als mit der elektrischen Spannung.

Anders verhält es sich bei der AMP-Dichte sowie der Gesamtanzahl AMP auf einer Leiterbahn. Beide zeigen eine starke Zunahme sowohl mit einer Erhöhung der elektrischen Spannung als

auch der elektrischen Feldstärke. Eine hohe AMP-Dichte auf der Leiterbahn ist dabei aber nicht korreliert mit einem früheren Ausfallzeitpunkt. Die Analyse des Wachstumsverhaltens der AMP über die Belastungsdauer hinweg zeigt deutlich, dass die AMP-Pfade mit zunehmender Belastungszeit eher an Länge zulegen als dass sich neue Pfade bilden.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit aufgebaute Datenbasis für ein verbessertes Verständnis über die Ausbildung des AMP und damit die Zuverlässigkeit von HV-Produkten ist neuartig und fundamental. Entscheidende, die HV-Zuverlässigkeit beeinflussende Kennwerte konnten identifiziert werden. Daraus ergeben sich Designparameter für zuverlässige HV-Produkte, welche die Qualität und Zuverlässigkeit von elektromobilen Technologien entscheidend verbessern.

Zum Zeitpunkt der Entstehung der vorliegenden Arbeit waren keine Normen hinsichtlich SIR-Messungen bekannt, die im Rahmen von Materialcharakterisierungen mit HV an Leiterplatten herangezogen werden konnten. Die in dieser Arbeit durchgeführten HV-SIR-Tests zur detaillierten Untersuchung des AMP legen damit erstmalig einen Grundstein für zukünftige standardisierte Zuverlässigkeitstests zur Materialcharakterisierung im Rahmen von THB-Tests (Temperatur-Feuchte-Spannungs-Tests, englisch Temperature-Humidity-Bias-Tests). Geeignete Test- und Analyseparameter können der vorliegenden Arbeit entnommen werden. Beachtung finden sollte bei der Beschreibung der Analyseparameter, dass die Untersuchung des SIR-Werts allein keine Aussage über die Anfälligkeit der Leiterplatte für AMP erlaubt und der SIR-Wert immer durch eine optische Analyse der Leiterplatten ergänzt werden muss.

Mit der vorliegenden Arbeit wurden wichtige neuartige Fehlerbilder, welche die Zuverlässigkeit der Leiterplatten in HV-Produkten beeinflussen, aufgedeckt und bewertet. Der Effekt der anodischen Migration wurde detailliert untersucht und charakterisiert.

So ist es gelungen, Lötstopplackeigenschaften herauszuarbeiten, welche deutlich die Zuverlässigkeit der HV-Leiterplatten beeinflussen. Grundlegende Parameter, wie der Leiterbahnabstand oder die elektrische Spannung konnten als geeignete Kennwerte identifiziert und in ein erstes Lebensdauermodell transferiert werden. Die HV-Zuverlässigkeit der Leiterplatten kann so bereits ohne aufwändige Lebensdauertests beurteilt werden. Neue Materialien können durch das erlangte Wissen gezielter entworfen und Test- und Entwicklungszeit eingespart werden. Die HV-Zuverlässigkeit und Qualität elektromobiler Technologien wird konsequent vorangetrieben. Damit liefert die vorliegende Arbeit einen entscheidenden Beitrag für die weitere Steigerung der Sicherheit und Qualität von HV-Produkten in der Elektromobilität.

IX. ANHANG

Im Anhang dieser Arbeit sind in Abschnitt 9.1 die in dieser Arbeit verwendeten Messgeräte verzeichnet. In Abschnitt 9.2 sind die detaillierten Versuchsergebnisse der im Hauptteil der Arbeit in Abschnitt 6.5 aufgeführten Untersuchung des Einflusses einzelner Lackinhaltsstoffe auf das AMP aufgeführt.

9.1 Verwendete Messgeräte

In der untenstehenden **Tabelle 30** sind die in dieser Arbeit verwendeten Messgeräte verzeichnet. Die zusätzlich verzeichneten Angaben zu den Geräten entstammen den jeweiligen Bedienungsanleitungen.

Tabelle 30: In dieser Dissertation verwendete Messgeräte.

GERÄT	GERÄTEDETAILS
SIR-Prüfstände	<u>Espec AMI-150-U-5 (500 V):</u> Spannung: 0,1-500 V Widerstandsmessbereich für 500 V: $1 \cdot 10^6$ bis $1 \cdot 10^{13} \Omega$ oder mehr Einstellgenauigkeit Stressspannung U für 500 V: $\pm (0,3\% \cdot U + 5V)$ Abgeschätzte Messgenauigkeit Widerstand: ab $1 \cdot 10^6 \Omega$: $\pm 2\%$, ab $1 \cdot 10^{12} \Omega$: $\pm 4\%$, ab $5 \cdot 10^{12} \Omega$: $\pm 8\%$, ab $1 \cdot 10^{13} \Omega$: $\pm 25\%$, ab $5 \cdot 10^{13} \Omega$: $\pm 25\%$ oder mehr <u>Gen3 AutoCAF2+ mit Microlab 1200V-1.2A Power Supply und</u> <u>CLR1250 Bridge (1000 V):</u> Spannung: 1-1250 V Widerstandsmessbereich: 10^6 bis $10^{14} \Omega$ Einstellgenauigkeit Stressspannung U: 0,1 % Messgenauigkeit Widerstand: $\pm 2,5\%$ at $10^{10} \Omega$ bei $100 \pm 2 V$ DC
Spannungsquellen	<u>Power Supply EA-HV 9000-1K2-2000 (1000 V, 750 V):</u> Spannung: 0-1200 V Stabilität Spannung bei 0-100 % Last: $<0,05\%$ LAB605-A 0-500 V/0,5 A (500 V, 250 V): Spannung: 0-500 V Stabilität über 8 h und fB = 0-20 Hz: 500 ppm <u>Knallinger Instruments DC Supply Powerfact MS (1000 V):</u> Spannung: 0-1000 V

Spannungsstabilität bei Laständerung bezogen auf Maximalspannung: 0,01 %

Klimakammern

Vötsch VC³4034-M, Vötsch VC³4060:

Verwendung von demineralisiertem Wasser mit einer Leitfähigkeit von 3 µS/cm,

Räumliche Temperaturschwankung zum Sollwert für >20 % r.h.:
±0,5 K bis ±1 K

Zeitliche Temperaturschwankung im Kammerzentrum:
±0,1 K bis ±0,3 K

Zeitliche Feuchteschwankung im Kammerzentrum:
±1 % bis ±3 % r.h.

Espec PR-3J:

Verwendung von demineralisiertem Wasser mit einer Leitfähigkeit von 3 µS/cm,

Räumliche Temperaturschwankung: ±1,5 °C

Zeitliche Temperaturschwankung: ±0,3 °C

Zeitliche Feuchteschwankung: ±2,5 % r.h.

TW-Kammer

Vötsch VT7012S2:

Kalkammer:

Räumliche Temperaturschwankung bezogen auf Sollwert im Bereich -65 °C bis +70 °C: ±0,5 K bis ±2 K

Zeitliche Temperaturschwankung im Kammerzentrum:
±0,3 K bis ±1 K

Warmkammer:

Räumliche Temperaturschwankung bezogen auf Sollwert im Bereich +50 °C bis +200 °C: ±0,5 K bis ±2 K

Zeitliche Temperaturschwankung im Kammerzentrum:
±0,3 K bis ±1 K

Multimeter

FLUKE 289 True RMS Multimeter JEV2P12/289:

Auflösung DC-Spannung: bei 50 V: 0,001 V, bei 500 V: 0,01 V, bei 1000 V: 0,1 V

Auflösung Widerstandswerte: bei 5 MΩ: 0,0001 MΩ, bei 30 MΩ: 0,001 MΩ, bei 50 MΩ: 0,01 MΩ, von 50 MΩ bis 100 MΩ: 0,1 MΩ, von 100 MΩ bis 500 MΩ: 0,1 MΩ

Gravimetrische Feuchtemessung	<u>Multisample Dynamic Moisture Sorption SPSx-1μ Advance:</u> Auflösung von 1 μ g, Wiederholbarkeit von $\pm 2 \mu$ g RMS, Temperaturgenauigkeit von zeitlich $\pm 0,1$ K und räumlich $\pm 0,5$ K, relative Luftfeuchte $\pm 0,6$ % bei $23^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$
Teilentladungsprüfplatz	<u>TPP10 von MPS Mess- und Prüfsysteme GmbH:</u> Mit dazugehöriger Software MSPS-20 V5.1.62, maximale Prüfspannung 10 kV mit TE-Detektion <1 pC, Effektivwertmessung mit Genauigkeit von $\pm 1,5$ % und ± 5 Digit
XPS-Messung	<u>Thermo VG Scientific Typ K-Alpha:</u> Nachweisgrenze proben- und elementabhängig zwischen 0,1 bis 1 Atomprozent, relativer Fehler (statistisch und systematisch) bei der quantitativen Analyse 10 %
XRD-Messung	<u>Mikrodiffraktometer Bruker-AXS D8discover:</u> Die Datenauswertung erfolgte mittels des Programms EVA von Bruker unter Benutzung der JCPDS-Datenbank, verwendet wurde Cu-K α -Strahlung, Primärmonochromator, 50 μ m fokussierende Polykapillare, Vantec500-Flächendetektor, Integration des Detektorframes bei gewähltem Beugungswinkel von 30° ca. $0,1 \times 0,3 \text{ mm}^2$
Lichtmikroskope	<u>Olympus Model BX51RF:</u> Mit folgenden MPlanFLN-Objektiven: 5x / 0,15 BD / ∞ / - / FN26,5, 10x / 0,30 BD / ∞ / - / FN26,5, 20x / 0,45 BD / ∞ / - / FN26,5, 50x / 0,80 BD / ∞ / - / FN26,5, 100x / 0,90 BD / ∞ / - / FN26,5 Verwendete Filter: BF, DF, NU und WBV <u>Olympus SZX2-RFA16:</u> Mit festem Objektiv SDF PLAPO 0,8x, <u>Software:</u> Olympus Stream Essentials Version 1.9.1. <u>UV-Quellen:</u> X-Cite Series 120 Q von EXFO/Lumen Dynamics

Reflowofen	<u>SMT Quattro Peak L Plus:</u> Reflowprofil „loetet_immer.pro“ (Peaktemperatur 244 °C, Reflowprofil RA), Reflowprofil „Grenzprofil_Rng.pro“ (Peaktemperatur 270 °C, Reflowprofil RB)
REM-EDX	<u>REM: Zeiss EVO 60:</u> SN: EVO60-03-39 mit der Software SmartSEM Version 5.07 mit Service Pack 4 <u>EDX: Oxford Instruments X-MaxN Model 51-XX1003:</u> Aufnahmezeit für EDX-Punktspektren: 100 s mit der Software AZtec 3.0
Besputtern von Querschliffen mit Kohlenstoff/Gold	BAL-TEC SCD 050 Sputter Coater
Ionenstrahlätzen und Besputtern von Querschliffen	Gatan Model 682 Precision Etching Coating System
Isopropanol-Reinigungsbad	Edelstahlbad mit Thermostat von Clifton mit Tischabzug von Köttermann Systemlabor
Querschliffherstellung	Epofix-Resin von Struers mit Epofix-Hardener von Struers im Verhältnis 10:1
Schleifmaschinen, Schleifpapier, Schleiflösungen, Politurtücher	Schleifmaschine TegraPol-31 mit TegraForce-5 und TegraDoser-1 mit Schleifpapier Struers FEPA P Waterproof SiC von 5-200 µm Korngröße. Politurtücher von Struers mit DiaDuo/DiaPro Diamond Suspension and Lubricant in One mit Korngrößen von 9 µm, 3 µm, 1 µm
Ansys Workbench	R18.2, Physik: Electric, Analyse: Steady-State Electric Conduction, Gleichungslöser: Mechanical APDL
Datenauswertung	Python 3.6.4, für die Datenauswertung verwendete Pakete: numpy, pylab, scipy, matplotlib, xlrd, heapq, os, glob, Microsoft Excel 2016 und 2019

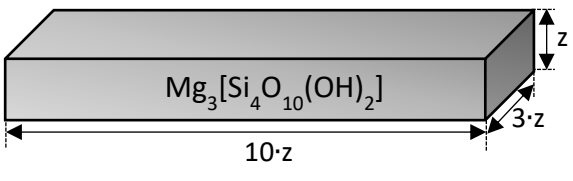
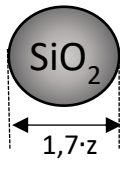
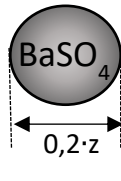
9.2 Detaillierte Untersuchungsergebnisse verschiedener Lackvarianten

In diesem Abschnitt werden die detaillierten Untersuchungsergebnisse und Interpretationen der einzelnen Lackvarianten aus Abschnitt 6.5 gezeigt.

9.2.1 Einfluss von Füllstoffen und Dispergiermittel

In diesem Abschnitt werden grundlegende Parameter ermittelt für die Beschreibung und Analyse einer Veränderung der Lackeigenschaften durch Variation der Dispergiermittelmenge oder der Füllstoffe im Lack. Dabei wird über eine Abschätzung der mit Dispergiermittel zu benetzenden Oberfläche ermittelt, ob durch die Veränderung der Lackinhaltsstoffe ein Überschuss oder ein Mangel an Dispergiermittel vorliegt. Basis ist Lackvariante A1; diese enthält im Modell ein Dispergiermittel, welches in seiner Zusammensetzung und Menge ideal auf die Füllstoffoberfläche abgestimmt ist. Auch werden die Folgen unterschiedlicher Füllstoffe auf die vertikalen Feuchtediffusionspfade in die Leiterplatte diskutiert.

Tabelle 31: Modell der drei verwendeten Füllstoffe Talkum, Quarzmehl und Bariumsulfat. Quarzmehl und Bariumsulfat werden als Kugeln angenommen, Talkum als Quader.

	TALKUM	QUARZMEHL	BARIUMSULFAT
MODELL			
z	1 µm		
FORM	Quader	Kugel	Kugel
DICHTE [g/cm ³]	2,78	2,65	4,4
VOLUMEN [10 ⁻¹² cm ³]	30,0	2,57	0,004
OBERFLÄCHE [10 ⁻⁸ cm ²]	86,0	9,1	0,13
ÖLZAHL	48 g/100 g	44 g/100 g	~18 g/100 g

Der Ursprungslack A1 enthält Talkum und Quarz als Füllstoffe und das carboxylgruppenhaltige Dispergiermittel D_A (nach Tabelle 26). Talkum ist zu 20 % beigegeben, Quarzmehl zu 9 % und D_A zu etwa 1 %. Hinzuzufügen ist, dass jede Lackvariante ein sogenanntes Mattierungsmittel enthält, welches aus mikrometerskaligen SiO₂-Partikeln besteht. Anhand von Abbildung 10

und Abbildung 11 in Abschnitt 2.2.2 kann das Aussehen und die Größenverteilung der Füllstoffe und des Mattierungsmittels abgeschätzt werden, welche in den REM-Aufnahmen des Lötstopplacks sichtbar werden.

In **Tabelle 31** wird für die Abschätzung der mit Dispergiermittel zu benetzenden Oberfläche ein Modell aufgestellt. Dieses Modell dient insbesondere dazu, zu bewerten, welchen Einfluss eine Änderung der Füllstoffe und des Mahlgrads auf die gesamte Füllstoffoberfläche im Lötstopplack hat. Für Quarzmehl wird eine Kugel, für Talkum ein näherungsweise quaderförmiger Aufbau angenommen.

Die Ölzahl gibt an, wieviel Beigabe von Öl der Füllstoff benötigt, bis eine weiche Paste entsteht [90] und die Füllstoffoberfläche so mit ausreichend Öl bedeckt ist. Talkum und Quarzmehl weisen eine sehr ähnliche Ölzahl auf. Im Lötstopplack wirkt das Dispergiermittel als koppelndes Element zwischen Bindemittel und Füllstoff. Es wird angenommen, dass sich die Dispergiermittelmenge proportional zur Ölmenge verhält und Talkum und Quarzmehl so über einen vergleichbaren Dispergiermittelbedarf verfügen.

Bariumsulfat weist eine kleinere Ölzahl auf als Talkum oder Quarzmehl, wodurch auch ein geringerer Dispergiermittelbedarf erwartet wird.

9.2.2 Einfluss der Füllstoffe in Wechselwirkung mit Dispergiermittel D_A auf das AMP

Der Füllstoffeinfluss in Wechselwirkung mit dem Dispergiermittel D_A wurde anhand der Varianten C (keine Füllstoffe, kein Dispergiermittel), D1 (nur Talkum), D2 (nur Quarzmehl), D3 (Bariumsulfat), H (feinerer Mahlgrad), E1 (ohne Dispergiermittel) und E2 (doppelte Menge Dispergiermittel) untersucht. Zu Beginn dieses Abschnitts wird über eine Berechnung der Füllstoffvolumina und der Füllstoffoberflächen abgeschätzt, ob die jeweilige Änderung der Lackeigenschaften einen Mangel oder einen Überschuss an Dispergiermittel zur Folge hat. Auf Basis dieser Abschätzung werden die Lackvarianten in die zwei Gruppen sortiert und es werden die Auswirkungen der Lackvariation auf das anodische Migrationsphänomen vorgestellt und diskutiert.

9.2.2.1 Gruppierung der Lötstopplacke

Mit den in Tabelle 31 abgeschätzten Füllstoffoberflächen von Talkum, Quarzmehl und Bariumsulfat wird eine Berechnung der gesamten Füllstoffoberfläche in den Lackvarianten mit Variation der Füllstoffe und/oder des Dispergiermittels A1, C, D1, D2, D3, H, E1, E2 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 32** aufgezeigt. Zusätzlich ist dort mit senkrechten Pfeilen markiert, wie sich das Volumen, die Oberfläche und das Volumenverhältnis von Epoxy-Acrylat zum Füllstoffvolumen im Vergleich zum Ursprungslack A1 verhält. Die Oberfläche sowie die Füllstoffart beeinflussen die Benetzung des Füllstoffs mit Dispergiermittel. Das Verhältnis von

Bindemittel zu Füllstoffvolumen bietet einen Anhaltspunkt für die Nähe der Füllstoffe zueinander sowie eine Wahrscheinlichkeit, dass es zum Kontakt zwischen Füllstoffen im Bindemittel kommt.

Tabelle 32: Bestimmung des Füllstoffvolumens, Abschätzung der Füllstoffoberfläche nach Tabelle 31 und Berechnung des Verhältnisses von Füllstoffvolumen zum Volumen des nassen Epoxy-Acrylats, berechnet mit einem Lötstopplackgewicht von 100 g. $n(M)$ stellt einen unbekannten Faktor dar, um den die Oberfläche der Füllstoffe durch Mehrfachvermahlung M vergrößert wird. Die Pfeile zeigen an, ob der jeweilige Wert im Vergleich zu A1 höher oder niedriger ausfällt

LACK		VOLUMEN FÜLLSTOFFE [cm ³]	OBERFLÄCHE FÜLLSTOFFE [10 ³ · cm ²]	VERHÄLTNIS VOLU- MEN FÜLLSTOFFE: EPOXY-ACRYLAT
A1	20 % Talkum 9 % Quarz 1 % Dispergiermittel	10,59	326,1	1,66 :10
C	Keine Füllstoffe	↓ 0	↓ 0	↓ 0 :10
D1	28,5 % Talkum 1 % Dispergiermittel	↓ 10,25	↓ 293,9	↓ 1,61 :10
D2	28,5 % Quarzmehl 1 % Dispergiermittel	10,75 ↑	379,6 ↑	1,69 :10 ↑
D3	28,5 % Bariumsulfat 1 % Dispergiermittel	↓ 6,48	1943,2 ↑	↓ 1,01 :10
H	20 % Talkum 9 % Quarz 1 % Dispergiermittel	10,59	$n(M) \cdot 326,1$ ↑	1,66 :10
E1	20 % Talkum 9 % Quarz	10,59	326,1	1,66 :10
E2	20 % Talkum 9 % Quarz 2 % Dispergiermittel	10,59	326,1	1,66 :10
E3	20 % Talkum 9 % Quarz 1 % Dispergiermittel	10,59	326,1	1,66 :10
E4	20 % Talkum 9 % Quarz 1 % Dispergiermittel	10,59	326,1	1,66 :10

Für die Berechnung in Tabelle 32 wurde die Dichte des nassen Epoxy-Acrylats (mit Lösemittel, ohne Füllstoffe und Dispergiermittel) zu 1,10 g/cm³ abgeschätzt. Damit ergibt sich für 70 g Epoxy-Acrylat im nassen Zustand ein Volumen von 63,64 cm³. Durch Belichten und Aushärten gewinnt das Epoxy-Acrylat später nochmals an Dichte, und der Lötstopplack verliert etwa 35 %

seines Nassgewichts. Der Volumenanteil der Füllstoffe bezogen auf das ausgehärtete restliche Epoxy-Acrylat-Volumen nimmt so weiter zu.

In **Tabelle 33** ist auf Basis von Tabelle 32 angegeben, wie sich der Volumenanteil an Füllstoffen sowie die Menge des Dispergiermittels auf die Oberfläche der Füllstoffe im Vergleich zum Ursprungslack A1 verhält. Dabei wurde aufgrund ähnlicher Ölzahl angenommen, dass Quarzmehl und Talkum ähnlich viel Dispergiermittel adsorbieren. Bei Bariumsulfat wird aufgrund einer geringeren Ölzahl vermutet, dass dieses weniger Dispergiermittel adsorbieren kann.

Auf Basis dieser beiden Tabellen wurden Modelle entwickelt, welche die Migration der unterschiedlichen Lackvarianten im Vergleich zu Lackvariante A1 beschreiben.

Tabelle 33: Lackvariationen mit Abschätzung des Volumenanteils an Füllstoffen auf das Bindemittel und Abschätzung des Dispergiermittelbedarfs/überflusses im Vergleich zu Lackvariante A1.

	VOLUMENANTEIL FÜLLSTOFFE	DISPERGIERMITTEL AUF OBERFLÄCHE FÜLLSTOFFE	TENDENZ
A1	A1	A1	-
C	geringer als A1	-	Dispergier- mittelmangel
D2	höher als A1	geringer als A1	
H	A1	geringer als A1	
E1	A1	0	
D1	geringer als A1, aber lange Füllstoffe	höher als A1	Dispergier- mittelüber- schuss
E2	A1	höher als A1	
D3	geringer als A1	geringer als A1, aber Bariumsulfat ist ande- rer Füllstoff mit unbekannter Affinität zu D_A	unbekannt
E3	A1	unbekannt	
E4	A1	unbekannt	

9.2.2.2 Tendenz zu Dispergiermittelmangel

Durch einen Dispergiermittelmangel berühren sich die Füllstoffe. An den Berührungspunkten wird bevorzugt Feuchte absorbiert, da der Füllstoff ohne Dispergiermittel nur unzureichend in das umliegende Bindemittel eingebunden ist. Auch können sich durch einen Dispergiermittelmangel Agglomerate bilden, welche im Lack sedimentieren. Durch Flokkulation wird Bindemittel innerhalb eines Agglomerats eingeschlossen. UV-Licht zur Belichtung des Lacks kann so

nicht bis in das Agglomerat vordringen, sodass das eingeschlossene Bindemittel lediglich thermisch, nicht aber unter UV vernetzt. An den unvernetzten Acrylgruppen innerhalb des Agglomerats wird weitere Feuchte absorbiert (Details in Abschnitt 6.5.8).

Lackvariante H

Für die Herstellung von Lackvariante H wurden feiner vermahlene Füllstoffe verwendet als bei Ursprungsvariante A1.



Abbildung 86: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante H.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 86** entnommen werden. An 99 % der untersuchten Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Im direkten Vergleich mit Lackvariante A1 erscheinen die AMP-Pfade weniger verzweigt.

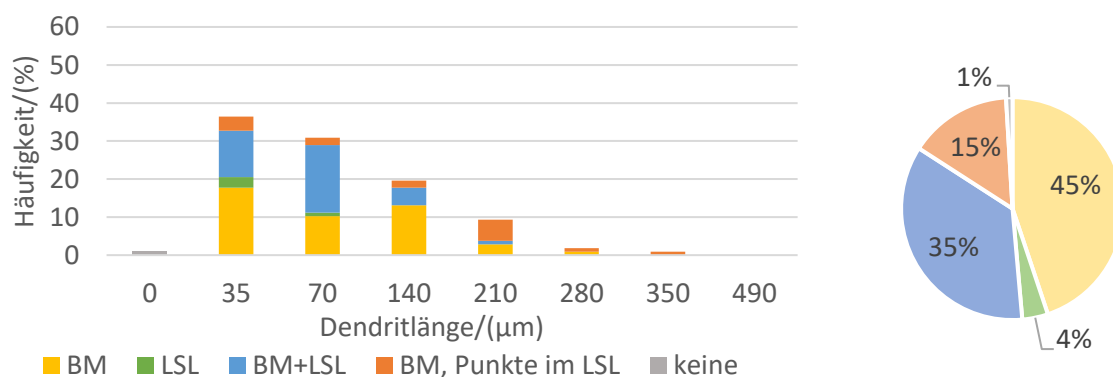


Abbildung 87: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante H. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade von Lackvariante H kann **Abbildung 87** entnommen werden. Bei 4 % der Leiterbahnspitzen findet das AMP rein im Lötstopplack statt. Dies ist ähnlich selten wie auch schon bei Lackvariante A1. Auffällig ist,

dass die Anzahl der AMP-Pfade, die rein im Basismaterial beobachtet werden können, mit 45 % bei Lackvariante H höher ausfallen als bei A1 mit 22 %.

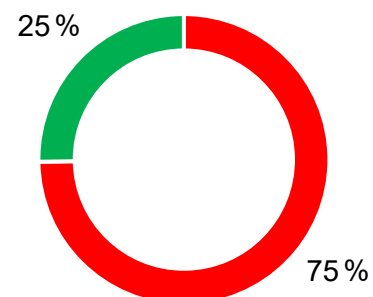
Tabelle 34: Länge der AMP-Pfade bei Lack H an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK H		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	MW l_H	44 ± 4	90 ± 1	72 ± 1	153 ± 6	90 ± 7
	Maximum	70	280	210	350	350
	Minimum	35	35	35	35	0
ANZAHL LB		4	48	38	16	107
$(l_H - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		$(-17 \pm 21) \%$	$(-63 \pm 1) \%$	$(-58 \pm 1) \%$	$(-41 \pm 2) \%$	$(-58 \pm 3) \%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann Tabelle 34 entnommen werden. Auffällig ist, dass alle AMP-Pfade, unabhängig von der Migrationsebene kürzer sind als bei Lackvariante A1. Die im Mittel längsten AMP-Pfade finden sich vollständig oder teilweise im Basismaterial. Die kürzesten AMP-Pfade treten mit im Mittel 44 μm rein im Lötstopplack auf. Die Länge der anodischen Migrationsphänomene rein im Basismaterial zeigt durch die feinere Vermahlung der Füllstoffe im Lötstopplack mit um 63 % kürzeren AMP-Pfaden die größte Veränderung. Insgesamt fällt der Mittelwert der AMP-Länge im Vergleich zu A1 um 58 % geringer aus. Bei 1 % der untersuchten Leiterbahnspitzen kann kein AMP festgestellt werden.

Tabelle 35: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack H zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal und minimal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack H mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK H		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_H	16 ± 1
	Maximum	70
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		107
$l_H - l_{A1}/l_{A1} \cdot 100 \%$		$(-36 \pm 5) \%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 35** entnommen werden. Zwischen einem Viertel der Leiterbahnen finden sich keine AMP-Pfade. Auch die Anfälligkeit der Leiterbahnstrukturen für AMP zwischen den Leiterbahnen hat sich um 36 % im Vergleich zu Lackvariante A1 verbessert, wobei die maximal auftretende AMP-Länge keine Änderung zu Lackvariante A1 zeigt.

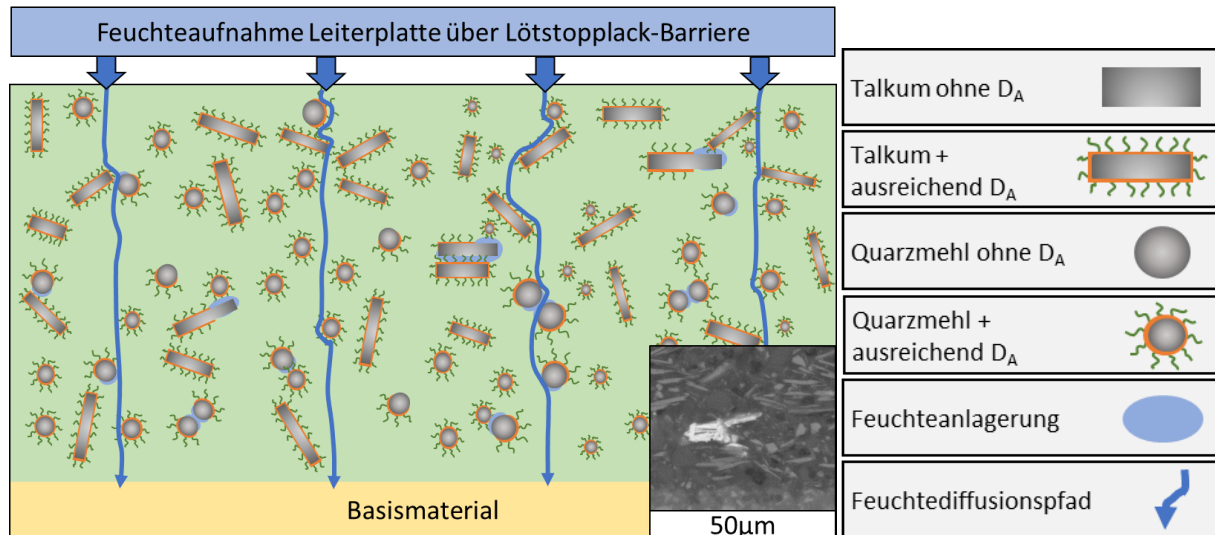


Abbildung 88: Lackvariante H, Modell der Einbindung der Füllstoffe Talkum und Quarz in den Lötstopplack mittels des sterisch wirkenden Dispergiemittels D_A . Die Füllstoffe wurden im Vergleich zu Lackvariante A1 feiner vermahlen und sind aus diesem Grund feiner. Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu, aus diesem Grund ist zusätzlich eine REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung des Lacks eingezeichnet.

Die Folgen einer feineren Vermahlung der Füllstoffe auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial sind im Modell des Lacks H in **Abbildung 88** skizziert.

Wie in Tabelle 32 ersichtlich bleibt das Verhältnis von Füllstoffvolumen zu Lackvolumen gleich. Durch die feinere Vermahlung der Füllstoffe ist aber die Barrierewirkung des Lacks gegen Diffusion von Feuchte in die Leiterplatte geringer: Durch eine geringere Anzahl an Verzweigungen der Feuchtediffusionspfade im Lötstopplack gelangt die Feuchte homogener verteilt in das Basismaterial, wodurch im Basismaterial weniger Orte mit besonders hoher Feuchte vorliegen. Dies ist für die geringere Verzweigung der beobachteten Migrationspfade im Vergleich zu Lackvariante A1 verantwortlich.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack bei Lackvariante H, ist im Vergleich zu Lackvariante A1 verringert aufgrund des verkleinerten Füllstoffvolumens der einzelnen Füllstoffe durch die feinere Vermahlung. Dadurch besteht ein geringeres Risiko, dass sich vor allem die länglichen Talkumpartikel berühren und sich entlang dieser ein leitfähiger Pfad im Lötstopplack ausbildet. Dies hat zur Folge, dass bei Lackvariante H weniger AMP im Lötstopplack und dafür vermehrt rein im Basismaterial auftreten.

Die Folgen einer feineren Vermahlung der Füllstoffe auf die Flokkulation der Füllstoffe

kann Abbildung 88 entnommen werden. Durch die mit der feineren Vermahlung einhergehende Oberflächenvergrößerung, siehe Tabelle 32, zeigt Lackvariante H die Tendenz zu einem Dispergiermittelmangel, wodurch die Füllstoffe flokkulieren. Durch das verkleinerte Volumen der Füllstoffe ist aber die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Füllstoffe trotz Dispergiermittelmangel berühren und Agglomerate bilden, verringert. Die sich dennoch bildenden Agglomerate sedimentieren durch die sperrige, längliche Form des Talkums weniger häufig als bei Lackvariante D2 (in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben).

Lackvariante C

Bei Lackvariante C sind weder Talkum noch Quarzmehl als Füllstoffe, noch Dispergiermittel beigegeben. Die Partikel, welche im REM-Bild sichtbar werden, sind auf das dem Lack beigegebene Mattierungsmittel zurückzuführen.

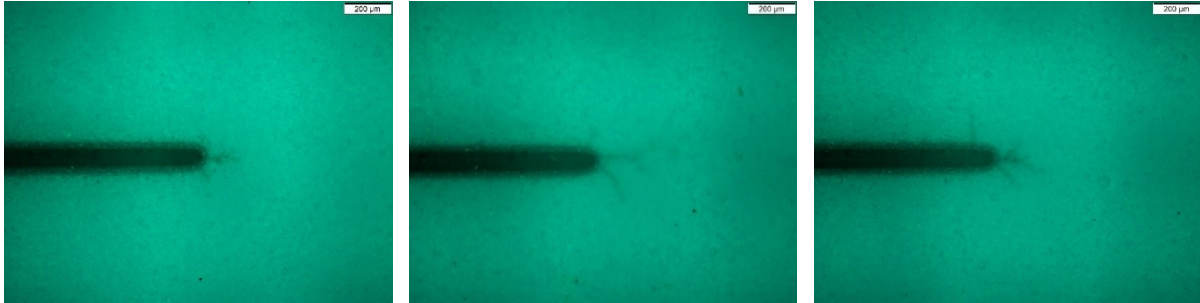


Abbildung 89: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante C.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante C an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 89** entnommen werden. An 98 % der untersuchten Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Im direkten Vergleich mit Lackvariante A1 erscheinen die AMP-Pfade deutlich weniger verzweigt.

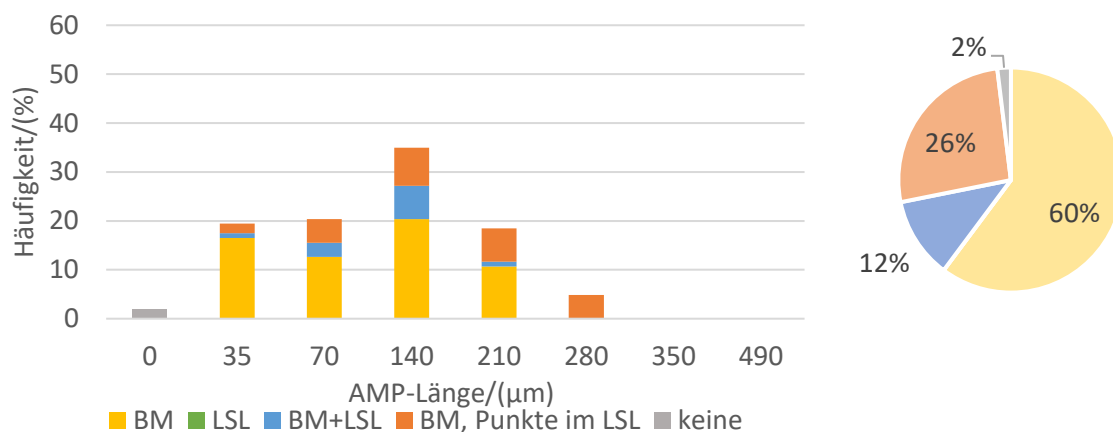


Abbildung 90: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante C. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 90** entnommen werden. An keiner der untersuchten Leiterbahnspitzen konnte ein AMP rein im Lötstopplack detektiert werden, ähnlich wie auch schon bei Lackvariante A1. Auffällig ist, dass die AMP-Pfade, die rein im Basismaterial beobachtet werden können, mit 60 % bei Lackvariante C deutlich höher ausfallen als bei Lackvariante A1 mit 22 %. Auch die AMP-Pfade, die

teilweise im Basismaterial und Lötstopplack beobachtet werden können, fallen mit 12 % im Vergleich zu 39 % bei A1 deutlich geringer aus.

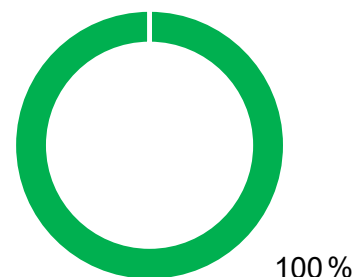
Tabelle 36: Länge der AMP-Pfade bei Lack C an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK C		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	MW l_c	0	109 ± 1	120 ± 4	163 ± 3	122 ± 7
	Maximum	0	210	210	280	280
	Minimum	0	35	35	35	0
ANZAHL LB		0	62	12	27	103
$(l_c - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		-100 %	$(-56 \pm 1) \%$	$(-30 \pm 2) \%$	$(-37 \pm 1) \%$	$(-44 \pm 4) \%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann Tabelle 36 entnommen werden. Auffällig ist, dass alle AMP-Pfade, unabhängig von der Migrationsebene, kürzer sind als bei Lackvariante A1. Anders als bei Lackvariante A1 wurden keine Migrationseffekte rein im Lötstopplack beobachtet. Der Mittelwert der AMP-Länge ist um -44 % im Vergleich zu A1 reduziert.

Tabelle 37: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack C zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack C mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK C		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_c	0
	Maximum	0
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		103
$(l_c - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		-100 %



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann Tabelle 37 entnommen werden. Auffällig ist, dass zwischen den Leiterbahnen keine AMP-Pfade detektiert werden konnten.

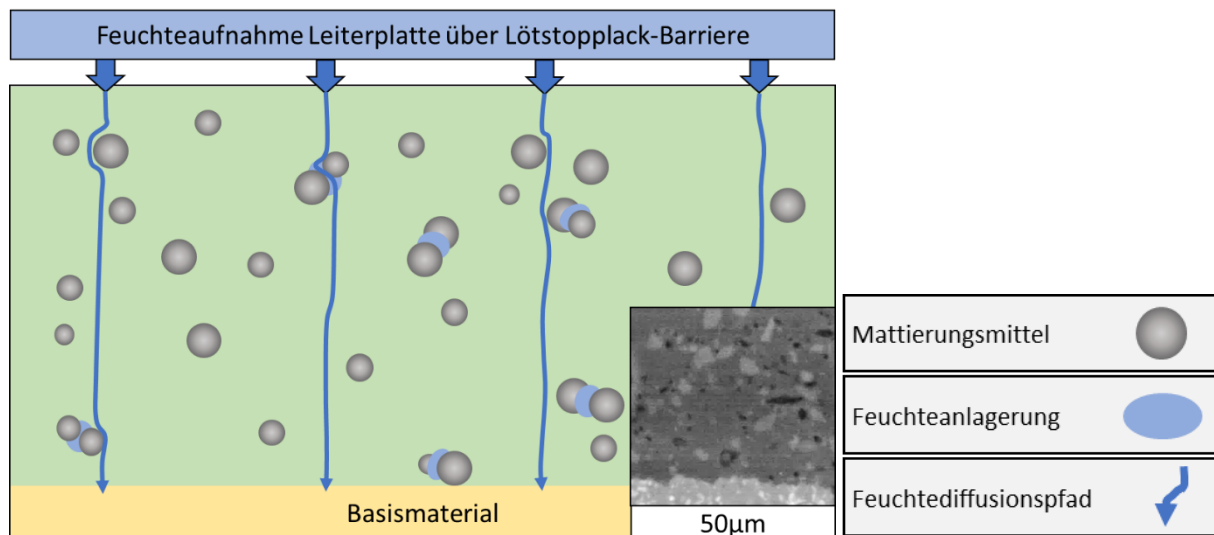


Abbildung 91: Lackvariante C, Modell ohne Füllstoffe und ohne Dispergiermittel. Jedoch ist in dieser Lackvariante deutlich das beigegebene Mattierungsmittel aus mikrometerskaligen SiO_2 -Partikeln zu erkennen. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Es ist zusätzlich eine REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung des Lacks eingezeichnet.

Der Einfluss des Entfalls von Füllstoffen oder Dispergiermitteln im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial ist im Modell des Lacks C in **Abbildung 91** skizziert. Da außer dem Mattierungsmittel keine Füllstoffe die Feuchtediffusion ins Basismaterial ablenken, gelangt die Feuchte homogen verteilt ins Basismaterial und es liegen keine Orte mit besonders hoher Feuchte im Basismaterial vor. Dadurch fällt dass AMP deutlich kürzer und geradliniger aus als bei A1. Es kommt im Vergleich zu Lack A1 zu deutlich kürzeren AMP-Pfaden, wobei an 2 % der untersuchten Leiterbahnspitzen kein AMP beobachtet werden konnte. Zwischen den Leiterbahnen kann kein AMP beobachtet werden. Die geringere elektrische Feldstärke zwischen den Leiterbahnen im Vergleich zur Leiterbahnspitze reicht nicht aus, dass Kupferionen entlang der feineren Feuchtepfade migrieren.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack bei Lackvariante C, welche zu einem verstärkten Auftreten des AMP im Lötstopplack führen, ist im Vergleich zu Lackvariante A1 deutlich verringert, da keine Füllstoffe und lediglich das Mattierungsmittel im Lötstopplack vorliegen. Dies führt dazu, dass bei Lackvariante C die meisten Migrationspfade im Basismaterial auftreten, keine Migrationspfade rein im Lötstopplack und nur 12 % der Pfade teilweise im Lötstopplack und Basismaterial. In [50] wurde die Feuchteaufnahme von ungefülltem und gefülltem Harz gemessen. Es wurde festgestellt, dass Harz mit Füllstoffen mehr Feuchte als ungefülltes aufnimmt. Das wird darauf zurückgeführt, dass sich die Feuchte im gefüllten Harz zusätzlich an der Harz-Füllstoff-Grenzfläche anlagert. Dieser Befund bestätigt die hier gemachten Beobachtungen.

Der Einfluss des Entfalls von Füllstoffen oder Dispergiermitteln im Lötstopplack auf die Flokkulation des Mattierungsmittels kann ebenfalls Abbildung 91 entnommen werden. Das

Nichtvorhandensein von Dispergiermittel kann eine unvollständige Dispergierung der Mattierungspartikel mit einhergehender Agglomeration und Ausbildung eines Feuchtepfs zur Folge haben. Aufgrund der geringen Verteilungsdichte ist dies aber vernachlässigbar.

Lackvariante D2

Bei Lackvariante D2 ist nur Quarzmehl als Füllstoff beigegeben, im annähernd gleichen Gewichtsprozent wie in Lackvariante A1 die Füllstoffe Talkum und Quarzmehl. Da Quarzmehl eine geringere Dichte als Talkum aufweist ist die Anzahl an Füllstoffen pro Bindemittelanteil leicht erhöht im Vergleich zu Lackvariante A1 (Tabelle 32).

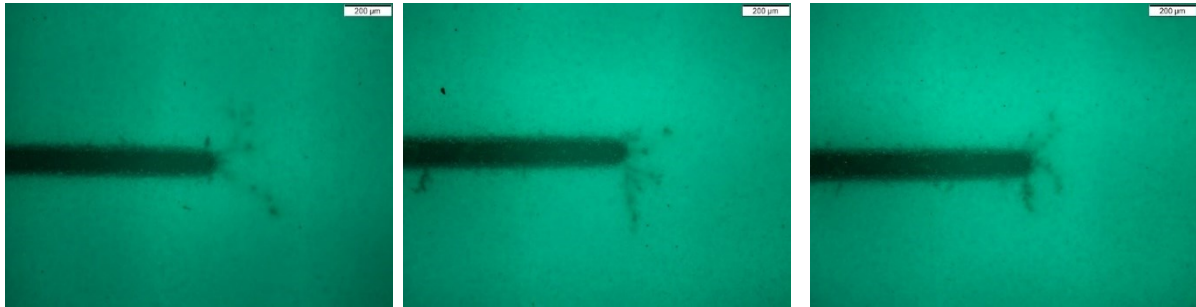


Abbildung 92: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante D2.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante D2 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 92** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die AMP-Pfade zeigen kurze Verzweigungen.

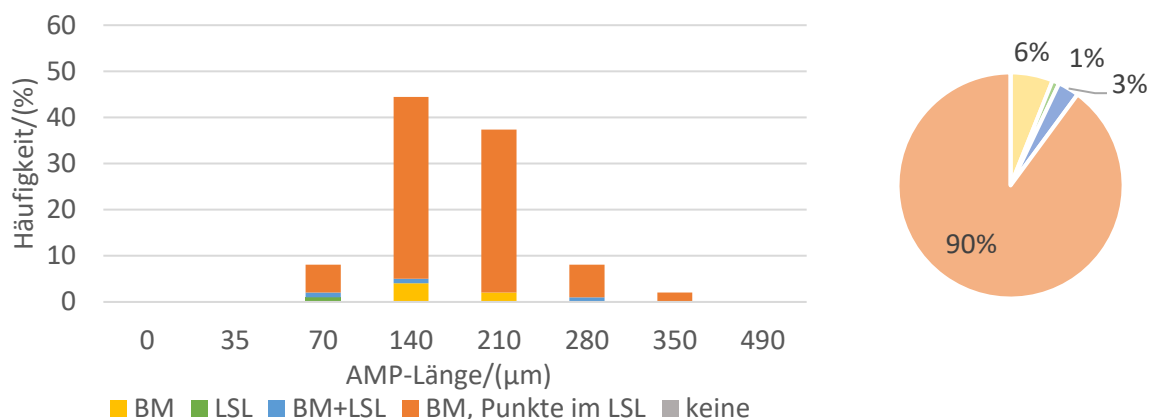


Abbildung 93: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante D2. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 93** entnommen werden. Auffällig ist, dass die AMP-Pfade, die im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack beobachtet werden können, von 37 % bei Lackvariante A1 auf mit 90 % nahezu alle Leiterbahnspitzen bei Lackvariante D2 angestiegen sind. Damit findet das AMP hauptsächlich im Basismaterial mit Migrationsendpunkten im Lötstopplack statt.

Tabelle 38: Länge der AMP-Pfade bei Lack D2 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

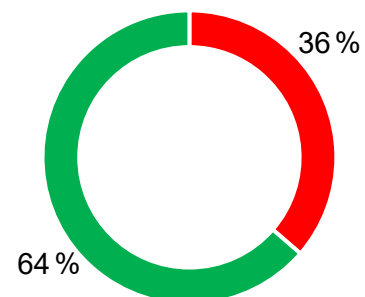
LACK D2		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	Mittelwert l_{D2}	70 ± 0	163 ± 6	163 ± 36	179 ± 1	176 ± 6
	Maximum	70	210	280	350	350
	Minimum	70	140	70	70	70
ANZAHL LB		1	6	3	89	99
$(l_{D2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(+33 \pm 0)\%$	$(-33 \pm 3)\%$	$(-5 \pm 20)\%$	$(-32 \pm 1)\%$	$(-19 \pm 4)\%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann Tabelle 38 entnommen werden. Auffällig ist, dass fast alle AMP-Pfade kürzer sind als bei Lackvariante A1. Lediglich die Pfadlänge der AMP rein im Lötstopplack nimmt um 33 % höhere Werte an, die AMP-Länge teilweise im Basismaterial und Lötstopplack um 5 % höhere Werte im Vergleich zu A1. Jedoch konnte hier nur bei einer, beziehungsweise drei Leiterbahnspitzen ein AMP beobachtet werden, wodurch dieser Effekt bei der Interpretation der Einflussfaktoren auf das AMP vernachlässigt werden kann.

Mit um 33 % und 32 % geringeren AMP-Längen als bei A1 zeigen die AMP-Pfade rein im Basismaterial und im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack die größte relative Differenz zu A1. Insgesamt fällt der Mittelwert der AMP-Länge um 19 % geringer aus als bei A1. Im direkten Vergleich der AMP-Längen in den unterschiedlichen Migrationsebenen sind die Pfadlängen mit im Mittel 70 μm im Lötstopplack am kürzesten.

Tabelle 39: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack D2 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack D2 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK D2		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{D2}	9 ± 1
	Maximum	40
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		99
$(l_{D2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-63 \pm 6)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 39** entnommen werden. Zwischen 64 % der Leiterbahnen findet keine anodische Migration statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel und Maximum kürzer als bei Lackvariante A1.

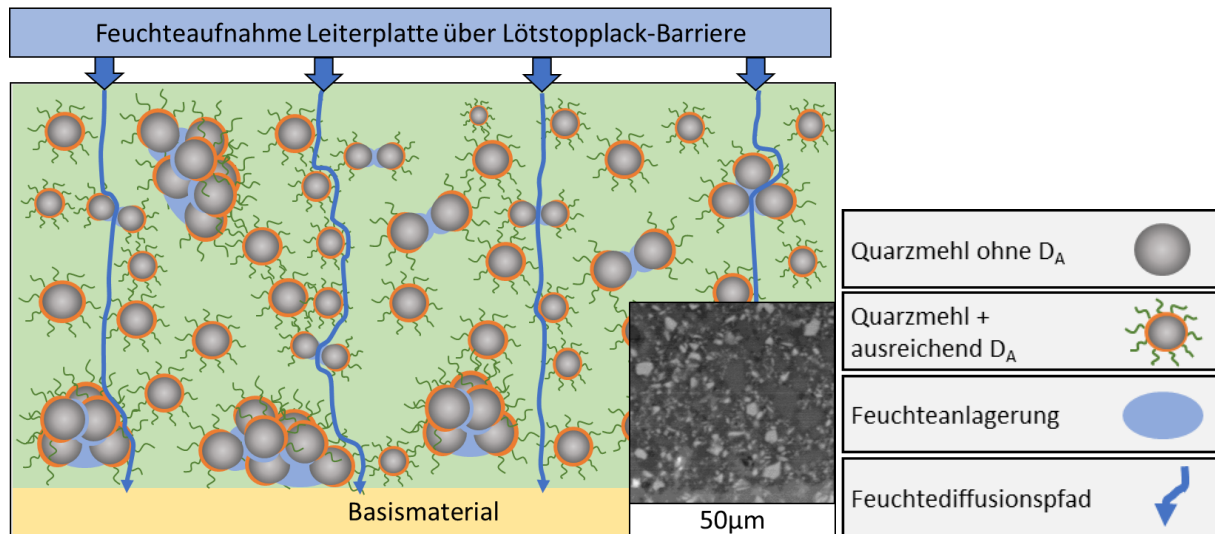


Abbildung 94: Lackvariante D2, Modell der Einbindung von nur Quarzmehl in den Lötstopplack mittels des sterisch wirkenden Dispergiermittels D_A . Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Es ist zusätzlich eine REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung des Lacks eingezeichnet.

Die Folgen von lediglich SiO_2 -Füllstoffpartikeln im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial sind im Modell des Lacks D2 in **Abbildung 94** skizziert. Da die im Vergleich zu Talkum kleineren SiO_2 -Füllstoffe kaum die Feuchtediffusionspfade in die Leiterplatte ablenken, ist davon auszugehen, dass die Feuchte homogen verteilt ins Basismaterial gelangt.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack bei Lackvariante D2 ist im Vergleich zu Lackvariante A1 verringert. Dies ist wahrscheinlich auf die geringere Größe der SiO_2 -Partikel im Vergleich zu Talkumpartikeln zurückzuführen. Zwar verfügen sie über eine etwas geringere Dichte als Talkumpartikel, was zu einer leichten Zunahme des Volumenverhältnisses von Epoxidharz zu Füllstoffen nach Tabelle 32 führt, dies ist aber vernachlässigbar. Die Wahrscheinlichkeit, dass sich ein leitfähiger Pfad im Lötstopplack entlang der Füllstoffe ausbildet, ist durch die kleinere Größe der einzelnen SiO_2 -Partikel im Vergleich zu Lackvariante A1 verringert. Dies führt dazu, dass bei Lackvariante D2 in nur 1 % bis 3 % der anodischen Kammspitzen das AMP vollständig oder teilweise im Lötstopplack auftritt.

Die Folgen von lediglich SiO₂-Füllstoffpartikeln im Lötstopplack auf die Flokkulation der Füllstoffe kann Abbildung 94 entnommen werden. Die mit Dispergiermittel zu benetzende Oberfläche ist erhöht im Vergleich zu A1, was zu einem höheren Bedarf an Dispergiermittel führt (Tabelle 36, Tabelle 37). Durch den Dispergiermittelmangel und die möglicherweise daraus resultierende, nicht mehr vollständige Benetzung der SiO₂-Partikel kommt es zu einer Destabilisierung der Füllstoffe: Die Füllstoffe bleiben nach dem Dispergiervorgang nicht im deflokkulierten Zustand und bilden Agglomerate. Innerhalb der Agglomerate kann Bindemittel eingeschlossen werden, welches nicht vollständig an der Belichtung des Lacks teilnimmt. Dies führt zu einer erhöhten Feuchtaufnahme an den agglomerierten Füllstoffen (Details in Abschnitt 5.4).

Zusätzliche Feuchte wird an den Berührungspunkten der Füllstoffe absorbiert, da diese nur unzureichend in das umliegende Bindemittel eingebunden sind.

Die besondere Art der anodischen Migration bei Lackvariante D2, bei der bei 90 % der Migrationspfade an der Leiterbahnspitze immer wieder entlang des Migrationspfads im Basismaterial ein punktförmiger AMP-Pfad in den Lötstopplack auftaucht und dort endet, ist auf die Sedimentation der SiO₂-Agglomerate zurückzuführen.

Aufgrund der tendenziell höheren Feuchtaufnahme des Basismaterials nach Abschnitt 5.2 und [65] wird sich dort bevorzugt, wenn kein äquivalenter feuchtereicher Pfad im Lötstopplack vorliegt, der AMP-Pfad ausbilden. Bei Lackvariante D2 tritt so kein vollständiger horizontaler Feuchtepfad im Lötstopplack auf.

Das Auftauchen des AMP-Pfads in den Lötstopplack kann darauf zurückgeführt werden, dass an dem Ort, an dem die Migration in den Lötstopplack auftaucht, ein mit Feuchte angelagertes Agglomerat aus SiO₂-Partikeln sedimentiert ist und so in der Nähe des Basismaterials zu finden ist. Zusätzlich sorgt die inhomogene Feuchteverteilung in Basismaterialnähe für die Verzweigung der AMP-Pfade. Verglichen mit Lackvariante E1, bei der wie später beschrieben ebenfalls Agglomeratbildung auftritt, sedimentieren die im Vergleich zu Talkum wesentlich kleineren SiO₂-Füllstoffpartikel häufiger.

Lackvariante E1

Lackvariante E1 enthält wie auch die Ursprungslackvariante A1 Talkum und Quarzmehl als Füllstoffe im gleichen Gewichtsprozent, jedoch wurde dem Lack kein Dispergiermittel hinzugefügt.



Abbildung 95: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante E1.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante E1 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 95** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Im direkten Vergleich mit Lackvariante A1 erscheinen die AMP-Pfade weniger verzweigt, zeigen aber eine etwas deutlichere Verzweigung als der füllstofffreie Lack C.

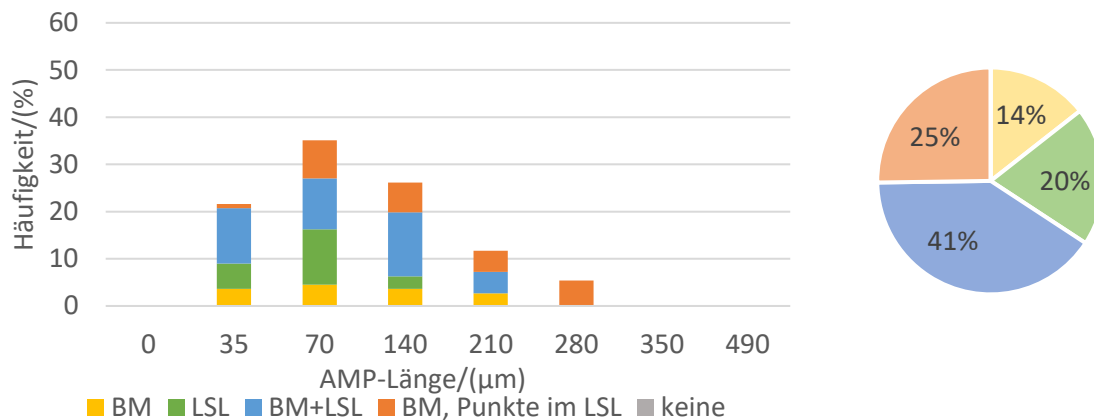


Abbildung 96: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante E1. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 96** entnommen werden. Es fällt auf, dass die Häufigkeit der AMP-Pfade rein im Lötstopplack mit 20 % der Leiterbahnspitzen bei Lackvariante E1 höher ausfällt als bei A1 mit 2 %. Der Anteil an AMP-Pfaden, die teilweise im Lötstopplack und Basismaterial auftreten, ist mit 41 % in etwa der gleiche wie bei A1 mit 39 %. Im Basismaterial treten die AMP-Pfade mit 14 % der Leiterbahnspitzen seltener auf als bei Lackvariante A1 mit 22 %.

Tabelle 40: Länge der AMP-Pfade bei Lack E1 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK E1		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	MW l_{E1}	72 ± 2	105 ± 4	100 ± 1	155 ± 3	109 ± 7
	Maximum	140	210	210	280	280
	Minimum	35	35	35	35	35
ANZAHL LB		22	16	45	28	111
$(l_{E1} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(+37 \pm 32)\%$	$(-57 \pm 2)\%$	$(-42 \pm 1)\%$	$(-40 \pm 1)\%$	$(-50 \pm 4)\%$

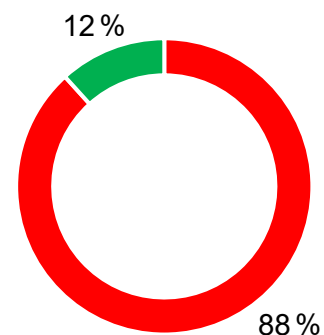
Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann Tabelle 40 entnommen werden. Auffällig ist, dass fast alle AMP-Pfade kürzer sind als bei Lackvariante A1. Lediglich die Pfadlänge der AMP rein im Lötstopplack nimmt zu. Dies zeigt, dass fehlendes Dispergiermittel im Lack zu längeren AMP-Pfaden im Lötstopplack führt und diese zusätzlich mit 20 % der Leiterbahnspitzen häufiger auftreten.

Die AMP-Längen rein im Basismaterial fallen um 57 % geringer aus als bei A1 und zeigen damit die größte Veränderung.

Mit um 42 % und 40 % kürzeren AMP-Pfaden teilweise im Lötstopplack und Basismaterial und im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack ist eine etwas geringere Veränderung detektierbar. Insgesamt nimmt der Mittelwert der AMP-Länge um 50 % geringere Werte an. Im direkten Vergleich der AMP-Längen in den unterschiedlichen Migrationsebenen sind wie auch schon bei den vorhergehenden Lötstopplackvarianten die Pfadlängen im Lötstopplack am kürzesten.

Tabelle 41: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack E1 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack E1 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK E1		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{E1}	20 ± 1
	Maximum	70
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		111
$(l_{E1} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-19 \pm 5)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 41** entnommen werden. Zwischen 12 % der Leiterbahnen findet keine anodische Migration statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 19 % kürzer als bei Lackvariante A1, die maximale AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen ist aber äquivalent derer der Ursprungslackvariante.

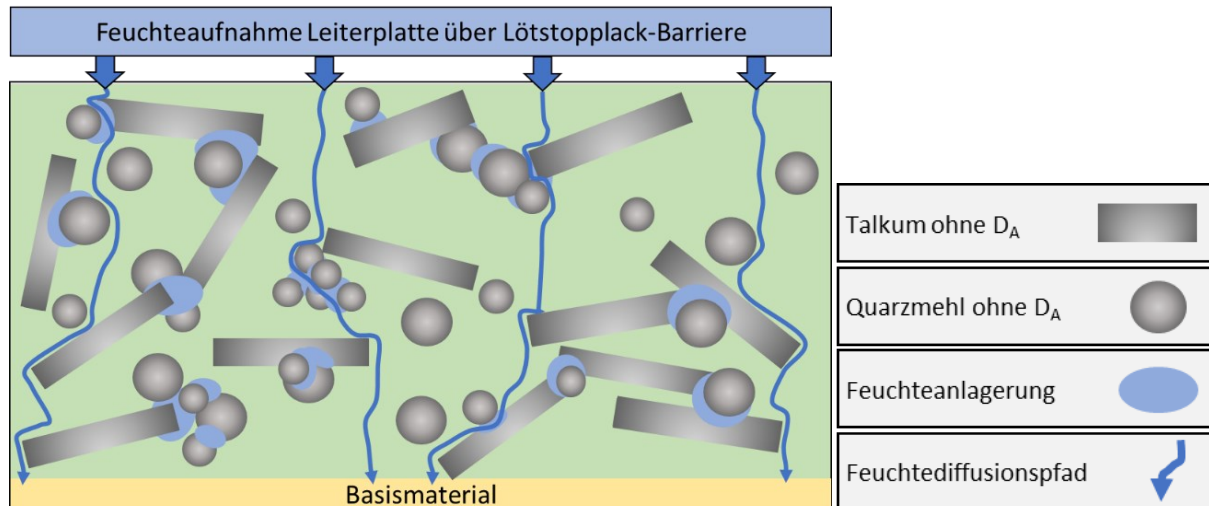


Abbildung 97: Lackvariante E1, Modell des Lacks mit den Ursprungsfüllstoffen Talkum und Quarzmehl ohne Dispergiermittel D_A . Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu.

Der Einfluss des fehlenden Dispergiermittels im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial ist im Modell des Lacks E1 in **Abbildung 97** skizziert. Die Feuchtediffusionspfade in die Leiterplatte werden aufgrund von flokkulierenden Füllstoffen mehr abgelenkt als bei Lackvariante A1. Die Zunahme der AMP-Pfade im Lötstopplack im Vergleich zu Lackvariante A1 führt dazu, dass die Verzweigung der AMP-Pfade geringer ausfällt als bei A1.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack bei Lackvariante E1 ist im Vergleich zu Lackvariante A1 stark erhöht. Das fehlende Dispergiermittel erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass sich Füllstoffe berühren, entlang derer sich ein leitfähiger Pfad im Lötstopplack ausbildet. Sich berührende längliche Talkumpartikel bilden für eine horizontale Feuchtepfausbildung im Lötstopplack ein besonders hohes Risiko.

Die häufige Ausbildung leitfähiger Pfade im Lötstopplack führt dazu, dass sich in 20 % der untersuchten Leiterbahnspitzen das AMP rein im Lötstopplack ausbildet. Auch die Länge der Pfade im Lötstopplack im Vergleich zu A1 fällt um 33 % höher aus.

Der Einfluss des fehlenden Dispergiermittels im Lötstopplack auf die Flokkulation der Füllstoffe kann **Abbildung 97** entnommen werden. Da kein Dispergiermittel beigegeben ist, besteht in dieser Lackvariante eine besonders hohe Wahrscheinlichkeit für eine Flokkulation

der Füllstoffe. Die Berührungspunkte der Füllstoffe bieten ein hohes Risiko für Feuchteabsorption, da der Füllstoff aufgrund fehlendem Dispergiermittel nicht mehr in das umliegende Bindemittel eingeschlossen ist. Auch besteht durch die Agglomeratbildung die Gefahr von eingeschlossenem Bindemittel, welches nicht unter UV vernetzen kann, wodurch sich lokal eine erhöhte Feuchteabsorption ergibt (Details in Abschnitt 6.5.8).

Durch die lokal erhöhte Feuchte an sich berührenden Füllstoffen und die hohe Wahrscheinlichkeit, dass sich entlang der sich berührenden Füllstoffe ein leitfähiger Pfad im Lötstopplack ausbilden kann, findet sich hier im Vergleich zu Lackvariante A1 ein höherer Anteil von Migrationspfaden innerhalb des Lötstopplacks.

9.2.2.3 Tendenz zu Dispergiertmittelüberschuss

Bei den Lötstopplacken D1 und E2 mit Tendenz zu Dispergiertmittelüberschuss liegt im Lötstopplack eine, bezogen auf die Größe der Füllstoffoberfläche, zu große Dispergiertmittelmenge vor. Dies hat zur Folge, dass nicht alles Dispergiertmittel die Möglichkeit hat, sich mit seinen hydrophilen Haftgruppen an der Füllstoffoberfläche zu verankern. Dies bedingt in der Nähe der Füllstoffoberfläche vermehrt Anhäufungen von Dispergiertmittel. Da die solvatisierbaren Polymerketten so nicht mehr ideal in das Bindemittel reichen und verknäulen können, werden sie nicht mehr optimal mit dem Bindemittel wechselwirken. Der Füllstoff ist schlechter in die Bindemittelmatrix eingebunden. Dies führt zu einer erhöhten Feuchtaufnahme an der Grenzfläche von Füllstoff und Bindemittel.

Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass die Haftgruppen von D_A , welche nicht an die Füllstoffoberfläche gebunden sind, nun mit dem Bindemittel wechselwirken. Möglich wäre beispielsweise eine Vernetzung der Carboxylgruppen des Dispergiertmittels mit dem Epoxidharz in der B-Komponente des Lötstopplacks. Damit würden möglicherweise andere Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels ungebunden bleiben. Die polaren Eigenschaften dieser Carboxylgruppe führen dann zu einer lokal erhöhte Feuchtaufnahme. Es kann somit Feuchte auch im Lack verteilt aufgenommen werden, was die Ausbildung der leitfähigen Pfade auch abseits von Füllstoffgrenzflächen vereinfacht.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Analyseergebnisse des AMP der Lacke mit Tendenz zu Dispergiertmittelüberschuss vorgestellt.

Lackvariante D1

Bei Lackvariante D1 ist lediglich Talkum als Füllstoff im annähernd gleichen Gewichtsprozent wie in Lackvariante A1 Talkum und Quarzmehl sind beigegeben.



Abbildung 98: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante D1.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante D1 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 98** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Im direkten

Vergleich mit Lackvariante A1 erscheinen die AMP-Pfade weniger verzweigt und kürzer und wirken an manchen Stellen verdickt, was sich in einer Verdunklung des AMP-Pfads äußert.

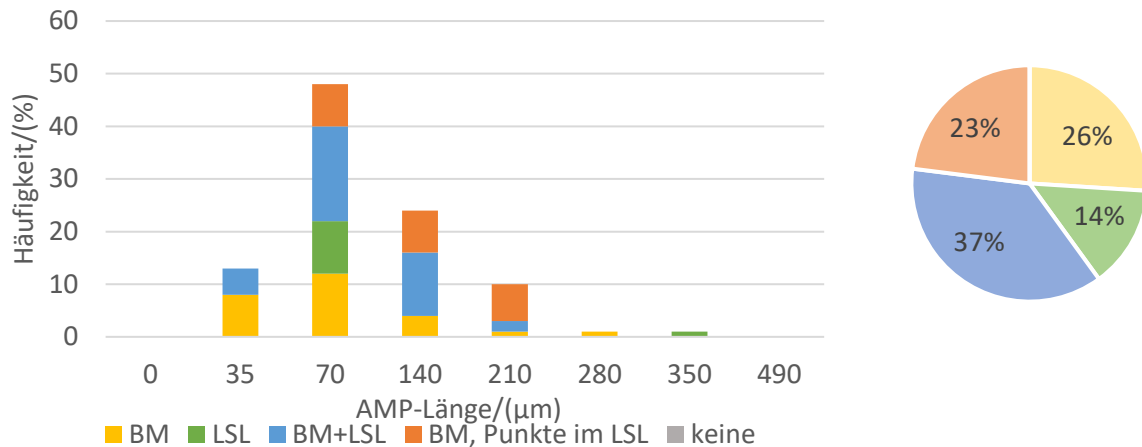


Abbildung 99: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante D1. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade kann **Abbildung 99** entnommen werden. Es fällt auf, dass der Anteil an AMP-Pfaden rein im Lötstopplack mit 14 % höher ausfällt als mit 2 % bei Lackvariante A1. Die AMP-Pfade, die teilweise im Lötstopplack und Basismaterial auftreten, werden mit 37 % vergleichbar häufig wie auch schon bei A1 beobachtet. Rein im Basismaterial und mit Punkten im Lötstopplack treten die anodischen Migrationspfade mit 26 % und 23 % etwas seltener auf als bei A1.

Tabelle 42: Länge der AMP-Pfade bei Lack D1 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK D1		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP-LÄNGE AN DER LB-SPITZE IN µm	MW l_{D1}	95 ± 8	83 ± 2	96 ± 1	137 ± 3	102 ± 6
	Maximum	350	280	210	210	350
	Minimum	70	35	35	70	35
ANZAHL LB		14	26	37	23	100
$(l_{D1} - l_{A1}) / l_{A1} \cdot 100\%$		$(+82 \pm 45)\%$	$(-66 \pm 1)\%$	$(-44 \pm 1)\%$	$(-48 \pm 1)\%$	$(-53 \pm 3)\%$

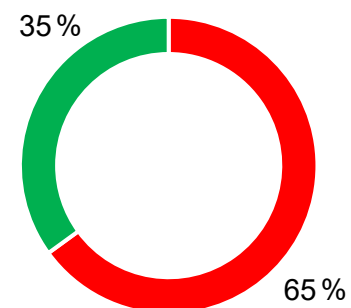
Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 42** entnommen werden. Auffällig ist, dass fast alle AMP-Pfade kürzer sind als bei Lackvariante A1. Lediglich die Pfadlänge der AMP rein im Lötstopplack nimmt höhere Werte an als bei A1.

Dies zeigt, dass Talkum als Füllstoff im Lötstopplack sowie die Tendenz zu einem Dispergiermittelüberschuss zu längeren AMP-Pfaden im Lötstopplack führt und diese zusätzlich mit 14 % der Leiterbahnspitzen häufiger auftreten als bei Lackvariante A1 mit 2 % der Leiterbahnspitzen. Die AMP-Länge rein im Basismaterial fällt 66 % geringer aus als bei A1 und zeigt damit die größte Veränderung der AMP-Längen auf den unterschiedlichen Ebenen.

Eine etwas geringere Änderung ist bei den AMP-Pfaden rein im Basismaterial und teilweise im Lötstopplack und Basismaterial mit um 48 % und 44 % kürzeren AMP-Pfaden zu beobachten. Insgesamt fällt der Mittelwert der AMP-Länge um 53 % geringer aus als bei A1. Es ist keine direkte Tendenz erkennbar, ob die AMP-Pfade im Lötstopplack oder Basismaterial die kürzeste Länge aufweisen.

Tabelle 43: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack D1 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack D1 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK D1		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{D1}	13 ± 1
	Maximum	40
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		100
$(l_{D1} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-46 \pm 5)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 43** entnommen werden. Zwischen 35 % der Leiterbahnen findet keine anodische Migration statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 46 % kürzer als bei Lackvariante A1, die maximale AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen ist mit 40 μm kürzer als bei A1.

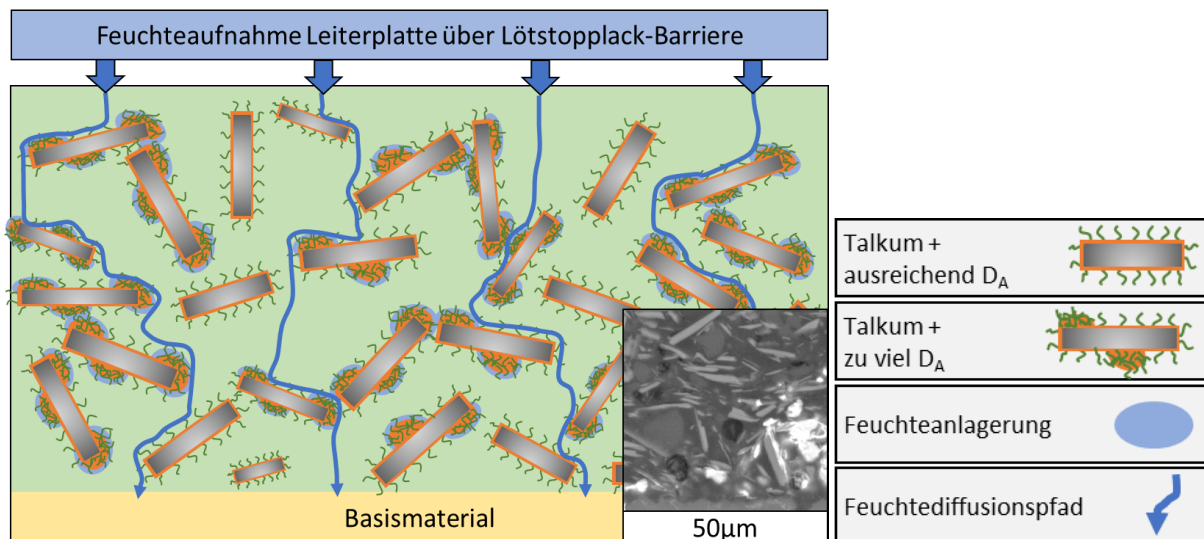


Abbildung 100: Lackvariante D1, Modell der Einbindung von nur Talkum in den Lötstopplack mittels des sterisch wirkenden Dispergiermittels D_A . Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Es ist zusätzlich eine REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung des Lacks eingezeichnet.

Der Einfluss von nur Talkum als Füllstoff im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial ist im Modell des Lacks D1 in **Abbildung 100** skizziert. In Abschnitt 2.2.2 ist als eine der Eigenschaften, die Talkum als Füllstoff mit sich bringt, bereits beschrieben, dass durch seine Struktur der Feuchtediffusionspfad verlängert wird. Dies wird durch Ablenkung der Diffusionspfade in den Lötstopplack in **Abbildung 100** sichtbar. Feuchte diffundiert, wie auch schon bei Lackvariante A1, nicht homogen verteilt ins Basismaterial, was die Verzweigung der AMP-Pfade bei Lackvariante D1 verursacht. Die AMP-Pfade erscheinen etwas weniger verzweigt und verdickt als bei A1, da mehr AMP-Pfade rein im Lötstopplack auftreten.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack bei Lackvariante D1, die zu einem verstärkten Auftreten des AMP im Lötstopplack führen, ist durch die längliche Form der Talkumpartikel erhöht. Entlang dieser bildet sich ein Diffusionspfad aus. Die längliche Form der Talkumpartikel sorgt dafür, dass sich die Füllstoffe trotz einer geringeren Füllstoffmenge im Lack im Vergleich zu A1 nach Tabelle 33 so nahe kommen können, dass sich ein leitfähiger Pfad entlang der Talkumpartikel ausbilden kann.

Hinzu kommt, dass durch den Dispergiermittelüberschuss mehr absorbierte Feuchte im Lötstopplack vorliegt, durch die sich ein leitfähiger Pfad ausbilden kann. Dies hat zur Folge, dass sich mit 14 % der Kammspitzen mehr AMP-Pfade im Lötstopplack ausbilden als bei Lackvariante A1 und diese auch um 82 % länger sind als bei A1.

Der Einfluss von Talkum im Lötstopplack auf die Flokkulation der Füllstoffe kann **Abbildung 100** entnommen werden. Durch die Tendenz des Lacks zu Dispergiermittelüberschuss

ist eine Flokkulation der Füllstoffe nicht gegeben. Da Talkum aber über ein sehr ausgedehntes Volumen verfügt, besteht ein Risiko für ein Verkanten der Talkum-Füllstoffe. Liegt dort zusätzlich ein besonders hoher Anteil von nicht an der Füllstoffoberfläche verankerten hydrophilen Ankergruppen vor, so kann sich dort besonders viel Feuchtigkeit ansammeln und mit ihr besonders viel migriertes Material, was die Verdickung der AMP-Pfade erklärt. Auch sorgt eine Verkantung der Talkumpartikel dafür, dass Bindemittel zwischen den Füllstoffen eingeschlossen wird. Dieses wird nicht durch UV ausgehärtet, wodurch sich an nicht abreagierten Acrylgruppen weitere Feuchte anlagert (Details in Abschnitt 5.4).

Lackvariante E2

Bei Lackvariante E2 ist die doppelte Dispergiermittelmenge D_A im Vergleich zur Ursprungslackvariante A1 beigegeben.

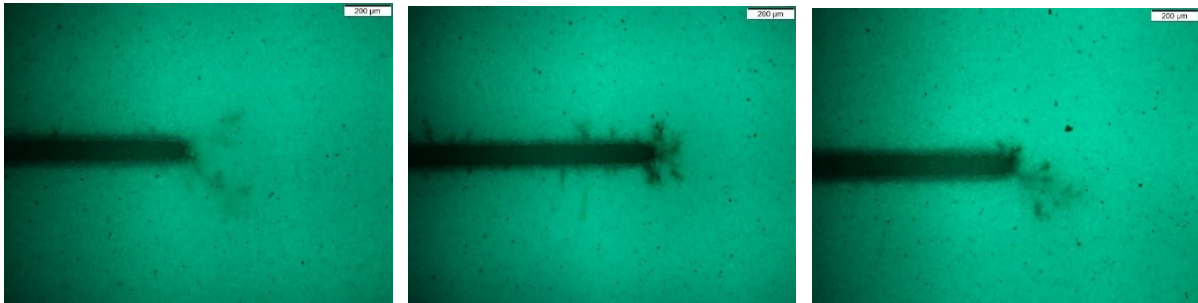


Abbildung 101: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante E2.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante E2 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 101** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Im direkten Vergleich mit Lackvariante A1 erscheinen die AMP-Pfade ähnlich verzweigt.

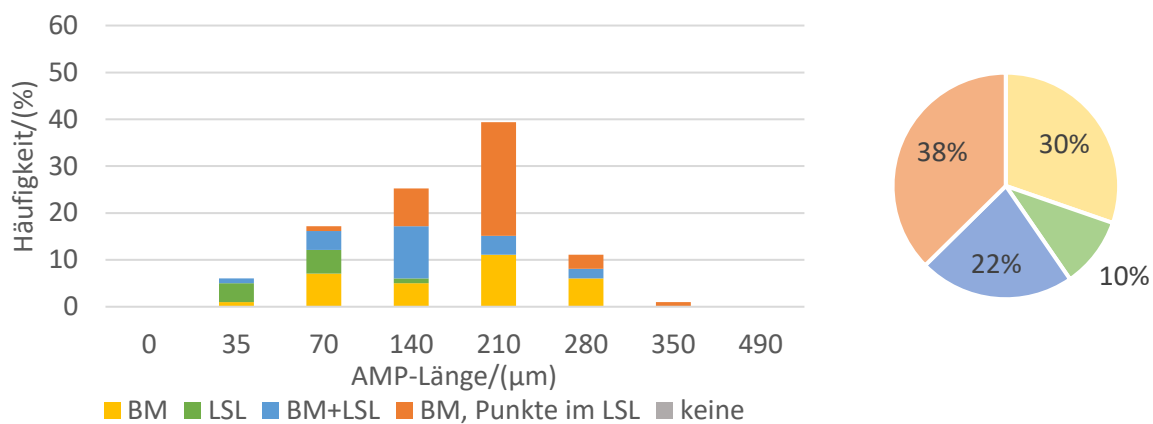


Abbildung 102: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante E2. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 102** entnommen werden. Es fällt auf, dass der Anteil an AMP-Pfaden rein im Lötstopplack mit 10 % der Leiterbahnen größer ist als bei A1 mit 2 % der Leiterbahnen. Die AMP-Pfade, die teilweise im Lötstopplack und Basismaterial auftreten, sind mit 22 % etwas weniger häufig vertreten als bei A1 mit 39 %. Die AMP-Pfade rein im Basismaterial treten mit 30 % etwas häufiger auf als bei A1 mit 22 %. Die AMP-Pfade im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack sind anteilig vergleichbar mit A1 mit 38 %. Zusammengefasst findet das AMP hauptsächlich im Basismaterial statt, wobei die AMP-Pfade, wenn sie im Lötstopplack oder Basismaterial beginnen, dort

ihren Pfad auch bevorzugt fortsetzen. Dies zeigt sich durch den geringeren Anteil an AMP teilweise im Basismaterial und Lötstopplack im Vergleich zu A1, wobei der Anteil an AMP rein im Lötstopplack und rein im Basismaterial verglichen mit A1 etwas höher ausfällt.

Tabelle 44: Länge der AMP-Pfade bei Lack E2 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK E2		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	MW l_{E2}	63 ± 3	174 ± 3	148 ± 3	201 ± 1	167 ± 7
	Maximum	140	280	280	350	350
	Minimum	35	35	35	70	35
ANZAHL LEITERBAHNEN		10	30	22	37	99
$(l_{E2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(+20 \pm 29)\%$	$(-29 \pm 1)\%$	$(-14 \pm 2)\%$	$(-23 \pm 1)\%$	$(-24 \pm 4)\%$

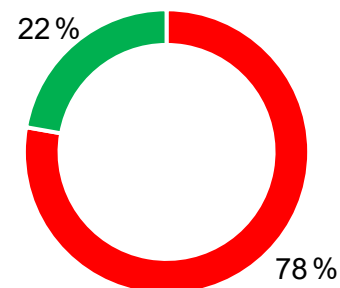
Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 44** entnommen werden. Auffällig ist, dass fast alle AMP-Pfade kürzer sind als bei Lackvariante A1. Lediglich die Pfadlänge der AMP rein im Lötstopplack nimmt im Vergleich zu A1 höhere Werte an. Die AMP-Längen im Basismaterial und im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack fallen um 29 % und 23 % kürzer aus als bei A1 und zeigen damit die größte Veränderung der AMP-Länge in den unterschiedlichen Migrationsebenen.

Um 14 % kürzere AMP-Pfaden werden im Basismaterial und Lötstopplack beobachtet.

Insgesamt weist der Mittelwert der AMP-Länge um 24 % geringere Werte auf als bei A1. Die rein im Lötstopplack auftretenden AMP-Pfade sind im Vergleich zu den Pfaden in anderen Migrationsebenen die kürzesten.

Tabelle 45: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack E2 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack E2 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK E2		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{E2}	17 ± 1
	Maximum	40
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		99
$(l_{E2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-33 \pm 5)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 45** entnommen werden. Zwischen 22 % der Leiterbahnen findet kein AMP statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 33 % kürzer als bei Lackvariante A1, die maximale AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen ist mit 40 µm ebenfalls kürzer als bei A1.

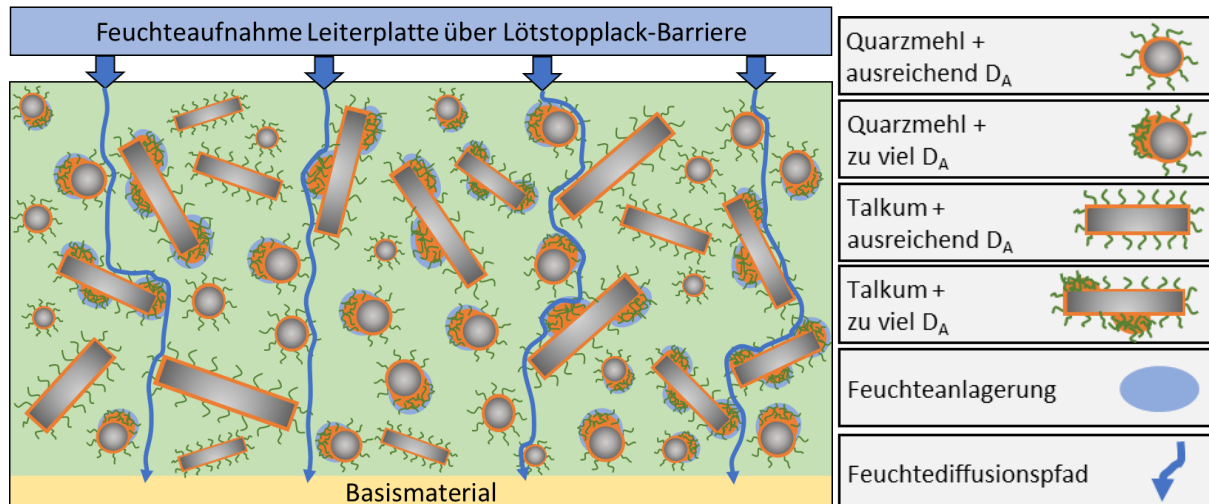


Abbildung 103: Lackvariante E2, Modell der Einbindung von Talkum und Quarzmehl in den Lötstopplack mittels der doppelten Menge des sterisch wirkenden Dispergiermittels D_A . Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Die REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung kann aufgrund gleicher Füllstoffe Lack A1 in Abbildung 75 entnommen werden.

Der Einfluss der doppelten Menge Dispergiermittel im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial sind im Modell des Lacks E2 in **Abbildung 103** skizziert. Der Abstand der Füllstoffe zueinander im Vergleich zur Lackvariante A1 kann durch den Dispergiermittelüberschuss etwas optimiert worden sein, wodurch sich ein horizontaler leitfähiger Pfad im Lötstopplack schwerer ausbildet. Dies kann erklären, warum etwas mehr Migration im Basismaterial stattfindet im Vergleich zu Lack A1. Die Verzweigungsdichte der AMP-Pfade ist ähnlich der bei Lackvariante A1, was sich darauf zurückführen lässt, dass dieselbe Menge und Art Füllstoffe im Lötstopplack E2 sind, wie auch schon bei A1. Demnach sind auch die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial sehr ähnlich.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack bei Lackvariante E2 wird aufgrund des Dispergiermittelüberschusses gleichzeitig erhöht wie erniedrigt. Aufgrund der Ergebnisse der Gruppierung der AMP-Pfade in unterschiedliche Migrationsebenen zeigt sich eine klarere Unterscheidung der AMP-Pfade in Pfade, die rein im Lötstopplack und rein im Basismaterial auftreten. Dies ist an dem im Vergleich zu A1 größeren Anteil der rein im Lötstopplack und rein im Basismaterial auftretenden AMP-Pfade zu erkennen. Der Dispergiermittelüberschuss kann zu einer Feuchteansammlung an den Füllstoffen führen, was die Wahrscheinlichkeit für die Ausbildung von leitfähigen Pfaden rein im Lötstopplack erhöht. Dies erklärt die leichte Zunahme an Migrationspfaden im Lötstopplack im Vergleich zu A1.

Gleichzeitig wird durch den teilweise erreichten größeren Abstand der Füllstoffe durch die doppelte Menge an Dispergiermittel im Lack die Bildung eines leitfähigen Pfads im Lötstopplack erschwert, wodurch das AMP vermehrt rein im Basismaterial auftritt.

Der Dispergiermittelüberschuss im Lötstopplack führt somit im Fall von Lackvariante E2 mit den ursprünglichen Füllstoffen Talkum und Quarzmehl im Lötstopplack zu gleichzeitiger verbesserter Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack durch den Dispergiermittelüberschuss, wie auch zu einem größeren Füllstoffabstand, was diese Ausbildung erschwert. Wahrscheinlich wird die Verwendung von lediglich Talkum, wie in Lackvariante D1 und die Verwendung der doppelten Dispergiermittelmenge den Anteil an Migrationspfaden im Lötstopplack weiter erhöhen. In diesem Fall werden die leitfähigen Pfade durch die längliche Form der Talkumpartikel vorgegeben, welche sich aufgrund ihrer hohen im Lack vorhandenen Anzahl sehr nahekomen. Das überschüssige Dispergiermittel sorft für die nötige Wasseradsorption an der Füllstoffoberfläche.

Der Einfluss der doppelten Dispergiermittelmenge im Lötstopplack auf die Flokkulation der Füllstoffe kann Abbildung 103 entnommen werden. Durch die höhere Dispergiermittelmenge im Lötstopplack ist eine Flokkulation der Füllstoffe nicht möglich, die Verteilung der Füllstoffe im Lack wird optimiert. Dadurch wird Feuchtediffusion weniger durch die Füllstoffe abgelenkt.

9.2.3 Einfluss einer Veränderung der Füllstoff- und Dispergiermittelart auf das AMP

In diesem Abschnitt werden die Analyseergebnisse der Veränderung der Füllstoffe und der Art der Dispergiermittel auf das AMP gezeigt. In Abschnitt 9.2.3.1 werden die Ergebnisse der Verwendung von Bariumsulfat anstelle von Talkum und Quarzmehl vorgestellt, in Abschnitt 9.2.3.2 die Ergebnisse der Verwendung zweier zu D_A verschiedenen Dispergiermittel

9.2.3.1 Veränderung der Füllstoffe

Die Veränderung des AMP durch eine Veränderung der Füllstoffe bei gleichbleibendem Dispergiermittel kann Lackvariante D3 entnommen werden.

Lackvariante D3

Bei Lackvariante D3 ist lediglich Bariumsulfat im ähnlichen Gewichtsprozent beigelegt wie die beiden Füllstoffe im Lack A1. Es besitzt eine höhere Dichte als Talkum und Quarzmehl, wodurch der Volumenanteil an Füllstoff im Vergleich zu Bindemittel geringer ausfällt als bei den Füllstoffverteilungen von A1, D1 und D2. Auch weist das verwendete Bariumsulfat deutlich kleinere Partikel auf als Talkum und Quarzmehl. Siehe hierzu auch die Berechnungen in Tabelle 31 - Tabelle 33.

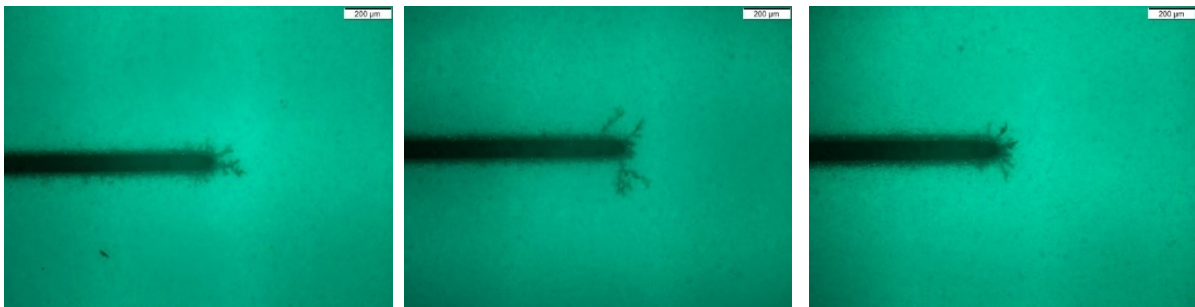


Abbildung 104: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante D3.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante D3 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 104** entnommen werden. An 92 % der Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Auffällig ist die im direkten Vergleich mit Lackvariante A1 deutlich feingliedrigere Verzweigung der AMP-Pfade.

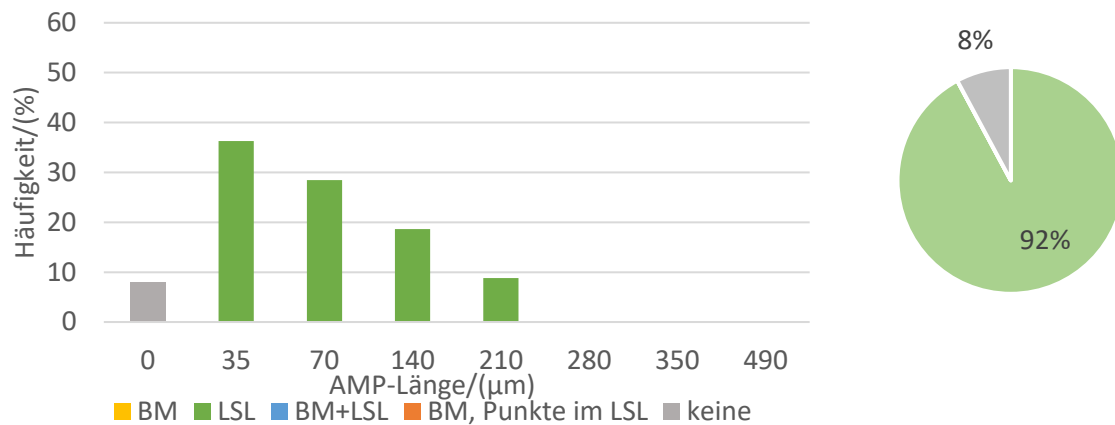


Abbildung 105: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante D3. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 105** entnommen werden. Es fällt auf, dass die AMP-Pfade bei 92 % der Leiterbahnspitzen bei Lackvariante D3 rein im Lötstopplack auftreten, was ein weit höherer Anteil ist als bei A1 mit 2 % der Leiterbahnspitzen. An den restlichen 8 % der Kammspitzen war kein AMP nachweisbar.

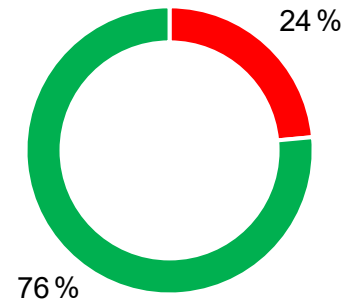
Tabelle 46: Länge der AMP-Pfade bei Lack D3 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK D3		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN µm	MW l_{D3}	84 ± 1	0	0	0	78 ± 6
	Maximum	210	0	0	0	210
	Minimum	35	0	0	0	0
ANZAHL LB		94	0	0	0	102
$(l_{D3} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(+60 \pm 38)\%$	-100 %	-100 %	-100 %	$(-64 \pm 3)\%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 46** entnommen werden. Die AMP-Länge im Lötstopplack fällt um 60 % höher aus im Vergleich zu A1. Der Mittelwert der AMP-Längen über alle Leiterbahnspitzen nimmt im Vergleich zu A1 um 64 % geringere Werte an.

Tabelle 47: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack D3 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack D3 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK D3		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{D3}	5 ± 1
	Maximum	40
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		102
$(l_{D3} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-80 \pm 4)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann Tabelle 47 entnommen werden. Zwischen 76 % der Leiterbahnen findet kein AMP statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 80 % kürzer als bei Lackvariante A1, genauso wie mit 40 μm die maximale AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen.

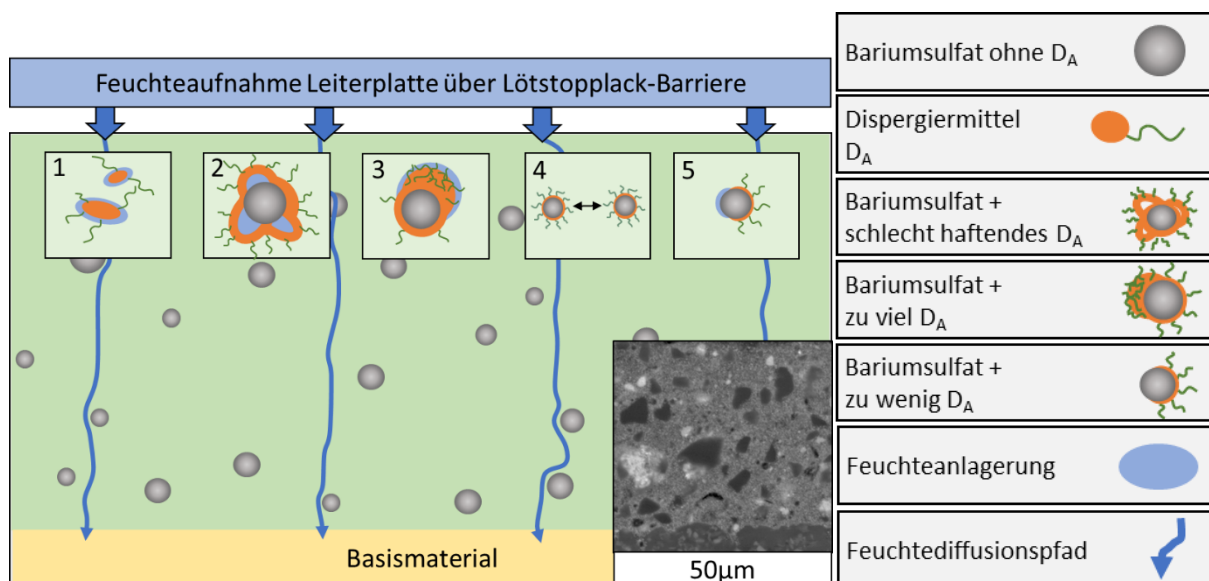


Abbildung 106: Lackvariante D3, Modell der Einbindung von nur Bariumsulfat in den Lötstopplack mittels des sterisch wirkenden Dispergiermittels D_A . Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Es ist zusätzlich eine REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung des Lacks eingezeichnet. Da nicht genau bekannt ist wie das Bariumsulfat und das Dispergiermittel in Wechselwirkung treten, sind mehrere Fälle eingezeichnet.

Der Einfluss von Bariumsulfat als einzigen Füllstoff im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial ist im Modell des Lacks D3 in Abbildung 106 skizziert. Aufgrund der höheren Dichte von Bariumsulfat und seiner geringeren Größe im Ver-

gleich zu Talkum und Quarzmehl werden die Feuchtediffusionspfade in die Leiterplatte weniger durch die Füllstoffe abgelenkt, wodurch eine annähernd homogene Feuchteverteilung im Basismaterial vorliegt. Dort werden aber keine AMP beobachtet, siehe dazu die nachfolgende Diskussion.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack findet bei Lackvariante D3 im Vergleich zu A1 vermehrt statt.

Da die Affinität des Dispergiermittels D_A auf das Bariumsulfat nicht bekannt ist, sind in Abbildung 106 verschiedene mögliche Wirkmechanismen des Dispergiermittels mit dem Bariumsulfat skizziert.

Fall 1 zeigt die Möglichkeit auf, dass die funktionale Gruppe des Dispergiermittels keine Affinität für die Füllstoffoberfläche des Bariumsulfats besitzt, wodurch das Dispergiermittel in der Harzmatrix verbleibt. Aufgrund der hydrophilen Gruppe des Dispergiermittels wird dort Feuchtigkeit absorbiert. Die Haftgruppen des nicht an der Füllstoffoberfläche gebundenen Dispergiermittels D_A können nun über seine Carboxylgruppen mit dem umgebenden Bindemittel, zum Beispiel dem Epoxidharz in der B-Komponente des Lötstopplacks, vernetzen. Andere Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels bleiben ungebunden und sorgen durch ihre polaren Eigenschaften nun für eine höhere Feuchteaufnahme des Lacks.

Fall 2 zeigt eine unzureichende Affinität der funktionalen Gruppe des Bindemittels zur Oberfläche des Bariumsulfats. Aus diesem Grund lösen sich die funktionalen Gruppen teilweise vom Füllstoff ab und Feuchtigkeit kann absorbiert werden, da an diesen Stellen das Bindemittel-Dispergiermittel-Füllstoff-Netzwerk gestört wird.

In **Fall 3** besitzt das Dispergiermittel funktionale Gruppen mit einer Affinität für die Füllstoffoberfläche. Da die Füllstoffoberflächen des Bariumsulfats geringer sind als bei den Füllstoffoberflächen der Lackvariante A1, verbleibt ungebundenes Dispergiermittel. Die Auswirkungen von ungebundenem Dispergiermittel können Fall 1 entnommen werden. Zusätzlich wird durch die Verknäulung der Polymerketten, wie bereits bei den Lackvarianten mit Dispergiermittelüberschuss in diesem Abschnitt diskutiert, Feuchte absorbiert.

In **Fall 4** ist die Wechselwirkung zwischen Füllstoffoberfläche und Dispergiermittel im Vergleich zu Talkum und Quarzmehl bei A1 verbessert, wodurch sich eine stabilere Dispergierung mit größerem Füllstoffabstand ergibt.

In **Fall 5** kommt es aufgrund der größeren Füllstoffoberfläche des Bariumsulfats nach Tabelle 32 im Vergleich zu Talkum und Quarz in Lack A1 zu einem Dispergiermittelmangel. Die Folge ist eine erhöhte Feuchteabsorption an den Füllstoffen, aufgrund deren schlechter Einbindung in das umgebende Bindemittelnetzwerk. Aber auch die Bildung von Agglomeraten ist möglich, was wiederum zu einer erhöhten Feuchteabsorption an den Füllstoffen führt. Details können Abschnitt 9.2.2.2 entnommen werden.

Die Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Fälle 1-5 wird im Folgenden diskutiert.

Zusammengefasst sind Fall 1, 2 und 3 die am wahrscheinlichsten auftretenden Wechselwirkungen. Da das AMP vollständig im Lötstopplack stattfindet, besitzt das Dispergiermittel keine ausreichende Affinität für die Bariumsulfatoberfläche (Fall 1 und 2). Für diese Hypothese spricht auch, dass die Dispergiermittel immer spezifisch auf die Füllstoffoberfläche zugeschnitten sein sollten. Die feine Struktur und Feingliedrigkeit des Migrationseffekts lässt einen Migrationspfad entlang der Bariumsulfatpartikel vermuten. Da die Bariumsulfatpartikel aufgrund ihres großen Abstands im Vergleich zu Lackvariante A1 kaum Berührungspunkte aufweisen, wird der Feuchtepfad zwischen den Füllstoffen höchstwahrscheinlich durch ungebundenes Dispergiermittel mit hydrophilen Gruppen oder ungebundene Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels bereitgestellt werden, wie bereits beschrieben.

Aber auch Fall 3 mit einer Affinität des Dispergiermittels zur Füllstoffoberfläche wäre denkbar, da anzunehmen ist, dass Bariumsulfat aufgrund seiner Ölzahl über einen geringeren Dispergiermittelbedarf verfügt. Der Feuchtepfad zwischen den Füllstoffen kann sich hier über möglicherweise unvernetzte Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels ausbilden.

Fall 4 mit einer durch die Veränderung der Füllstoffe verbesserten Dispergierung ist auszuschließen, da alle AMP-Pfade rein im Lötstopplack auftreten. Gründe die zum Ausschluss von Fall 5 führen, werden im Nachfolgenden diskutiert.

Der Einfluss von Bariumsulfat im Lötstopplack auf die Flokkulation der Füllstoffe wird in diesem Abschnitt diskutiert. Der in Fall 5 beschriebene Dispergiermittelmangel der Füllstoffe ist nicht anzunehmen, da die Feuchtaufnahme in diesem Fall nur punktuell an den Füllstoffen zu finden ist und sich so kein durchgängiger leitfähiger Pfad im Lötstopplack ausbilden kann. Auch eine Agglomeratbildung ist nicht anzunehmen. Die Agglomerate würden aufgrund der hohen Dichte der Bariumsulfatpartikel im Lack absinken. Ein ähnliches AMP wie bei Lackvariante D2 (im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack) kann aber nicht festgestellt werden.

9.2.3.2 Veränderung der Dispergiertmittel

In diesem Abschnitt soll der Einfluss einer Veränderung der Dispergiertmittel von D_A in der Ursprungsvariante auf D_B und D_C gezeigt und diskutiert werden. Hierfür sollen zu Beginn einige Grundlagen erklärt, sowie mögliche Modelle für Lack E3 und E4 vorgestellt werden.

In [19] wurde bei gleichbleibendem polymeren solvatisierbaren Molekülsegment die Art der Haftgruppe variiert und anschließend die Verträglichkeit des Dispergiertmittels mit unterschiedlichen Füllstoffen bewertet. Das Bewertungsverfahren beruht auf der Beobachtung, dass eine drastische Reduzierung der gemessenen Viskosität auftritt, wenn das Dispergiertmittel an der Füllstoffoberfläche bindet. Wurde ein Dispergiertmittel beigegeben, dessen Haftgruppen sich nicht mit der Füllstoffoberfläche verbinden konnten, so wurde keine Änderung der Viskosität festgestellt.

Beim Betrachten der in [19] aufgezeigten Tabelle mit Füllstoffen und der Wertung ihrer Verträglichkeit mit unterschiedlichen Haftgruppen wird klar, dass es keine Haftgruppe gibt, die für alle Füllstoffe in gleichem Maße funktioniert. Es wurden in dieser Variation auch Carboxylgruppen auf ihre Haftung an Talkum und Siliziumdioxid untersucht. Bei beiden Füllstoffen wurde jedoch keine gute (weder beste noch drittbeste) Verträglichkeit dieser Haftgruppen mit den Füllstoffpartikeln festgestellt. Auch wurde in [19] festgestellt, dass für eine gute Verträglichkeit der Füllstoffe und der Haftgruppe nicht der Grundsatz gilt, dass bei Füllstoffen mit basischem Charakter säurehaltige Dispergiertmittel und umgekehrt verwendet werden sollten.

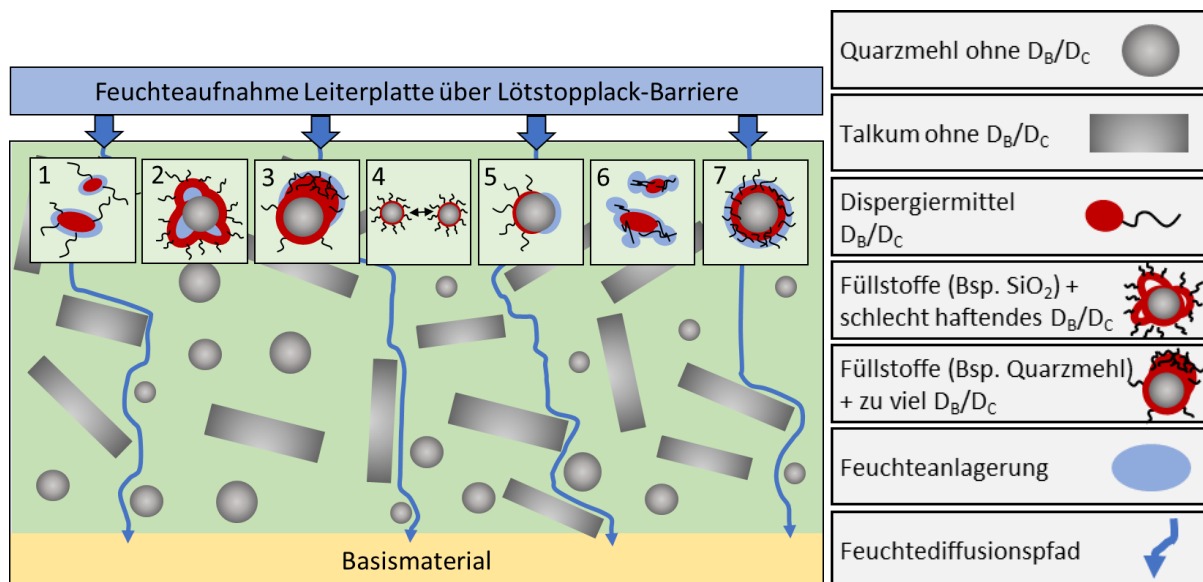


Abbildung 107: Modell für Lackvariante E3 und E4, Modell der Einbindung der Füllstoffe Talkum und Quarz in den Lötstopplack mittels des sterisch wirkenden Dispergiertmittels D_B und D_C . Zusätzlich eingezeichnet sind mögliche Diffusionspfade für Feuchtigkeit in die Leiterplatte. Die Skizze ist nicht maßstabsgetreu. Da nicht genau bekannt ist wie die Füllstoffe und die Dispergiertmittel in Wechselwirkung treten, sind mehrere Fälle eingezeichnet. Die REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung kann aufgrund gleicher Füllstoffe Lack A1 in Abbildung 75 entnommen werden.

In **Abbildung 107** ist das skizzierte Modell für Lackvariante E3 und E4 dargestellt. Da nicht genau bekannt ist, wie die Dispergiermittel D_B und D_C mit den Füllstoffen wechselwirken, sind mehrere Fälle eingezeichnet. Da sich die Dispergiermittel D_B und D_C und D_A in der Art der Haftgruppen und des solvatisierbaren Molekülsegments voneinander unterscheiden, ist die Haftgruppe in rot, und das Molekülsegment in schwarz dargestellt. Welcher der Fälle für Lack E3 und E4 wahrscheinlich ist, wird bei den einzelnen Lackvarianten diskutiert.

Die **Fälle 1 bis 5** beziehen sich auf die Wechselwirkung der Haftgruppe mit der Füllstoffoberfläche, wobei davon ausgegangen wird, dass das Polymersegment gut verträglich ist mit dem umliegenden Bindemittel. Die Beschreibung der Wirkungsweisen der Fälle kann aufgrund gleichem möglichen Verhalten Lackvariante D3 in Abbildung 106 entnommen werden. Fall 1-5 bei Lackvariante D3 entsprechen jeweils Fall 1-5 bei Lackvariante E3 und E4.

In **Fall 6** ist der Fall mit schlecht mit dem Bindemittel wechselwirkenden Polymersegmenten mit einer zusätzlich nicht mit dem Füllstoff wechselwirkenden Haftgruppe. Es ist hier nur der Extremfall von keiner Wechselwirkung der Haftgruppe mit dem Füllstoff dargestellt. Es wäre natürlich auch eine lediglich schlechte Wechselwirkung, wie sie in Fall 2 dargestellt ist, möglich. Die möglichen Auswirkungen von Fall 6 können der Beschreibung von Fall 1 und 2 bei Lackvariante D3, sowie der Beschreibung von Fall 7 von Lackvariante E3 und E4, entnommen werden.

Fall 7 zeigt die Auswirkung eines schlecht mit dem umliegenden Bindemittel verträglichen Polymersegments auf die Dispergierung der Füllstoffe, wobei die Haftgruppe eine gute Wechselwirkung mit dem Füllstoff aufweist. In diesem Fall kommt es zu einer instabilen Dispergierung. So können die Polymerketten in Füllstoffnähe verknäulen, wodurch diese unzureichend mit dem Bindemittel wechselwirken und durch ein schlecht ausgebildetes Polymernetzwerk vermehrt Feuchte in Füllstoffnähe absorbiert wird. Auch kommt es so zur Berührung der Füllstoffe, wodurch sich ein horizontaler leitfähiger Pfad entlang der Füllstoffe ausbildet.

Lackvariante E3

Bei Lackvariante E3 wurde anstelle von Dispergiertmittel D_A das Dispergiertmittel D_B im selben Gewichtsprozent wie in der Ursprungslackvariante A1 beigegeben.

Das Dispergiertmittel D_A verfügt laut Hersteller über eine Säurezahl von 53 mg KOH/g, sowie eine Dichte bei 20 °C von 1,03 g/ml. D_B weist laut Hersteller eine Säurezahl von ~140 mg KOH/g und bei 20 °C eine Dichte von 1,02 g/ml auf. Bei beiden Dispergiertmitteln ist ein anderes verträgliches Lösemittel angegeben. Der Unterschied der beiden Dispergiertmittel liegt somit unter anderem in der Säurezahl, sowie dem Molekulargewicht, der Lösemittelverträglichkeit und dem Hersteller.

Die Abhängigkeit der Säurezahl von der Carboxylgruppenanzahl ist in [91] [92] beispielhaft für ein carboxylgruppenhaltiges Harz beschrieben. Das Dispergiertmittel D_B weist demnach durch seine größere Säurezahl wahrscheinlich eine höhere Carboxylgruppenanzahl als das Dispergiertmittel D_A auf. Über die Art des polymeren solvatisierbaren Molekülsegments macht der Hersteller keine Angabe.

Welchen Einfluss das veränderte Dispergiertmittel auf das AMP nimmt, wird im Folgenden beschrieben.



Abbildung 108: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante E3.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante E3 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 108** entnommen werden. An 87 % der Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die Verzweigung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze fällt deutlich geringer aus als bei A1, was wahrscheinlich auf die im Vergleich zu A1 deutlich kürzeren Migrationspfade zurückzuführen ist.

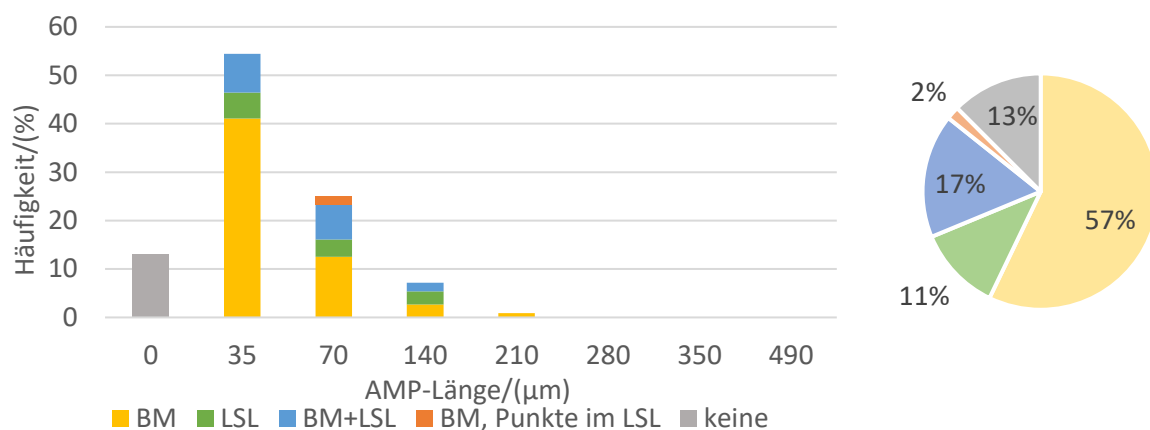


Abbildung 109: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante E3. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 109** entnommen werden. Auffällig ist, dass der Anteil an AMP-Pfaden rein im Basismaterial mit 57 % im Vergleich zu 22 % bei Lackvariante A1 deutlich höher ist. Damit findet das AMP hauptsächlich im Basismaterial statt. Der Anteil AMP-Pfade teilweise im Basismaterial und Lötstopplack oder im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack fällt mit 17 %, beziehungsweise 2 % der anodischen Kammspitzen niedriger aus. Rein im Lötstopplack treten mit 11 % der Leiterbahnspitzen im Vergleich zu A1 mit 2 % der Leiterbahnspitzen mehr AMP-Pfade auf. An 13 % der Leiterbahnspitzen konnte kein AMP festgestellt werden. Die Separierung der AMP-Pfade in die rein im Lötstopplack und rein im Basismaterial auftretenden Pfade ist deutlicher im Vergleich zu A1. Dies wird deutlich, da die AMP-Pfade die im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack und teilweise im Basismaterial und Lötstopplack mit 2 % und 17 % weniger häufig auftreten als bei A1.

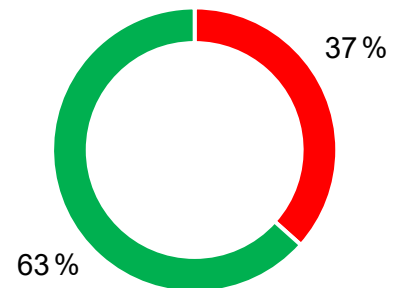
Tabelle 48: Länge der AMP-Pfade bei Lack E3 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK E3		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	MW l_{E3}	73 ± 4	51 ± 1	62 ± 2	70 ± 0	49 ± 4
	Maximum	140	210	140	70	210
	Minimum	35	35	35	70	0
ANZAHL LB		13	64	19	2	112
$(l_{E3} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		$(+39 \pm 33) \%$	$(-79 \pm 0) \%$	$(-64 \pm 1) \%$	$(-73 \pm 0) \%$	$(-77 \pm 2) \%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 48** entnommen werden. Allein die AMP-Länge rein im Lötstopplack fallen im Vergleich zu A1 höher aus. Die AMP-Pfadlängen im Basismaterial fallen im Vergleich zu A1 um 79 % geringer aus. Im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack nimmt die AMP-Länge um 73 % niedrigere Werte im Vergleich zu A1 an, was aufgrund von lediglich zwei Phänomenen bei der Interpretation der Einflussfaktoren auf das AMP vernachlässigbar ist. Im Basismaterial und Lötstopplack sind die Pfade um 64 % kürzer als bei A1. Im Mittelwert fällt die AMP-Länge im Vergleich zu A1 um 77 % kürzer aus. In den unterschiedlichen Migrationsebenen ist keine klare Tendenz zu erkennen, ob im Basismaterial oder im Lötstopplack die längeren AMP-Pfade auftreten.

Tabelle 49: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack E3 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack E3 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK E3		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{E3}	8 ± 1
	Maximum	40
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		112
$(l_{E3} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-66 \pm 5)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 49** entnommen werden. Zwischen 63 % der Leiterbahnen findet keine anodische Migration statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 66 % kürzer als bei Lackvariante A1, genauso wie mit 40 μm die maximale AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen.

Der Einfluss des Dispergiermittels D_B im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial ist in **Abbildung 107** skizziert. Bei Dispergiermittel D_B handelt es sich um ein normalerweise nicht bei Lackvariante A1 eingesetztes Dispergiermittel. In **Abbildung 107** sind mehrere mögliche Wechselwirkungen des Dispergiermittels mit den Füllstoffen eingezeichnet. Die Füllstoffdichte entspricht der bei Lackvariante A1. Die in den nachfolgenden Abschnitten diskutierten Analyseergebnisse der AMP-Pfade zeigen eine gute Wechselwirkung des Dispergiermittels D_B mit den Füllstoffen, da das AMP nicht verstärkt, sondern im Gegenteil im Vergleich zu A1 weniger intensiv auftritt. Damit sind Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial ähnlich der bei Lackvariante A1, da keine Agglomeratbildung der Füllstoffe passiert, wodurch Feuchtediffusionspfade in die Leiterplatte abgelenkt werden.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack findet etwas häufiger statt bei Lackvariante A1, da mit 11 % der Leiterbahnspitzen die AMP-Pfade häufiger rein im Lötstopplack auftreten als bei A1 mit 2 %. Die Gründe, die hierzu führen werden im nachfolgenden Abschnitt diskutiert.

Der Einfluss von Dispergiermittel D_B im Lötstopplack auf die Flokkulation der Füllstoffe, beziehungsweise mögliche Wechselwirkungen der Füllstoffe mit D_B wird auf Basis der Wahrscheinlichkeit des Auftretens der einzelnen in Abbildung 107 beschriebenen Wechselwirkungen der Füllstoffe und des Bindemittels mit dem Dispergiermittel diskutiert. Zusammengefasst stellen Fall 3 und 4 die wahrscheinlichsten Wirkungsmechanismen dar.

Im Fall des in dieser Lackvariante E3 verwendeten carboxylgruppenhaltigen Dispergiermittels D_B ist aufgrund der im Vergleich zu A1 im Mittel um 78 % geringeren AMP-Intensität an der Leiterbahnspitze, sowie um im Mittel 43 % zwischen den Leiterbahnen, eine gute Wechselwirkung des Dispergiermittels mit dem Füllstoff und dem umgebenden Bindemittel zu vermuten. Auch tritt an 13 % der Leiterbahnspitzen kein AMP mehr auf.

Da sowohl das Dispergiermittel D_B, wie auch das normalerweise eingesetzte Dispergiermittel D_A, über eine carboxylgruppenhaltige Haftgruppe verfügt, sind Fall 1, Fall 2 und Fall 6 im Modell in Abbildung 107 mit schlechter Haftung von D_B am Füllstoff auszuschließen.

Es ist anzunehmen, dass die im Vergleich zu D_A höhere Carboxylgruppenanzahl einher geht mit einer Erhöhung der Haftgruppenanzahl pro solvatisierbarer Polymerkette des sterisch wirkendem Dispergieradditivs. Dies verstärkt die Haftung des Dispergiermittels am Füllstoff, was die sterische Stabilisierung der Füllstoffe (und damit den Abstand der Füllstoffe zueinander, Fall 4) erhöht.

Die erhöhte Säurezahl von D_B bei Lackvariante E3 ist ein Indiz für nicht an die Füllstoffoberfläche gebundenen Haftgruppen (Fall 3). Dies führt zu einer erhöhten Feuchteabsorption im Lötstopplack wie schon in Abschnitt 9.2.2.3 diskutiert. Da aber 57 % der AMP-Pfade rein im Basismaterial und nur 12 % der AMP-Pfade rein im Lötstopplack auftreten, liegt nur ein geringer Dispergiermittelüberschuss mit leicht erhöhter Feuchteaufnahme im Lötstopplack vor. Durch die Tendenz zu Dispergiermittelüberschuss kann Fall 5, der die Auswirkungen eines Dispergiermittelmangels darstellt, ausgeschlossen werden.

Da die Verwendung von Dispergiermittel D_B im Vergleich zu D_A zu einer deutlichen Verringerung der mittleren AMP-Intensität zwischen den Leiterbahnen und an den Leiterbahnspitzen führt und gleichzeitig die meisten AMP-Pfade rein im Basismaterial auftreten, ist eine gute Wechselwirkung der Polymersegmente mit dem umgebenden Bindemittel anzunehmen. Ein Verknäulen der Polymersegmente mit einhergehender verminderter Dispergierung hätte deutlich mehr als 11 % der AMP-Pfade rein im Lötstopplack zur Folge.

Da mehr AMP-Pfade im Vergleich zu A1 rein im Basismaterial auftreten ist durch die veränderten Polymerketten sogar eine verbesserte Dispergierung mit einhergehender verbesserter Separierung der Füllstoffe anzunehmen (Fall 4 in Abbildung 107).

Fall 7, in welchem die Polymerketten nicht gut mit dem umliegenden Bindemittel wechselwirken ist somit nicht anzunehmen.

Lackvariante E4

Bei Lackvariante E4 wurde das aminische Dispergiermittel D_C , im gleichen Gewichtsprozent wie das Dispergiermittel D_A bei der Ursprungslackvariante A1, beigegeben. Das in dieser Lackvariante verwendete sterisch wirkenden Dispergieradditiv besitzt im Gegensatz zu D_A und D_B einen aminischen, basischen Charakter. Der aminische Charakter resultiert aus Amingruppen, welche sich in der Haftgruppe des Additivs befinden. Über die Polymerkette des solvatisierbaren Molekülsegments ist vom Hersteller nichts angegeben, somit ist über die Verträglichkeit der Polymerketten von D_C mit dem umgebenden Bindemittel nichts bekannt. Der Einfluss des aminischen Dispergiermittels auf das AMP wird im Folgenden diskutiert.

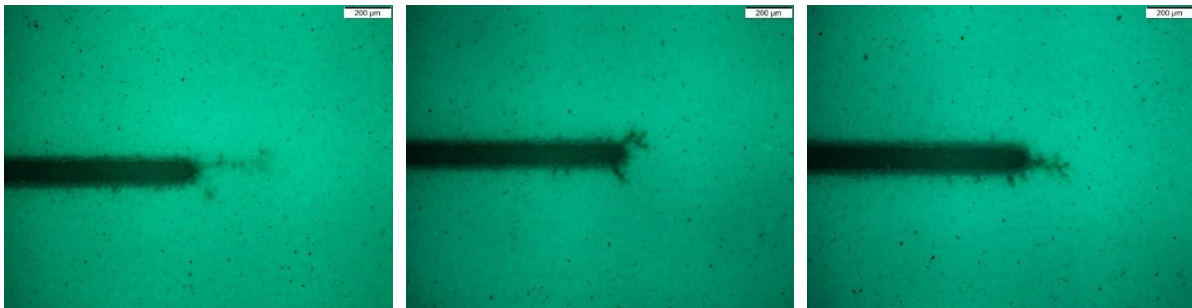


Abbildung 110: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante E4.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante E4 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 110** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die Verzweigung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze fällt geringer aus als bei A1, obwohl die gleichen Füllstoffe im Lack vorliegen wie bei A1. Es ist zu vermuten, dass aufgrund der kürzeren AMP-Längen bei E4 im Vergleich zu A1 die Verzweigung nicht sichtbar wird.

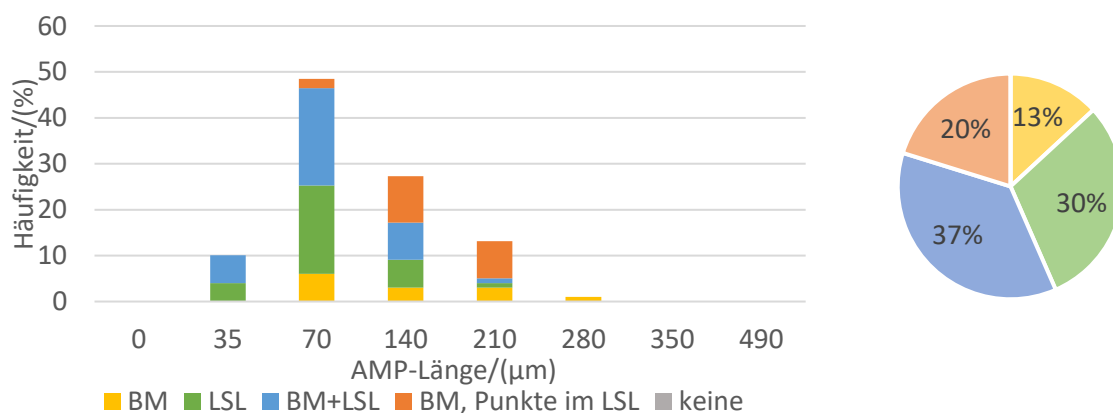


Abbildung 111: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante E4. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade kann **Abbildung 111** entnommen werden. Es fällt auf, dass die Verwendung von Dispergiermittel D_C anstelle von D_A dazu führt, dass der Anteil an AMP-Pfaden im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack bei Lackvariante E4 mit 20 % geringer ausfällt als bei A1 mit 37 %. Auch der Anteil von rein im Basismaterial migrierenden AMP nimmt mit 13 % geringere Werte an als bei der aktuellen Lackvariante mit 22 %.

Der Anteil von rein im Lötstopplack migrierenden AMP ist mit 30 % höher als bei A1 mit 2 %. Wohingegen der Anteil von teilweise im Basismaterial und Lötstopplack auftretenden AMP mit 37 % etwa gleich hoch ist wie bei A1 mit 39 %. Damit findet das AMP mit Dispergiermittel D_C vermehrt im Lötstopplack statt.

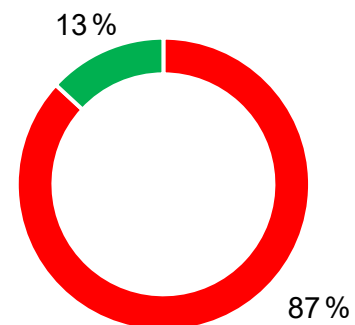
Tabelle 50: Länge der AMP-Pfade bei Lack E4 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert (MW) wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK E4		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	MW l_{E4}	84 ± 1	135 ± 6	84 ± 1	161 ± 2	106 ± 6
	Maximum	210	280	210	210	280
	Minimum	35	70	35	70	35
ANZAHL LB		30	13	36	20	99
$(l_{E4} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(+60 \pm 37)\%$	$(-45 \pm 2)\%$	$(-51 \pm 1)\%$	$(-38 \pm 1)\%$	$(-51 \pm 3)\%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 50** entnommen werden. Auffällig ist, dass nur die Länge der rein im Lötstopplack verlaufenden AMP im Vergleich zu A1 höher ausfällt. Die AMP-Pfadlängen im Basismaterial fallen dabei um 39 % geringer aus im Vergleich zu A1. Im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack sind die AMP-Pfade um 38 % kürzer. Im Basismaterial und Lötstopplack sind die Pfade um 51 % kürzer als bei A1. Im Mittelwert sind die AMP-Pfade im Vergleich zu A1 um 51 % kürzer. Die AMP-Längen in den unterschiedlichen Migrationsebenen zeigen die Tendenz, dass in der Migrationsebene Lötstopplack oder teilweise im Lötstopplack oder Basismaterial die AMP-Pfade kürzer ausfallen als in den anderen beiden Ebenen im Basismaterial.

Tabelle 51: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack E4 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack E4 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK E4		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{E4}	19 ± 1
	Maximum	40
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		99
$(l_{E4} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		$(-25 \pm 5) \%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann Tabelle 51 entnommen werden. Zwischen etwa 13 % der Leiterbahnen findet kein AMP statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 25 % kürzer als bei Lackvariante A1, genauso wie mit 40 μm die maximale AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen.

Der Einfluss des Dispergiermittels D_c im Lötstopplack auf die Feuchtediffusionspfade in das Basismaterial ist in Abbildung 107 skizziert. Aufgrund unbekannter Wechselwirkung des Dispergiermittels D_c mit dem Bindemittel und den Füllstoffen, sind mehrere Wechselwirkungen eingezeichnet. Die Füllstoffdichte entspricht der bei Lackvariante A1. Die Analyseergebnisse zeigen, dass die Verzweigung der AMP-Pfade trotz gleicher Füllstoffe wie bei Lack A1 anders ausfällt. Dies kann auf den höheren Anteil an AMP-Pfaden rein im Lötstopplack zurückgeführt werden, in welchem die Füllstoffe und Feuchteverteilung im Lötstopplack die AMP-Pfadbildung beeinflussen, sowie die kürzeren AMP-Pfade im Vergleich zu A1. Dies hat zur Folge, dass eine Verzweigung der AMP-Pfade wie bei A1 aufgrund kürzerer AMP-Pfade nicht sichtbar wird.

Die Ausbildung horizontaler Feuchtepfade im Lötstopplack tritt bei Lackvariante E4 im Vergleich zu Lackvariante A1 vermehrt auf, darauf deuten die im Vergleich zu A1 mit 30 % der Leiterbahnspitzen häufiger auftretenden und um 60 % längeren AMP-Pfade rein im Lötstopplack hin. Die Gründe hierfür werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

Der Einfluss von Dispergiermittel D_c im Lötstopplack auf die Flokkulation der Füllstoffe, beziehungsweise mögliche Wechselwirkungen der Füllstoffe mit D_c wird im Folgenden diskutiert. Dabei wird auf Basis der Versuchsergebnisse die Wahrscheinlichkeit des Auftretens

der einzelnen in Abbildung 107 beschriebenen Wechselwirkungen der Füllstoffe und des Bindemittels mit dem Dispergiermittel diskutiert.

Da im Vergleich zu A1 mehr AMP-Pfade teilweise oder vollständig im Lötstopplack auftreten, ist anzunehmen, dass das Dispergiermittel D_C keine gute Wechselwirkung mit den Füllstoffen sowie dem Bindemittel zeigt.

Fall 4 mit einer verbesserten Dispergierung mit optimiertem Abstand der Füllstoffe ist nicht zu erwarten, da bei verbesserter Dispergierung die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines leitfähigen Pfads im Lötstopplack reduziert wird.

Es kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob die schlechtere Wechselwirkung allein aus der schlechten Wechselwirkung der aminischen Haftgruppe mit der Füllstoffoberfläche oder aus der schlecht mit dem umliegenden Bindemittel wechselwirkende Polymerkette resultiert. Demnach kommen Fall 1, 2 und 6 aus dem Modell in Abbildung 107 mit einer unzureichenden Wechselwirkung der aminischen Haftgruppe des Dispergiermittels mit der Füllstoffoberfläche in Frage. Nicht bildlich dargestellt bei diesen Fällen ist die zusätzlich zu einer unzureichenden Wechselwirkung der Haftgruppe mit dem Füllstoff mögliche schlechte Wechselwirkung der Polymerkette mit dem umliegenden Bindemittel. Diese würde die Feuchteabsorption weiter erhöhen.

Aber auch Fall 3, 5 und 7 mit einer guten Wechselwirkung der Haftgruppe mit dem Füllstoff, wobei es zu einem Dispergiermittelüberschuss, zu einem Dispergiermittelmangel, oder aber auch zu einer Verknäulung der Polymerkette in Füllstoffnähe aufgrund schlechter Wechselwirkung derselben mit dem umliegenden Bindemittel kommen kann, sind nicht auszuschließen. Die detaillierte Beschreibung der möglichen Auswirkungen durch die Veränderung der Art des Dispergiermittels auf die Feuchteabsorption des Lötstopplacks können der Beschreibung des Modells in Abbildung 107, sowie den entsprechenden Abschnitten zu den Folgen eines Überschusses und Mangels an Dispergiermittel in Abschnitt 9.2.4.1 und 0 entnommen werden.

Amingruppen können durch ihren polaren Charakter für eine erhöhte Wasserabsorption im Lötstopplack sorgen. Möglich wäre auch eine Einbindung der Amingruppen in das Polymer Netzwerk, beispielsweise eine Vernetzung mit dem Epoxidharz in der B-Komponente. In der Ursprungslackformulierung A1 wird dem Lack der Beschleuniger M mit primären Amingruppen beigegeben, der mit dem Epoxidharz in der B-Komponente vernetzt. Findet nun in Lackvariante E4 eine Vernetzung des Epoxidharzes der B-Komponente mit den Amingruppen des Dispergiermittels D_C statt, so bleiben die primären Amingruppen des Beschleunigers ungebunden und Feuchte kann bevorzugt an den polaren unvernetzten Amingruppen des Beschleunigers M absorbiert werden. Hinzu kommt, dass sich die Vernetzung durch die zusätzliche Einbindung des aminischen Dispergiermittels unvollständig und schlechter ausbildet, was zu einer

erhöhten Feuchteaufnahme des Lötstopplacks und somit einer Häufung der Migrationspfade im Lötstopplack führt.

Zusammengefasst verfügt das Dispergiermittel D_C aufgrund des verstärkten Auftretens von AMP im Lötstopplack über eine schlechtere Wechselwirkung mit den Füllstoffen als Lackvariante A1, was in Summe zu einer Reduzierung der AMP-Intensität führt. Die im Mittel im Vergleich zu A1 um 52 % kürzeren AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze, sowie die um 24 % kürzeren AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen resultieren daraus, dass sich die Migrationsebene der AMP-Pfade in den Lötstopplack verschoben hat. Es wurde bereits bei der Analyse der anderen Lackvarianten festgestellt, dass die AMP-Pfade im Lötstopplack kürzer ausfallen als im Basismaterial. Gründe hierfür werden später in der Zusammenfassung in Abschnitt 6.5.8 diskutiert.

9.2.4 Einfluss einer Veränderung der Beschleuniger- und Epoxidharzmenge auf das AMP

Die Lackvarianten mit Variation der Beschleuniger- und Epoxidharzmenge werden in diesem Abschnitt in eine Gruppe mit Tendenz zu vollständig abreagiertem Epoxidanteil und einer mit Tendenz zu nicht vollständig abreagiertem Epoxidanteil unterschieden.

9.2.4.1 Tendenz zu vollständig abreagiertem Epoxidanteil

Sowohl bei Lackvariante F2 mit 20 Gewichtsprozent weniger Epoxidanteil in der B-Komponente als auch bei Lackvariante G1 mit 30 Gewichtsprozent mehr Beschleuniger M findet sich nach der Lackaushärtung kein freier Epoxidanteil mehr.

Bei vollständig abreagiertem Epoxidanteil besteht die Möglichkeit der Feuchteabsorption über die polaren funktionalen Gruppen des Beschleunigers sowie der Carboxylgruppen. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Analyseergebnisse von Lackvarianten F2 und G1 vorgestellt. Anschließend wird das für beide gültige Modell der Lackvarianten mit vollständig abreagiertem Epoxidanteil vorgestellt.

Lackvariante G1

Bei Lackvariante G1 wurde die Menge des Beschleunigers in der A-Komponente um 30 Gewichtsprozent der Ursprungslackvariante A1 erhöht.

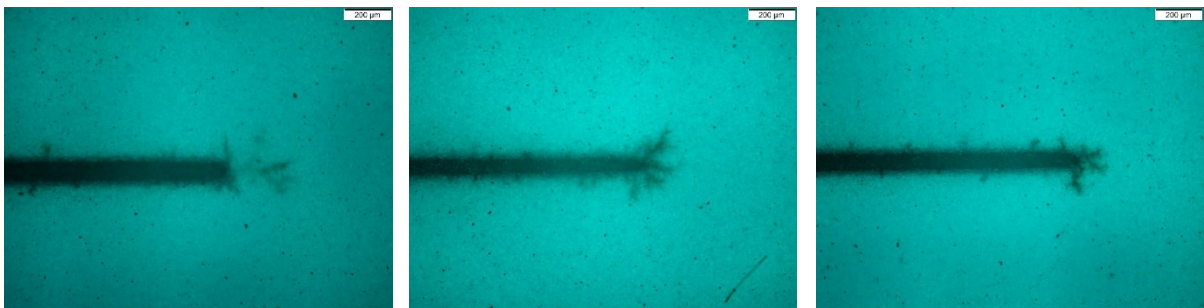


Abbildung 112: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante G1.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante G1 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 112** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die Verzweigung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze ist stark ausgeprägt, teilweise treten sehr breite AMP-Pfade auf.

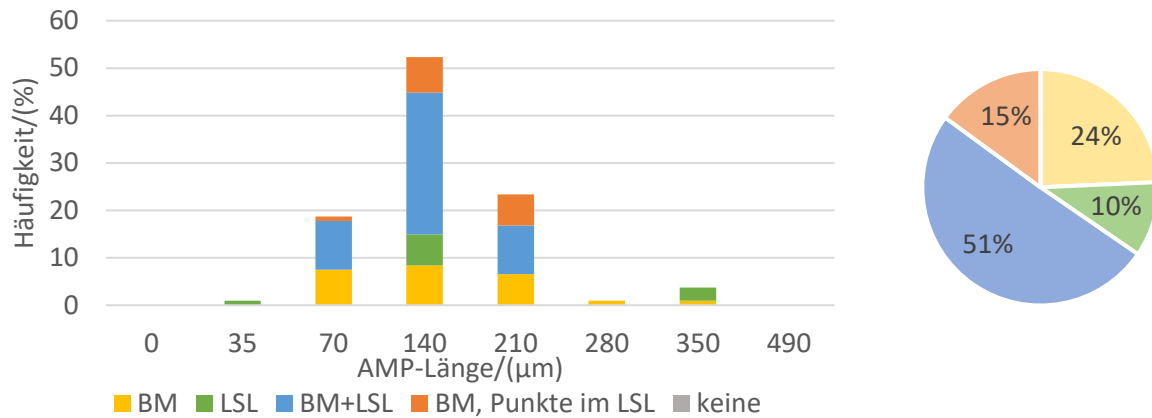


Abbildung 113: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante G1. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 113** entnommen werden. Es fällt auf, dass der Anteil an AMP-Pfaden teilweise im Basismaterial mit einem Anteil von 51 % höher ausfällt im Vergleich zu Lackvariante A1 mit 39 %. Wobei der Anteil an vollständig im Lötstopplack auftretenden Migrationspfaden ebenfalls mit 10 % bei Variante G1 höher ausfällt als bei A1 mit 2 %. Der Anteil an AMP-Pfaden, die rein im Basismaterial migrieren ist mit 24 % ähnlich häufig wie bei A1 mit 22 % der betroffenen Leiterbahnspitzen. Der Anteil von AMP-Pfaden, die hauptsächlich im Basismaterial migrieren, aber mit Punkten im Lötstopplack, ist mit 15 % bei G1 niedriger als bei A1 mit 37 % der Leiterbahnspitzen. Damit hat sich die Migrationsebene der AMP-Pfade im Vergleich zu A1 in den Lötstopplack verlagert.

Tabelle 52: Länge der AMP-Pfade bei Lack G1 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

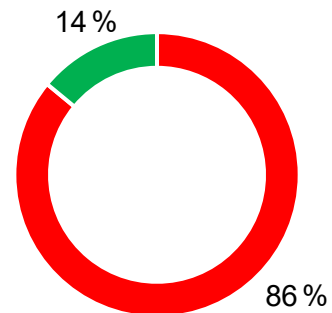
LACK G1		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP-LÄNGE AN DER LB-SPITZE IN μm	MW l_{G1}	188 ± 10	155 ± 3	140 ± 1	168 ± 3	153 ± 6
	Maximum	350	350	210	210	350
	Minimum	35	70	70	70	35
ANZAHL LB		11	26	54	16	107
$(l_{G1} - l_{A1}) / l_{A1} \cdot 100 \%$		$(+258 \pm 86) \%$	$(-37 \pm 1) \%$	$(-18 \pm 1) \%$	$(-36 \pm 1) \%$	$(-30 \pm 4) \%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 52** entnommen werden. Auffällig sind vor allem die im Vergleich zu A1 längeren AMP-Pfade rein im Lötstopplack. Die AMP-Pfadlängen rein im Basismaterial sind dabei um 37 % kürzer im

Vergleich zu A1. Die AMP im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack sind um 36 % und im Basismaterial und Lötstopplack um 18 % kürzer als bei A1. Im Mittelwert sind die AMP-Längen im Vergleich zu A1 um 30 % kürzer. Es ist keine klare Tendenz zu erkennen, in welcher Migrationsebene die längsten AMP-Pfade beobachtet werden können.

Tabelle 53: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack G1 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack G1 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK G1		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{G1}	21 ± 1
	Maximum	70
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		107
$(l_{G1} - l_{A1}) / l_{A1} \cdot 100\%$		$(-15 \pm 6)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann Tabelle 53 entnommen werden. Zwischen 14 % der Leiterbahnen findet keine anodische Migration statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 15 % kürzer als bei Lackvariante A1. Die maximale Länge des AMP-Pfads zwischen den Leiterbahnen entspricht derer bei Lackvariante A1.

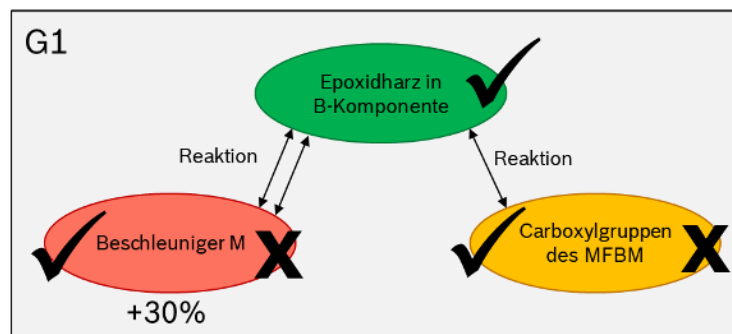


Abbildung 114: Beschreibung der Reaktion des Epoxidharzes in der B-Komponente mit dem Beschleuniger M und den Carboxylgruppen. Bei Lackvariante G1 ist im Vergleich zu A1 30 Gewichtsprozent mehr Beschleuniger M beigegeben. Ein „✓“ bedeutet eine vollständige und ein „X“ eine unvollständige Abreaktion der Komponente.

Der Einfluss eines um 30 Gewichtsprozent höheren Beschleunigeranteil M auf die Vernetzung des Lötstopplacks kann Abbildung 114 entnommen werden. Durch den höheren Beschleunigeranteil wird das Reaktionsgleichgewicht des Epoxidharzes gestört. Es reagiert im Vergleich zu A1 vermehrt mit dem Beschleuniger. Die Vernetzung des Epoxidharzes B-

Komponente mit den Carboxylgruppen und dem Beschleuniger M finden statt, bis das Epoxidharz vollständig vernetzt ist. Als Resultat der aus dem Gleichgewicht gebrachten Reaktion können drei Fälle unterschieden werden:

- Der Beschleuniger, sowie einige Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels bleiben unvernetzt.
- Der Beschleuniger reagiert vollständig ab und es verbleiben lediglich unvernetzte Carboxylgruppen im Lack.
- Die Carboxylgruppen reagieren vollständig ab, in diesem Fall bleibt nur unvernetzter Beschleuniger M übrig.

Lackvariante F2

Bei Lackvariante F2 wurde die Menge des Epoxidharzes in der B-Komponente um 20 Gewichtsprozent der Ursprungslackvariante A1 verringert.

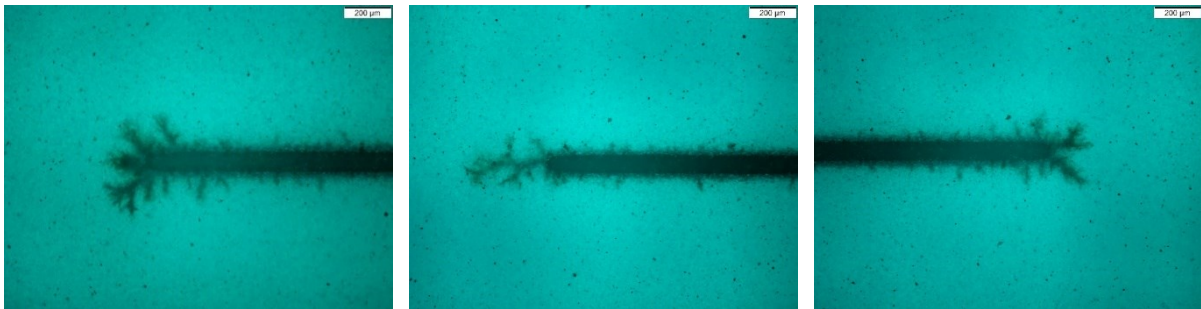


Abbildung 115: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante F2.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante F2 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 115** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die Verzweigung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze ist sehr ausgeprägt, teilweise treten sehr breite AMP-Pfade auf.

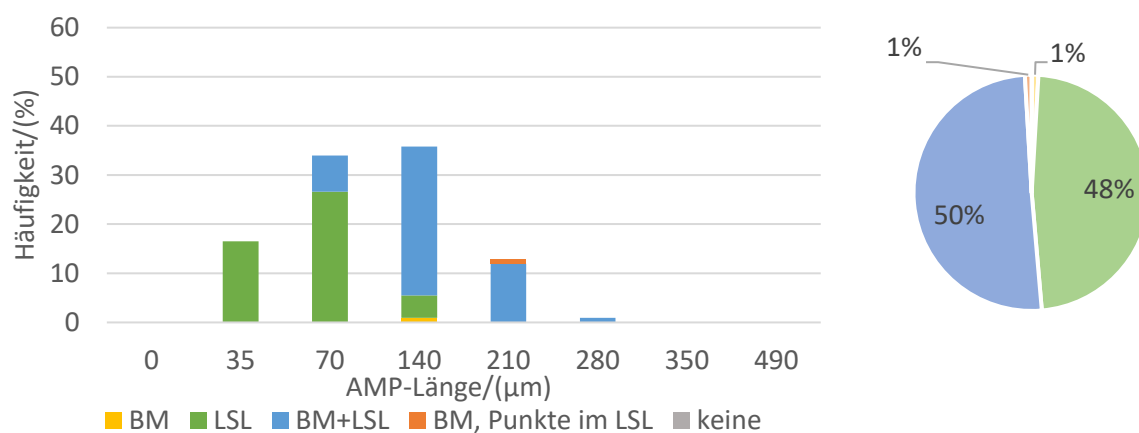


Abbildung 116: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante F2. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 116** entnommen werden. Es fällt auf, dass der Anteil an AMP-Pfaden teilweise im Basismaterial mit 50 % höher ausfällt als bei Lackvariante A1 mit 39 %. Auch der Anteil an AMP-Pfaden vollständig im Lötstopplack ist mit 48 % der Leiterbahnspitzen bei F2 größer als bei A1 mit 2 %. Damit hat sich die Migration deutlich in den Lötstopplack verlagert. Der Anteil an AMP-Pfaden im Basismaterial und im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack liegt bei je 1 % und ist damit vernachlässigbar.

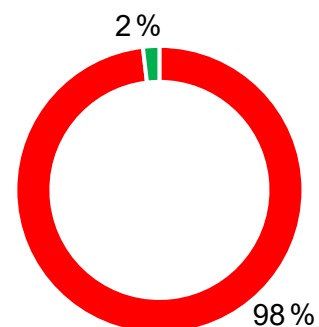
Tabelle 54: Länge der AMP-Pfade bei Lack F2 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK F2		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN μm	MW l_{F2}	65 ± 1	140 ± 0	150 ± 1	210 ± 0	109 ± 6
	Maximum	140	140	280	210	280
	Minimum	35	140	70	210	35
ANZAHL LB		52	1	55	1	109
$(l_{F2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(+24 \pm 29)\%$	$(-43 \pm 0)\%$	$(-13 \pm 1)\%$	$(-20 \pm 0)\%$	$(-50 \pm 3)\%$

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 54** entnommen werden. Allein die Länge des AMP-Pfads rein im Lötstopplack fällt im Vergleich zu A1 länger aus. Der größte Längenunterschied der AMP-Pfade im Vergleich zu A1 findet sich mit 43 % kürzeren Pfaden rein im Basismaterial, was aber vernachlässigbar ist bei der Interpretation der Einflussfaktoren auf das AMP, da dort jeweils nur ein AMP beobachtet wird. Dies gilt auch für die kürzeren AMP-Längen im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack mit 20 %. Teilweise im Basismaterial und Lötstopplack ist die AMP-Länge im Vergleich zu A1 um 13 % kürzer. Die AMP-Längen rein im Lötstopplack fallen am kürzesten aus.

Tabelle 55: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack F2 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack F2 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK F2		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{F2}	25 ± 1
	Maximum	70
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		109
$(l_{F2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-1 \pm 6)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 55** entnommen werden. Zwischen fast allen Leiterbahnen findet ein anodisches Migrationsphänomen statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel nur 1 % kürzer als bei Lackvariante A1. Die maximale Länge des AMP-Pfads zwischen den Leiterbahnen entspricht derer bei Lackvariante A1.

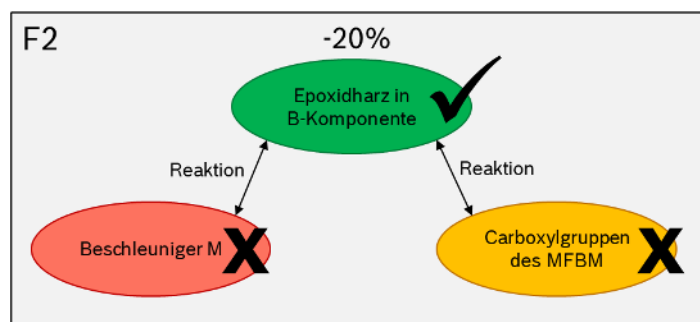


Abbildung 117: Beschreibung der Reaktion des Epoxidharzes in der B-Komponente mit dem Beschleuniger M und den Carboxylgruppen. Bei Lackvariante F2 ist im Vergleich zu A1 20 Gewichtsprozent weniger Epoxidharz beigegeben. Ein „✓“ bedeutet eine vollständige und ein „x“ eine unvollständige Abreaktion der Komponente.

Der Einfluss eines um 20 Gewichtsprozent geringeren Epoxidharzanteil in der B-Komponente auf die Vernetzung des Lötstopplacks kann **Abbildung 117** entnommen werden. Das Reaktionsgleichgewicht bleibt erhalten, jedoch verbleiben aufgrund zu geringer Epoxidharzmenge sowohl Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels als auch primäre Amingruppen des Beschleunigers unvernetzt.

Modelle für Lacke mit Tendenz zu vollständig abreagiertem Epoxidanteil

Das skizzierte Modell der Vernetzung von Lackvariante F2 und G1 ist in **Abbildung 118** dargestellt.

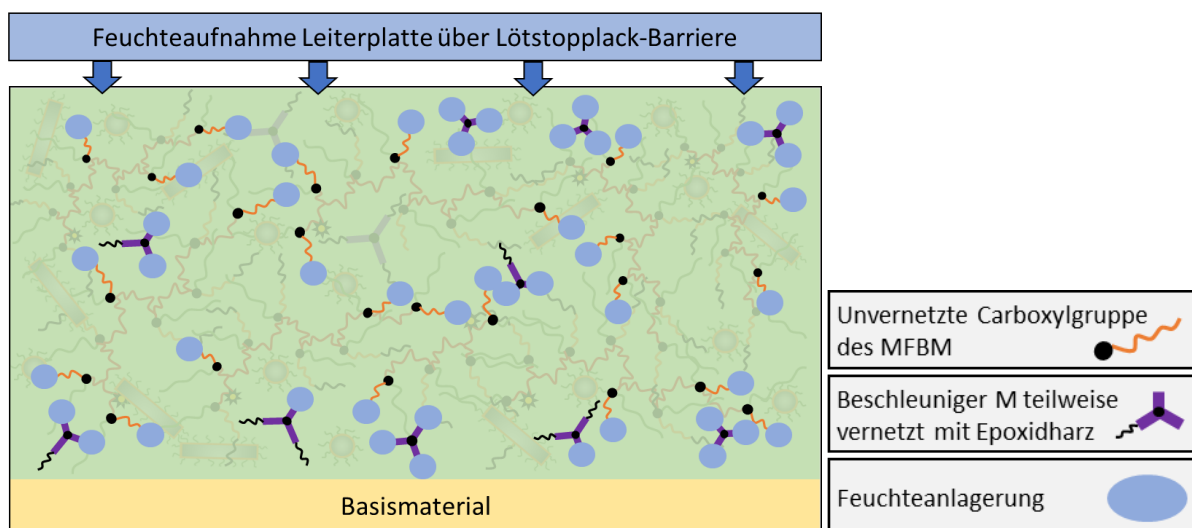


Abbildung 118: Lackvariante F2 und G1, Modell der Lackvernetzung. Im Hintergrund sind die vollständig vernetzten Lackanteile sowie die vollständig dispergierten Füllstoffen gezeigt. Im Vordergrund sind die teilweise oder vollständig unvernetzten Carboxylgruppen sowie die primären Amingruppen des Beschleunigers M dargestellt. Die REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung kann aufgrund gleicher Füllstoffe Lack A1 in **Abbildung 75** entnommen werden.

Bei beiden Lacksystemen kommt es durch die unvernetzten Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels, sowie der primären Amingruppen des Beschleunigers zu einer erhöhten

Feuchtaufnahme im Lötstopplackbindemittel im Vergleich zu Lackvariante A1 und das anodische Migrationsphänomen findet bei beiden Lackvarianten im Vergleich zu A1 vermehrt im Lötstopplack statt. Dies äußert sich zum einen in häufigerem Auftreten von AMP-Pfaden im Lötstopplack aber auch in größerer AMP-Länge im Lötstopplack.

Der Unterschied von Lackvariante F2 im Vergleich zu Lackvariante G1 besteht darin, dass sich bei Lackvariante F2 durch den geringeren Epoxidharzanteil in der B-Komponente im Vergleich zu dem Epoxidharzanteil in Lackvariante G1 ein weniger dichtes Polymernetzwerk ausbilden kann. Dies kann zum Beispiel durch die mit einem geringeren Epoxidanteil einhergehende geringere Quervernetzung der im Rest der Epoxidgruppe vorhandenen funktionalen Gruppen verursacht werden. In diesem, nun nicht mit Polymerketten belegten Volumen kommt es zusätzlich zu einer höheren Feuchtaufnahme. In Abschnitt 5.4 wurde bereits die Korrelation der Feuchtaufnahme des Lötstopplacks mit dem Vernetzungsgrad diskutiert. Durch die auf diese Weise höhere Feuchtaufnahme bei Lackvariante F2 im Vergleich zu G1 findet bei F2 ein deutlich höherer Anteil der AMP im Lötstopplack statt. Die AMP-Pfadlängen teilweise im Basismaterial und Lötstopplack sind bei G1 und F2 vergleichbar, auch treten sie ähnlich häufig auf. Die Länge der rein im Lötstopplack auftretenden AMP ist zwar bei G1 größer als bei F2, hier ist aber zu beachten, dass das AMP bei G1 in lediglich 10 % der Fälle und bei F2 in 48 % der Fälle auftritt und die Streuung der AMP-Längen rein im Lötstopplack bei Lackvariante G1 sehr groß ausfällt im Vergleich zu F2.

9.2.4.2 Tendenz zu unvollständig abreagiertem Epoxidanteil

In Lackvariante F1 mit 20 Gewichtsprozent mehr Epoxidanteil in der B-Komponente sowie Lackvariante G2 mit 30 Gewichtsprozent weniger Beschleuniger M liegen nach der Aushärtung noch ungebundene Epoxidharzkomponenten vor.

Bei unvernetztem Epoxidanteil ist über die Feuchteanlagerung nicht abreagierter funktionaler Gruppen im Rest der Epoxidgruppe nichts bekannt. Nicht vernetztes Epoxidharz wirkt in dem in dieser Arbeit ausgearbeitetem Modell in der Art, dass die Vernetzungsdichte des umliegenden Lacks herabgesetzt wird, da das zusätzliche Epoxidharz keine Verbindungen mit dem umliegenden Netzwerk eingeht und somit die Vernetzung „stört“. Zusätzlich kann Oxiranring sowie im Rest des Epoxidharzes absorbiert werden.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die Analyseergebnisse von Lackvarianten F1 und G2 vorgestellt. Anschließend wird das für beide gültige Modell der Lackvarianten mit unvollständig abreagiertem Epoxidanteil vorgestellt.

Lackvariante G2

Bei Lackvariante G2 wurde dem Lack 30 Gewichtsprozent weniger Beschleuniger in der A-Komponente beigegeben als Lackvariante A1.



Abbildung 119: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante G2.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante G2 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 119** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze sind verzweigt.

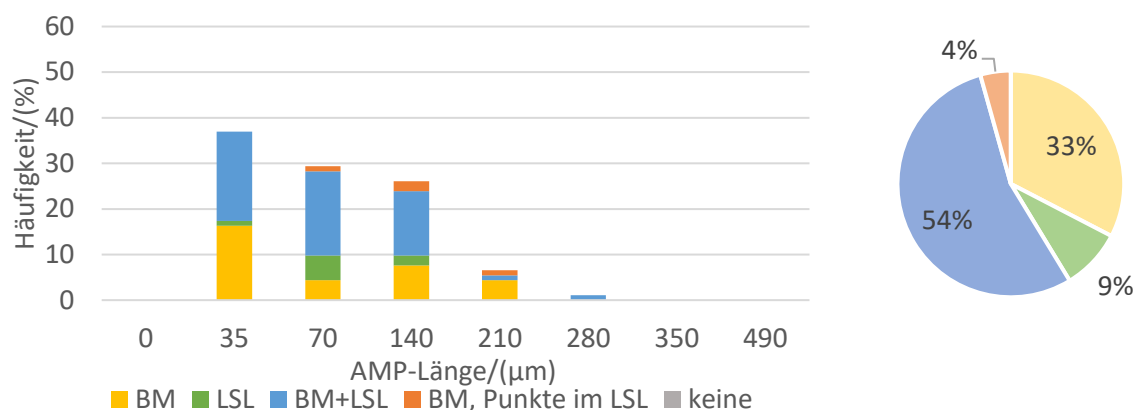


Abbildung 120: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante G2. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 120** entnommen werden. Es fällt auf, dass der Anteil an AMP-Pfaden teilweise im Basismaterial im Vergleich zu Lackvariante A1 mit 54 % höher ausfällt als bei A1 mit 39 %. Zusätzlich ist der Anteil an vollständig im Lötstopplack auftretenden Migrationspfaden mit 9 % bei G2 größer als bei A1 mit 2 % der Leiterbahnspitzen. Der Anteil an AMP-Pfaden, die rein im Basismaterial migrieren, fällt mit 33 % etwas höher aus als bei A1 mit 22 %. Der Anteil von AMP-Pfaden, die hauptsächlich im Basismaterial migrieren, aber mit Punkten im Lötstopplack, beträgt nur noch 4 % der Leiterbahnspitzen bei G2 im Vergleich zu A1 mit 37 %. Damit hat sich die hauptsächliche Migrationsebene der AMP-Pfade in den Lötstopplack verlagert.

Tabelle 56: Länge der AMP-Pfade bei Lack G2 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK G2		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP-LÄNGE AN DER LB-SPITZE IN μm	MW l_{G2}	83 ± 5	88 ± 2	82 ± 1	140 ± 14	86 ± 6
	Maximum	140	210	280	210	280
	Minimum	35	35	35	70	35
ANZAHL LB		8	30	50	4	92
$(l_{G2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		$(+58 \pm 38) \%$	$(-64 \pm 1) \%$	$(-52 \pm 1) \%$	$(-46 \pm 5) \%$	$(-61 \pm 3) \%$

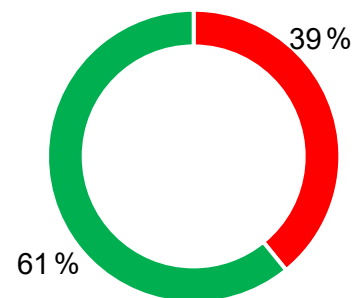
Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 56** entnommen werden. Allein die AMP-Pfade rein im Lötstopplack fallen im Vergleich zu A1 länger aus. In allen anderen Migrationsebenen sind die AMP-Längen im Vergleich zu A1 kürzer:

im Basismaterial um 64 %, im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack um 46 % und teilweise im Basismaterial und Lötstopplack um 52 %.

Die AMP-Längen in den unterschiedlichen Migrationsebenen zeigen keine klare Tendenz unterschiedlich ausgeprägter AMP-Längen. Die AMP-Pfade im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack sind zwar sehr lang aber mit nur 4 % Häufigkeit vernachlässigbar.

Tabelle 57: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack G2 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack G2 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK G2		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{G2}	8 ± 1
	Maximum	20
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		92
$(l_{G2} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(-68 \pm 4)\%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann Tabelle 57 entnommen werden. Zwischen 61 % der Leiterbahnen findet kein AMP statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel 68 % kürzer als bei Lackvariante A1. Die maximale Länge des AMP-Pfads zwischen den Leiterbahnen nimmt ebenfalls bis auf 20 μm ab.

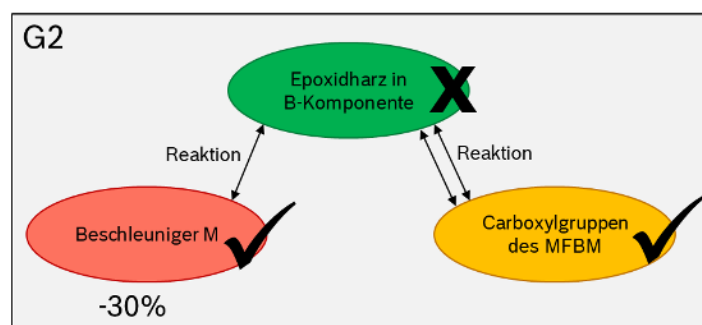


Abbildung 121: Beschreibung der Reaktion des Epoxidharzes in der B-Komponente mit dem Beschleuniger M und den Carboxylgruppen. Bei Lackvariante G2 ist im Vergleich zu A1 30 Gewichtsprozent weniger Beschleuniger M beigegeben. Ein „✓“ bedeutet eine vollständige und ein „X“ eine unvollständige Abreaktion der Komponente.

Der Einfluss eines um 30 Gewichtsprozent geringeren Beschleunigeranteil M in der A-Komponente auf die Vernetzung des Lötstopplacks kann Abbildung 121 entnommen werden. Durch einen geringeren Beschleunigeranteil wird das Reaktionsgleichgewicht des Epoxidharzes gestört. Die Carboxylgruppen vernetzen vollständig mit dem Epoxidharz, durch den Mangel an Beschleuniger bleibt ein Anteil Epoxidharz unvernetzt.

Lackvariante F1

Bei Lackvariante F1 wurde die Menge des Epoxidharzes in der B-Komponente um 20 Gewichtsprozent der Ursprungslackvariante A1 erhöht.

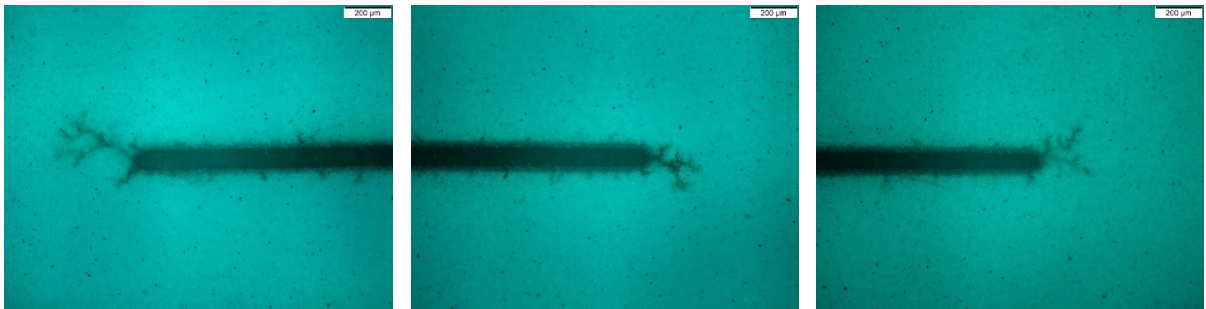


Abbildung 122: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante F1.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens bei Lackvariante F1 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 122** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die Verzweigung der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze ist ähnlich ausgeprägt wie bei Lackvariante A1.

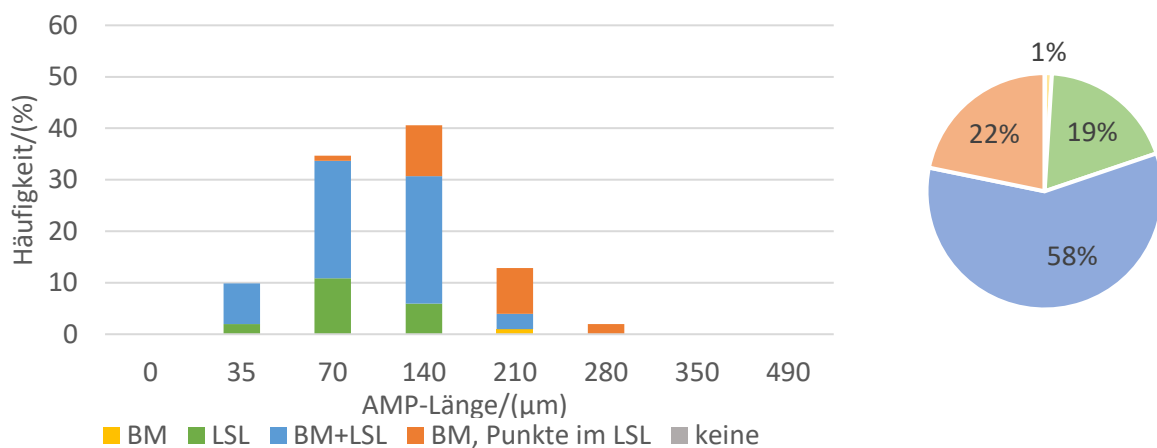


Abbildung 123: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante F1. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 123** entnommen werden. Es fällt auf, dass der Anteil an AMP-Pfaden teilweise im Basismaterial mit 58 % größer ausfällt als bei Lackvariante A1 mit 39 % der Leiterbahnspitzen. Der Anteil an vollständig im Lötstopplack auftretenden Migrationspfaden nimmt mit 19 % der Leiterbahnspitzen bei F1 ebenfalls einen größeren Anteil ein als bei A1 mit 2 %. Der Anteil an AMP-Pfaden,

die rein im Basismaterial migrieren, liegt mit 1 % der Leiterbahnspitzen im Vergleich zu A1 deutlich niedriger, dort lag der Anteil noch bei 22 %. Der Anteil AMP-Pfaden, die im Lötstopplack mit Punkten im Basismaterial auftreten, nimmt ebenfalls mit 22 % bei F1 einen geringeren Anteil an als noch bei A1 mit 37 % der Leiterbahnspitzen. Damit hat sich das AMP im Vergleich zu A1 mehr in die Lötstopplackebene verlagert.

Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann Tabelle 58 entnommen werden. Nur die AMP-Pfade rein im Lötstopplack sind länger als bei A1, alle anderen AMP-Pfade fallen kürzer aus als bei A1. Am kürzesten sind die AMP im Basismaterial und Lötstopplack, mit im Vergleich zu A1 um 41 % kürzeren Pfaden. Die AMP-Länge im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack fällt um 32 % kürzer aus im Vergleich zu A1. Die AMP-Länge ist im Basismaterial lediglich um 14 % kürzer als bei A1, dort konnte aber auch nur ein AMP-Pfad festgestellt werden. Im Mittel ist die AMP-Länge um 46 % kürzer als bei A1. Die AMP-Längen in den unterschiedlichen Migrationsebenen zeigen klar auf, dass die AMP-Länge rein im Lötstopplack am kürzesten ausfällt.

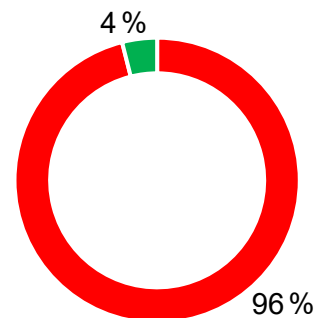
Tabelle 58: Länge der AMP-Pfade bei Lack F1 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK F1		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP- LÄNGE AN DER LB- SPITZE IN µm	MW l_{F1}	88 ± 2	210 ± 0	102 ± 1	178 ± 2	117 ± 6
	Maximum	140	210	210	280	280
	Minimum	35	210	35	70	35
ANZAHL LB		19	1	59	22	101
$(l_{F1} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100\%$		$(+68 \pm 40)\%$	$(-14 \pm 0)\%$	$(-40 \pm 1)\%$	$(-32 \pm 1)\%$	$(-46 \pm 3)\%$

Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann **Tabelle 59** entnommen werden. Zwischen fast allen Leiterbahnen findet ein anodisches Migrationsphänomen statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel um 3 % kürzer als bei Lackvariante A1. Die maximale Länge des AMP-Pfads zwischen den Leiterbahnen entspricht derer bei Lackvariante A1.

Tabelle 59: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack F1 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil der Leiterbahnen bei Lack F1 mit AMP zwischen den Leiterbahnen (rot) und ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK F1		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{F1}	24 ± 1
	Maximum	70
	Minimum	0
ANZAHL LEITERBAHNEN		101
$(l_{F1} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		$(-3 \pm 6) \%$



Der Einfluss eines um 20 Gewichtsprozent höheren Epoxidharzanteil in der B-Komponente auf die Vernetzung des Lötstopplacks kann **Abbildung 124** entnommen werden.

Das Epoxidharz reagiert gleichzeitig mit dem Beschleuniger und den Carboxylgruppen. Beide Reaktionen finden gleichberechtigt statt bis alle Carboxylgruppen und primäre Amingruppen des Beschleunigers abreagiert sind. Es bleibt ein Epoxidharzüberschuss, der unvernetzt bleibt.

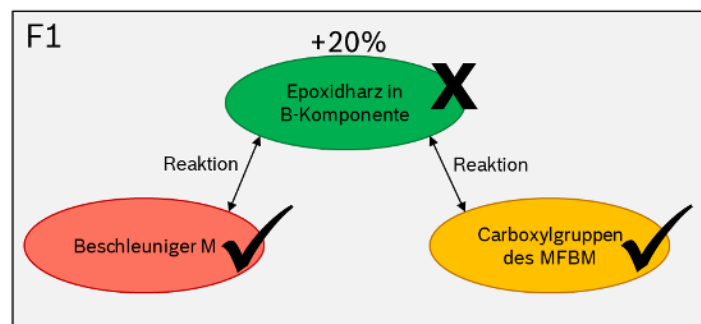


Abbildung 124: Beschreibung der Reaktion des Epodixharzes in der B-Komponente mit dem Beschleuniger M und den Carboxylgruppen. Bei Lackvariante F1 ist im Vergleich zu A1 20 Gewichtsprozent mehr Epoxidharz beigegeben. Ein „✓“ bedeutet eine vollständige und ein „X“ eine unvollständige Abreaktion der Komponente.

Modelle mit Tendenz zu unvollständig abreagiertem Epoxidharzanteil

Das skizzierte Modell der Vernetzung von Lackvariante F1 und G2 ist in **Abbildung 125** dargestellt.

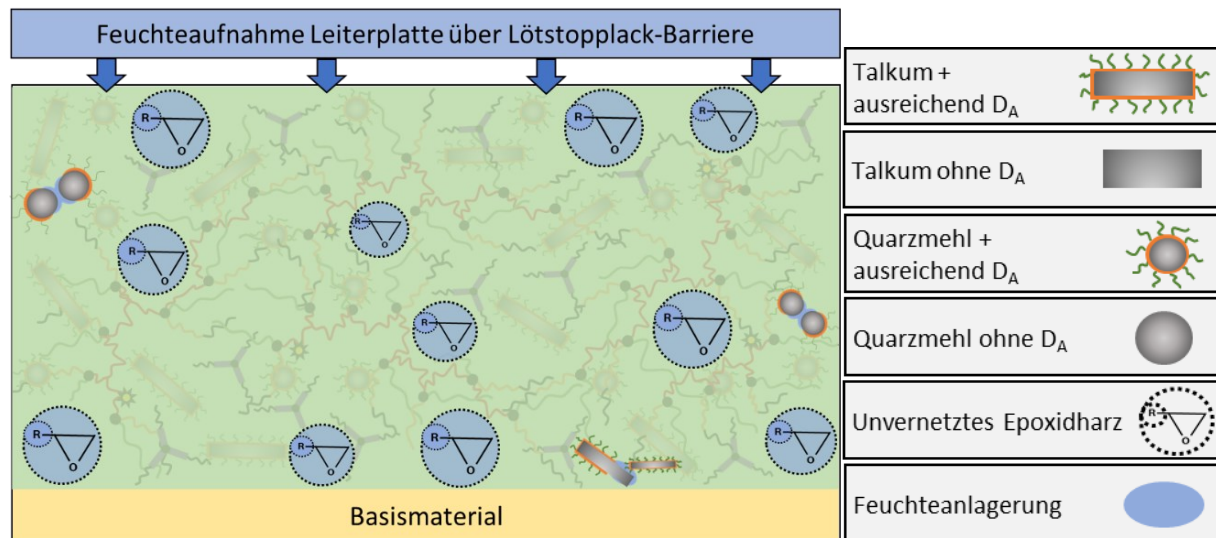


Abbildung 125: Lackvariante F1 und G2, Modell der Lackvernetzung. Im Hintergrund sind die vollständig vernetzten Lackanteile sowie die vollständig dispergierten Füllstoffe gezeigt. Im Vordergrund sind die unvernetzten Epoxidgruppen gezeigt sowie möglicherweise agglomerierte Füllstoffe. Die REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung kann aufgrund gleicher Füllstoffe Lack A1 in Abbildung 75 entnommen werden.

Es gibt mehrere Möglichkeiten, wie sich ein Lötstopplack mit Tendenz zu unvernetzten Epoxidgruppen ausbilden kann. Diese und ihr Einfluss auf die Feuchteabsorption im Lötstopplack werden im Folgenden diskutiert. Generell ist aufgrund des vermehrten Auftretens von AMP im Lötstopplack bei Lackvariante F1 und G2 im Vergleich zu Lackvariante A1 anzunehmen, dass die Feuchtaufnahme der Lacke größer ist als bei A1:

- In den unvernetzten Bereichen im Polymer kommt es zu einer erhöhten Feuchteabsorption, wie bereits in Abschnitt 9.2.2.2 diskutiert
- Es wäre möglich, dass das ungebundene Epoxidharz mit den Carboxylgruppen des Dispergiermittels D_A wechselwirkt. Wie sich ein potentieller Dispergiermittelmangel auf die Füllstoffeinbindung in das Bindemittelnetzwerk auswirkt und für eine erhöhte Feuchtaufnahme im Lötstopplack sorgen kann, wurde bereits in Abschnitt 9.2.2.2 diskutiert.
- Über den Rest des Epoxidharzes und seine Vernetzungseigenschaften sind keine Details bekannt. Es ist möglich, dass dieser unvernetzte Rest über hydrophile reaktive Gruppen verfügt, was die Feuchteabsorption des Lötstopplacks in Bereichen unvernetzter Epoxidharzgruppen erhöht.
- Eine weitere Möglichkeit wäre, dass der Beschleuniger mehr Epoxidharz als in Variante A1 binden kann, aber vom Lackhersteller immer weniger Epoxidharz zur Vernetzung beigegeben wird um bestimmte Lötstopplackeigenschaften (wie zum Beispiel die Temperaturbeständigkeit) zu erhalten. Mehr an Beschleuniger M gebundenes

Epoxidharz würde in diesem Fall bedeuten, dass es zwar an den Beschleuniger M gebunden wird, aber diese Verbindung nur sehr instabil ist, wodurch das Risiko einer Wiederaufspaltung besteht. In diesem Fall würden wieder ungebundene hydrophile Amingruppen vorliegen was für eine erhöhte Wasserabsorption sorgt.

Im Nachfolgenden werden die Unterschiede zwischen Lackvariante G2 und F1 herausgearbeitet, die bei den beiden Lötstopplacken mit Tendenz zu unvollständig abreagiertem Epoxidanteil, zu unterschiedlich intensiven AMP und unterschiedlichen Anteilen an AMP im Lötstopplack und Basismaterial führen:

Ein erster Unterschied ist der Anteil an möglicherweise nicht abreagierten Epoxidharzgruppen bei den beiden Lacken. Bei Lackvariante F1 sind das Netzwerk des multifunktionalen Bindemittels und des Beschleunigers M in derselben Konzentration wie auch in Lackvariante A1 vertreten. Auch das Reaktionsgleichgewicht ist im Vergleich zu A1 nicht verschoben.

Bei Lackvariante G2 bildet sich durch den geringeren Beschleunigeranteil M das Netzwerk des multifunktionalen Bindemittels zwar vollständig aus, aber es ist im Vergleich zu F1 und A1 aufgrund eines geringeren Beschleunigeranteils weniger stark vertreten. Das Reaktionsgleichgewicht hat sich im Vergleich zu A1 auf die Seite des multifunktionalen Bindemittels verlagert. Zusammengefasst ist die unterschiedliche Anzahl möglicher unverbundener Epoxidgruppen bei F1 und G2 und das unterschiedliche Verhältnis von Beschleunigernetzwerk und Netzwerk des multifunktionalen Bindemittels für die sich voneinander unterscheidenden AMP der beiden Lacke verantwortlich.

Der geringere Beschleunigeranteil M bei Lackvariante G2 führt zu einem im Vergleich zu Lackvariante F1 höheren Anteil der Migrationen im Basismaterial. Auch die mittlere AMP-Länge an den Leiterbahnspitzen fällt bei Lackvariante G2 mit einem geringeren Anteil an Beschleuniger M mit 61 % kürzeren AMP-Pfaden im Vergleich zu A1 geringer aus als bei F1 mit 47 % kürzeren AMP-Pfaden. Hinzu kommt, dass der Lack mit dem geringeren Beschleunigeranteil zwischen 61 % der Leiterbahnen keine AMP zeigt, wohingegen bei Lackvariante F1 zwischen annähernd allen Leiterbahnen AMP beobachtet werden kann. Auch die maximale AMP-Länge von 20 µm zwischen den Leiterbahnen und die um im Mittel 68 % kürzeren AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen im Vergleich zu nur 8 % kürzeren Pfaden zwischen den Leiterbahnen bei F1 und derselben maximalen AMP-Länge im Vergleich zu A1 zeigen auf, dass das AMP bei Lackvariante G2 im Vergleich zu F1, deutlicher unterdrückt wird.

9.2.5 Einfluss der Art des Beschleunigers auf das AMP

Beschleuniger D benötigt im Vergleich zu Beschleuniger M eine andere Anzahl an Epoxidharzmolekülen zur vollständigen Vernetzung. Dadurch, dass der Beschleuniger D nur ein Drittel des Molekulargewichts des Beschleunigers M aufweist, ergibt sich eine Menge von dreimal so vielen reaktiven Beschleunigermolekülen D wie Beschleunigermolekülen M auf dieselbe Anzahl an Epoxidharzmolekülen. Laut Hersteller liegt die Reaktionsgeschwindigkeit von Beschleuniger M in ähnlicher Größenordnung wie Beschleuniger D. Ein Beschleunigermolekül M kann mit maximal sechs Epoxidharzmolekülen reagieren, ein Beschleunigermolekül D mit maximal vier. Aufgrund des im Vergleich zu einem Beschleunigermolekül M geringeren Molekulargewichts eines einzelnen Beschleunigermoleküls D wird die maximal mögliche Anzahl reaktiver Amingruppen im Vergleich zu Lack A1 durch die Verwendung von Beschleuniger D verdreifacht.

Lackvariante G3

Bei Lackvariante G3 wurde der ursprüngliche Beschleuniger M in der A-Komponenten im gleichen Gewichtsprozent wie in der Ursprungslackvariante A1 durch Beschleuniger D ersetzt.



Abbildung 126: Senkrechte Aufsicht mit dem Lichtmikroskop im UV-Modus auf anodische Leiterbahnspitzen der Lackvariante G3.

Das typische Aussehen des anodischen Migrationsphänomens von Lackvariante G3 an der Leiterbahnspitze kann **Abbildung 126** entnommen werden. An allen Leiterbahnspitzen wird nach dem HV-SIR-Test ein anodisches Migrationsphänomen festgestellt. Die AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze sind sehr verzweigt und deutlich verbreitert.

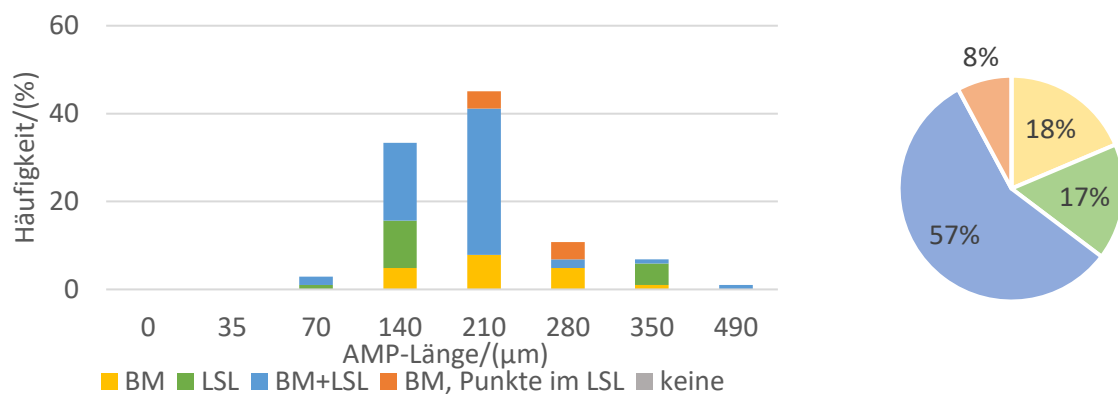


Abbildung 127: Migrationsebenen der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze bei Lackvariante G3. Links: Verteilung über AMP-Längen. Rechts: Gesamtverteilung.

Die Verteilung der Migrationsebenen und Längen der AMP-Pfade können **Abbildung 127** entnommen werden. Es fällt auf, dass der Anteil an AMP-Pfaden teilweise im Basismaterial und Lötstopplack mit 57 % der Leiterbahnspitzen deutlich höher ausfällt als bei A1 mit 39%. Auch rein im Lötstopplack verlaufende AMP-Pfade treten bei Lackvariante F2 mit 17 % häufiger auf als bei A1 mit 2 % der Leiterbahnspitzen. Damit hat sich die Migrationsebene der AMP-Pfade deutlich in den Lötstopplack verlagert. Der Anteil an AMP-Pfaden im Basismaterial und im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack liegt bei 18 % und 8 % und fällt damit niedriger aus als bei A1 mit 22 % und 37 % der Leiterbahnspitzen.

Tabelle 60: Länge der AMP-Pfade bei Lack G3 an der Leiterbahnspitze verteilt auf die einzelnen Migrationsebenen. Zusätzlich ist der Mittelwert (MW) aller AMP-Pfadlängen an den untersuchten LB-Spitzen verzeichnet, die maximale und minimale Länge, die Anzahl an Messwerten und die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %. Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten LB-Spitzen gebildet.

LACK G3		LSL	BM	BM + LSL	BM + PUNKTE IM LSL	GESAMT
AMP-LÄNGE AN DER LB-SPITZE IN μm	MW l_{G3}	198 ± 6	217 ± 3	193 ± 1	245 ± 5	202 ± 7
	Maximum	350	350	490	280	490
	Minimum	70	140	70	210	70
ANZAHL LB		17	19	58	8	102
$(l_{G3} - l_{A1}) / l_{A1} \cdot 100 \%$		$(+276 \pm 89) \%$	$(-11 \pm 2) \%$	$(+12 \pm 1) \%$	$(-6 \pm 2) \%$	$(-7 \pm 5) \%$

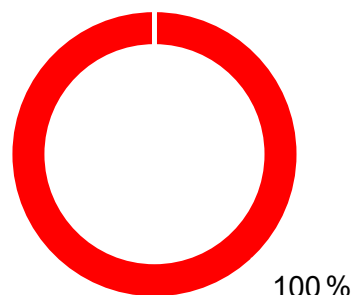
Die Länge der AMP-Pfade in den unterschiedlichen Migrationsebenen kann **Tabelle 60** entnommen werden. Auffällig sind die im Vergleich zu A1 deutlich längeren AMP-Pfade rein im Lötstopplack. Auch die Länge der AMP-Pfade teilweise im Lötstopplack fällt bei Lackvariante G3 um 11 % größer aus im Vergleich zu A1. Die AMP-Pfade im Basismaterial sind um

12 % und im Basismaterial mit Punkten im Lötstopplack um 6 % kürzer im Vergleich zu A1. Insgesamt ist die AMP-Länge im Mittel um 7 % kürzer im Vergleich zu A1.

Die AMP-Längen in den unterschiedlichen Migrationsebenen weisen etwa die gleiche Länge auf.

Tabelle 61: Links: Länge der AMP-Pfade bei Lack G3 zwischen den Leiterbahnen in μm . Der Mittelwert wird über alle auf AMP untersuchten Leiterbahnen gebildet. Zusätzlich verzeichnet ist die maximal beobachtete AMP-Länge. Rechts: Anteil Leiterbahnen mit AMP bei Lack G3 zwischen den Leiterbahnen (rot), ohne (grün). Auch verzeichnet ist die Differenz der AMP-Längen relativ zu Lackvariante A1 in %.

LACK G3		
AMP-LÄNGE ZWISCHEN DEN LB IN μm	Mittelwert l_{G3}	39 ± 2
	Maximum	70
	Minimum	20
ANZAHL LEITERBAHNEN		102
$(l_{G3} - l_{A1})/l_{A1} \cdot 100 \%$		$(+57 \pm 11) \%$



Die Länge der AMP-Pfade zwischen den Leiterbahnen kann Tabelle 61 entnommen werden. Zwischen allen Leiterbahnen findet ein anodisches Migrationsphänomen statt. Die AMP-Pfade sind im Mittel um 57 % länger als bei Lackvariante A1. Damit ist Lackvariante G3 die einzige Lackvariante bei der zwischen der Leiterbahn eine Zunahme des AMP im Vergleich zu A1 beobachtet werden konnte. Die maximale Länge des AMP-Pfads zwischen den Leiterbahnen entspricht derer bei Lackvariante A1.

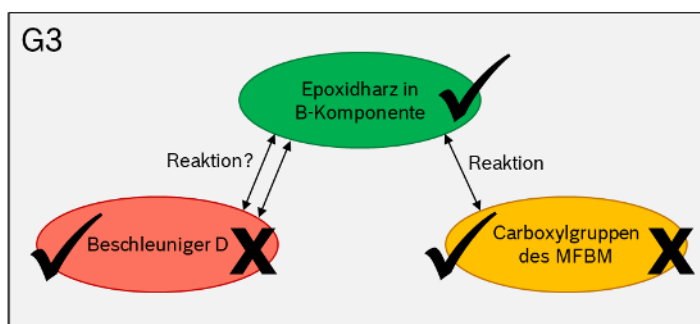


Abbildung 128: Beschreibung der Reaktion des Epoxidharzes in der B-Komponente mit dem Beschleuniger M und den Carboxylgruppen. Bei Lackvariante G3 ist Beschleuniger D anstelle von Beschleuniger M bei Lackvariante A1 beigegeben. Ein „✓“ bedeutet eine vollständige und ein „X“ eine unvollständige Abreaktion der Komponente.

Der Einfluss eines anderen Beschleunigers D in der A-Komponente, beigegeben im gleichen Gewichtsprozent wie der ursprüngliche Beschleuniger D, auf die Vernetzung des Lötstopplacks kann Abbildung 128 entnommen werden.

Durch die höhere Anzahl vernetzungsfähiger Anteile in Beschleuniger D und die höhere Anzahl an reaktionsfähigen Molekülen liegt das Reaktionsgleichgewicht trotz gleicher Reaktionsgeschwindigkeit der Einzelmoleküle D und M auf der Beschleunigerseite. Das Epoxidharz vernetzt vollständig. Als Resultat der aus dem Gleichgewicht gebrachten Reaktion können drei Fälle unterschieden werden:

- Die Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels verbleiben aufgrund des verschobenen Reaktionsgleichgewichts teilweise unvernetzt, der Beschleuniger D vernetzt vollständig.
- Die Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels verbleiben aufgrund des verschobenen Reaktionsgleichgewichts teilweise unvernetzt, ebenso wie der Beschleuniger D aufgrund der höheren Anzahl an reaktionfähigen Amingruppen im Vergleich zu Beschleuniger M.
- Eine weitere Möglichkeit wäre, falls sich das Reaktionsgleichgewicht nicht verschiebt, dass die Carboxylgruppen vollständig abreagieren, in diesem Fall bleibt nur unvernetzter Beschleuniger D übrig.

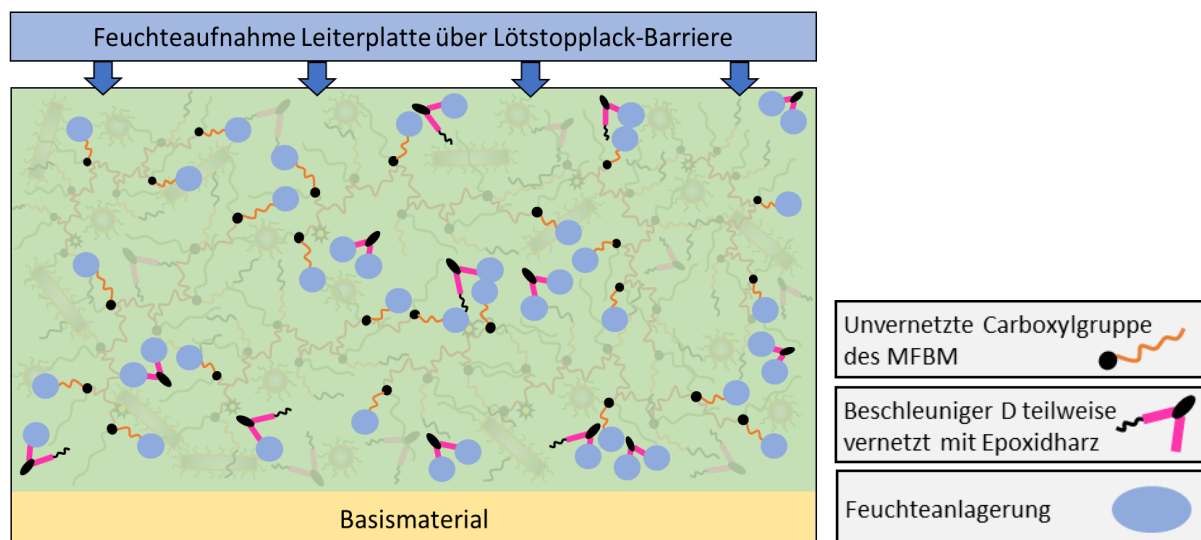


Abbildung 129: Lackvariante G3, Modell der Lackvernetzung. Im Hintergrund sind die vollständig vernetzten Lackanteile sowie die vollständig dispergierten Füllstoffen gezeigt. Im Vordergrund sind die teilweise oder vollständig unvernetzten Carboxylgruppen sowie die primären Amingruppen des Beschleunigers D dargestellt. Die REM-Aufnahme der Füllstoffverteilung kann aufgrund gleicher Füllstoffe Lack A1 in Abbildung 75 entnommen werden.

Das Modell der Vernetzung von Lackvariante G3 ist in **Abbildung 129** dargestellt. Bei Lackvariante G3 bildet sich dieselbe Art der Vernetzung des multifunktionalen Bindemittels mit dem Epoxidharz aus wie bei Lackvariante F2 und G1 mit vollständig vernetztem Epoxidharz in der B-Komponente, das Netzwerk des Beschleunigers D weist jedoch eine andere Struktur auf. Durch die größere beigegebene Menge Beschleuniger D mit einhergehender höherer Anzahl reaktiver Amingruppen ist die Wahrscheinlichkeit von nicht abreagierten Amingruppen bei Lackvariante G3 sehr hoch. Durch die unvernetzten Amingruppen steigt die Hydrophilie des

Bindemittels, was die im Vergleich zur Ursprungslackvariante A1 höhere Anzahl an Migrationsphänomenen im Lötstopplack erklärt. Die Vernetzungsreaktion in Lackvariante G3 sowohl mit den Carboxylgruppen als auch Beschleuniger D wird durch die höhere Anzahl reaktiver Gruppen im Beschleuniger D auf die Beschleunigerseite verlagert. Damit bleiben auch Carboxylgruppen des multifunktionalen Bindemittels unvernetzt, was die Feuchtaufnahme des Bindemittels im Vergleich zu Lackvariante A1 weiter steigert.

Die mittlere Länge der AMP-Pfade an der Leiterbahnspitze ist bei G3 in einer ähnlichen Größenordnung wie bei Lackvariante A1. Auffällig ist die Länge der rein im Lötstopplack auftretenden AMP-Pfade. Diese fallen bei Lackvariante G3 um 276 % länger aus und auch der Anteil an AMP-Pfaden rein im Lötstopplack ist mit 17 % deutlich höher als bei A1 mit 2 %. Die maximale AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen liegt in der gleichen Größenordnung wie bei der Ursprungslackvariante A1, ebenso wie die Anzahl der betroffenen Leiterbahnen. Auffällig ist allerdings die mittlere AMP-Länge zwischen den Leiterbahnen bei Lackvariante G3. Mit 38 μm liegt diese deutlich höher als bei Lackvariante A1 mit 25 μm . Zusammengefasst wirkt der Beschleuniger D im Vergleich zu Beschleuniger M bei A1 migrationsfördernd. Gründe dafür liegen in dem anders ausgebildeten Netzwerk des Beschleunigers im Vergleich zu A1, sowie der erhöhten Feuchtaufnahme des Lacks durch ungebundene Carboxyl- und primäre Amingruppen.

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, „Elektromobilität in Deutschland,“ 2020. [Online]. Available: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/elektromobilitaet.html>. [Zugriff am 21. Dezember 2020].
- [2] Verband der Automobilindustrie (VDA), „Elektromobilität,“ [Online]. Available: <https://www.vda.de/de/themen/innovation-und-technik/elektromobilitaet/startseite-elektromobilitaet.html>. [Zugriff am 11. November 2020].
- [3] F. Kuhnert, C. Stürmer und A. Koster, „eascy – Die fünf Dimensionen der Transformation der Automobilindustrie,“ PricewaterhouseCoopers GmbH Wirtschaftsprüfungsgesellschaft, September 2017.
- [4] H. Katzier, Leiterplattentechnologie - Elektrische Eigenschaften von Mehrlagenleiterplatten, Renningen: expert verlag, 2010.
- [5] G. Herrmann, Handbuch der Leiterplattentechnik Band 3, Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 1993.
- [6] W. Jillek und G. Keller, Handbuch der Leiterplattentechnik Band 4, Erste Auflage Hrsg., Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag, 2003.
- [7] D. Schöni, Schaltungs- und Leiterplattendesign im Detail - Von der Idee zum fertigen Gerät, Norderstedt: BoD - Books on Demand, 2017.
- [8] Schweizer Elektronik AG, 29.09.2020. [Online]. Available: <https://www.schweizer.ag/de/technologien/basisdaten/herstellung-einer-leiterplatte.html>.
- [9] IPC Association Connecting Electronics Industries, „IPC-HDBK-840 - Solder Mask Handbook,“ August 2006.
- [10] D. Meschede, Gerthsen Physik, 22. Auflage, Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2006.
- [11] IPC Association Connecting Electronics Industries, „IPC-SM-840E - Qualification and Performance Specification of Permanent Solder Mask and Flexible Cover Materials,“ Dezember 2010.
- [12] Lackwerke Peters GmbH + Co KG, „Fotostrukturierbare Lötstopplacke - Eigenschaftsprofile sowie Prüfmethode für die Baugruppenfertigung,“ in *ZVEI-Technologieforum "Qualitätssicherung bei Leiterplatten als Schnittstelle zur Baugruppenfertigung"*, Oberpfaffenhofen-Weßling, 1998.

- [13] D. Schucht, „Persönliche Information zu Lötstopplacken,“ Lackwerke Peters GmbH + Co KG, 2018.
- [14] T. Brock, M. Groteklaes, P. Mischke und B. Strehmel, Lehrbuch der Lacktechnologie, 5. Auflage, Vincentz Network, Farbe und Lack, 2017.
- [15] B. Müller, Additive kompakt, Hannover: Vincentz Network Farbe und Lack Edition, 2009.
- [16] A. Freytag, X. Lin und H. Janos, „Flüssig formuliert,“ *Farbe und Lack*, pp. 25-27, 2010.
- [17] D. Gysau, Füllstoffe, Hannover: Vincentz Network GmbH & Co. KG, 2014.
- [18] B. Müller und U. Poth, Lackformulierung und Lackrezeptur, Hannover: Vincentz Network, Farbe und Lack, 2017.
- [19] C. DeArmitt und R. Rothon, „Dispersants and Coupling Agents,“ in *Applied Plastics Engineering Handbook, Processing and Materials*, 2011, pp. 441-454.
- [20] Evonik Industries, Der Große TEGO, Evonik Industries, 4. Auflage, 2014.
- [21] BYK Additives & Instruments, „Netz- und Dispergieradditive,“ Broschüre aufgerufen August 2018.
- [22] MÜNZING CHEMIE GmbH, „Dispergiertechnologie,“ *Netz- und Dispergiermittelserie*, PCA 04/2012.
- [23] BASF, „Little helpers love great achievements: Practical Guide to Dispersing Agents,“ Broschüre aufgerufen 2019.
- [24] S. Koltzenburg, M. Maskos und O. Nuyken, Polymere - Synthese, Eigenschaften und Anwendungen, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [25] International Organization for Standardization, „International Standard ISO 11359-2: Plastics-Thermomechanical analysis (TMA)-Part 2: Determination of coefficient of linear thermal,“ 1991.
- [26] M. D. Lechner, K. Gehrke und E. H. Nordmeier, Makromolekulare Chemie - Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker, Basel: Birkhäuser Verlag, 2010.
- [27] M. Bonnet, Kunststoffe in der Ingenieur Anwendung, Wiesbaden: Vieweg + Teubner, GWV Fachverlage GmbH, 2009.
- [28] T. G. Fox und S. Loshaek, „Influence of molecular weight and degree of crosslinking on the specific volume and glass temperature of polymers,“ *Journal of Polymer Science Vol 15*, pp. 371-390, Februar 1955.
- [29] W. D. Callister und D. G. Rethwish, Materialwissenschaften und Werkstofftechnik - Eine Einführung, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2013.

- [30] P. Gilormini und J. Verdu, „On the role of hydrogen bonding on water absorption in polymers,“ *Polymer* 142, pp. 164-169, 2018.
- [31] J. Zhou und J. P. Lucas, „Hygrothermal effects of epoxy resin. Part 1: The nature of water in epoxy,“ *Polymer* 40, pp. 5505-5512, 1999.
- [32] L. E. Nielsen, „Crosslinking-effect on physical properties of polymers,“ Monsanto Company and Washington University St. Louis, Missouri, 1968.
- [33] M. T. Aronhime, X. Peng, J. K. Gillham und R. D. Small, „Effect of Time-Temperature Path of Cure On the Water Absorption of High Tg Epoxy Resins,“ Department of Chemical engineering, Polymer Materials Program, Princeton University and Engineering Research Center AT&T Technologies, 1986.
- [34] P. Johncock und G. F. Tudgey, „Some Effects of Structure, Composition and Cure on the Water Absorption and Glass Transition Temperature of Amine Cured Epoxies,“ *British Polymer Journal*, Vol. 18, No. 5, pp. 292-302, 1986.
- [35] H. B. Hopfenberg und H. L. Frisch, „Transport of organic micromolecules in amorphous polymers,“ *Polymer Letters* Vol. 7, pp. 405-409, 1969.
- [36] Y. J. Weitsman, Fluid effects in Polymers and Polymeric Composites, Springer Science+Business Media, LLC, 2012.
- [37] J. Crank, The Mathematics of Diffusion, Oxford University Press, 1975.
- [38] C.-H. Shen und G. S. Springer, „Moisture Absorption and Desorption of Composite Materials,“ *J. Composite Materials*, Vol. 10, p. 2, Januar 1976.
- [39] IPC Association Connecting Electronics Industries, „IPC-9201A – Surface Insulation Resistance Handbook,“ August 2007.
- [40] IPC Association Connecting Electronics Industries, „Surface Insulation Resistance Handbook,“ August 2007.
- [41] W. Nelson, Accelerated Testing - Statistical Models, Test Plans and Data Analyses, Wiley-Interscience Publication, 1990.
- [42] W. Demtröder, Experimentalphysik 2 - Elektrizität und Optik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg , 2013, 6. Auflage.
- [43] L. A. Dissado und J. C. Fothergrill, Electrical Degradation and Breakdown in Polymers, IEE Materials and Devices Series 9, 1992, p. 7.
- [44] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 60243-1 (VDE 0303-21): Elektrische Durchschlagsfestigkeit von isolierenden Werkstoffen - Prüfverfahren - Teil 1: Prüfverfahren bei technischen Frequenzen (IEC 60243-1:2013),“ Januar 2014.

- [45] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 60243-2 (VDE 0303-22): Elektrische Durchschlagsfestigkeit von isolierenden Werkstoffen - Prüfverfahren - Teil 1: Zusätzliche Anforderungen für Prüfungen mit Gleichspannung (IEC 60243-2:2013),“ August 2014.
- [46] „Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit und Systemzuverlässigkeit LBF: Hochspannungsprüfung,“ [Online]. Available: <https://www.lbf.fraunhofer.de/de/labor-pruefeinrichtungen/polymer-charakterisierung/physikalische-charakterisierung1/Hochspannungstest.html#expand-all>. [Zugriff am 3 April 2020].
- [47] U. Fromm, „The Ageing Behaviour of Epoxy Resin at DC Voltage,“ in *Proceedings of 1995 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, High Voltage Laboratory, Delft University of Technology, 1995, pp. 235-238.
- [48] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 60270 (VDE 0434): Hochspannungs-Prüftechnik: Teilentladungsmessungen,“ 2016.
- [49] P. H. F. Morshuis und J. J. Smit, „Partial Discharges at DC Voltage: Their Mechanism, Detection and Analysis,“ *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* Vol. 12, No. 2; April 2005, pp. 328-340.
- [50] U. Fromm, *Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage*, Ph.D. thesis Delft University of Technology, ISBN 90-6275-931-9, 1993.
- [51] Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI), „Leitfaden Teilentladungs-Messung und -Diagnostik für Applikationen im Niederspannungsbereich ≤ 1.000 Volt,“ Juni 2016.
- [52] A. Küchler, *Hochspannungstechnik: Grundlagen, Technologie, Anwendungen*, Springer Verlag, 2009.
- [53] IPC Association Connecting Electronics Industries, „IPC-TR-476A - Electrochemical Migration: Electrically Induced Failures in Printed Wiring Assemblies,“ 1997.
- [54] L. Henneken, D. Markus, D. König und W. Gronbach, „How wet is wet - Robust Automotive Electronics in Humid Environment,“ *Electronics in Harsh Environments Conference*, 2019.
- [55] P. Kurzweil, *Chemie*, Springer Fachmedien Wiesbaden 2015.
- [56] A. Caputo, L. J. Turbini und D. D. Perovic, „Conductive Anodic Filament Formation Part II: Electrochemical Reactions Leading to CAF,“ *Journal of Electronic Materials*, Nr. Vol. 39, No. 1, 2010.

- [57] W. J. Ready IV, Factors which enhance Conductive Anodic Filament (CAF) Formation, Master Thesis, Georgia Institute of Technology, 1997.
- [58] W. J. Ready IV, Reliability Investigations of Printed Wiring Boards Processes with Water Soluble Flux Constituents, Dissertation, Georgia Institute of Technology, Juli 2000.
- [59] IPC Association Connecting Electronics Industries, „IPC-2221 – Generic Standard on Printed Board Design,“ November 2012.
- [60] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN-EN-61189-5: Prüfverfahren für Elektromaterialien, Verbindungsstrukturen und Baugruppen-Teil 5: Prüfverfahren für bestückte Leiterplatten (IEC 61189-5:2006); Deutsche Fassung EN 61189-5:2006,“ DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, 2006.
- [61] H. Zecha, C. Früh, R. Ratchev, E. Biehl und T. Zerna, „Absorption and Diffusion of Water in Printed Circuit Boards,“ *36th Int. Spring Seminar on Electronics Technology*, pp. 121-126, 2013.
- [62] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN 60156: Insulating liquids - Determination of the breakdown voltage at power frequency - Test method,“ 2016.
- [63] „GESTIS Stoffdatenbank,“ IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, [Online]. Available: [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll?f=id&t=default.htm\\$vid=gestisdeu:sdbdeu&id=004790](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll?f=id&t=default.htm$vid=gestisdeu:sdbdeu&id=004790). [Zugriff am 04 11 2019].
- [64] P. Villars, „Springer Materials,“ Springer-Verlag GmbH, [Online]. Available: https://materials.springer.com/isp/crystallographic/docs/sd_1603302. [Zugriff am 04 11 2019].
- [65] W. M. Haynes, Handbook of Chemistry and Physics 97th Edition, 2017: CRC Press, 2016-2017.
- [66] Mineralienatlas. [Online]. Available: <https://www.mineralienatlas.de>. [Zugriff am 20. 11. 2019].
- [67] „National Center for Biotechnology Information. PubChem Database,“ [Online]. Available: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>. [Zugriff am 20. 11. 2019].
- [68] Carl Zeiss AG, „EVO 60EP: Scanning Electron Microscope - Extended Pressure, Product Specification,“ Carl Zeiss SMT - Nano Technology Systems Division, : Daten gelten auch für das EVO60 laut Hersteller.
- [69] IEC - International Electrotechnical Commission, „IEC 61249-2-21 - Materials for printed boards and other interconnection structures - Part 2-21,“ 2003.

- [70] D. J. Lando, J. P. Mitchell und T. L. Welsher, „Conductive Anodic Filaments in Reinforced Polymeric Dielectrics: Formation and Prevention,“ *17th International Reliability Physics Symposium*, pp. 51-63, 1979.
- [71] T. Braun, „Feuchtediffusion in partikelgefüllten Epoxidharzen für die Mikroelektronik,“ Dissertation Fraunhofer Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM, 2013.
- [72] H.-I. Huang, Z.-q. Pan, X.-p. Guo und Y.-b. Qiu, „Effects on direct current electric field on corrosion behaviour of copper Cl- ion migration behaviour and dendrites growth under thin electrolyte layer,“ *Transactions of Nonferrous Metals Society of China Vol 24 Issue 1*, pp. 285-291, Januar 2014.
- [73] G. Kear, B. D. Barker und F. C. Walsh, „Electrochemical corrosion of unalloyed copper in chloride media - a critical review,“ *Corrosion Science* 46, pp. 109-135, 2004.
- [74] K. H. Yoon, Y. S. Kwon und J. S. Choi, „Oxidation of copper in an electric field,“ *Materials Science and Engineering, Volume 18, Issue 1*, pp. 81-83, 1975.
- [75] Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), „Das Internationale Einheitensystem (SI). Deutsche Übersetzung der BIPM-Broschüre „Le Système international d’unités/The International System of Units (8e édition, 2006)“,“ *PTB-Mitteilungen, Band 117, Nr. 2*, 2007.
- [76] B. Beverskog und I. Puigdomenech, „Pourbaix diagrams for the system copper-chlorine at 5–100 °C,“ Swedish NuclearPower Inspectorate (SKI), April 1998.
- [77] B. Beverskog und I. Puigdomenech, „Revised Pourbaix Diagrams for Copper at 25 to 300°C,“ *J. Electrochem. Soc., Vol. 144, No 10*, pp. 3476-3483, October 1997.
- [78] I. Puigdomenech und C. Taxén, „Technical Report TR-00-13: Thermodynamic data for copper: Implications for the corrosion of copper under repository conditions,“ Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, August 2000.
- [79] H. Zhao, J. Chang, A. Boika und A. J. Bard, „Electrochemistry of High Concentration Copper Chloride Complexes,“ *Analytical Chemistry* 85, pp. 7696-7703, 2013.
- [80] F. Arjmand und A. Adriaens, „Influence of pH and Chloride Concentration on the Corrosion Behavior of unalloyed Copper in NaCl Solution: A Comparative Study Between the Micro and Macro Scales,“ *Materials*, pp. 2439-2464, 2012.
- [81] M. Liu und J. Li, „In-Situ Raman Characterization of Initial Corrosion Behavior of Copper in Neutral 3.5% (wt.) NaCl Solution,“ *Materials (Basel, Switzerland) 2019, Vol.12, 13*, 2164, 2019.

- [82] W. Shao, G. Pattanaik und G. Zangari, „Influence of Chloride Anions on the Mechanism of Copper Electrodeposition from Acidic Sulfate Electrolytes,“ *Journal of The Electrochemical Society*, Bd. 154 (4), pp. D201-D207, 2007.
- [83] G. Bianchi, G. Fiori, P. Longhi und F. Mazza, „"Horse Shoe": Corrosion of Copper Alloys in Flowing Sea Water: Mechanism, and Possibility of Cathodic Protection of Condenser Tubes in Power Stations,“ *Corrosion Vol. 34, No 11*, pp. 396-406, November 1978.
- [84] F. King, „Technical Report TR-10-69: Critical review of the literature on the corrosion of copper by water,“ Svensk Kärnbränslehantering AB, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., Dezember 2010.
- [85] G. Faita, G. Fiori und D. Salvatore, „Copper Behaviour in Acid and Alkaline Brines-I Kinetics of Anodic Dissolution and Free-Corrosion Rates in the Presence of Oxygen,“ *Corrosion Science*, Nr. Vol. 15, pp. 383-392, 1975.
- [86] G. Bianchi und P. Longhi, „Copper in Sea-Water, Potential-pH Diagrams,“ *Corrosion Science Vol. 13*, pp. 853-864, 1973.
- [87] IPC Association Connecting Electronics Industries, „IPC-9691 - User Guide for the IPC-TM-650, Method 2.6.25, Conductive Anodic Filament (CAF) Resistance Test (Electrochemical Migration Testing),“ Oktober 2005.
- [88] E. Biehl, J. Hink, C. Chak, N. Jones und S. Maaß, „The necessity of temperature humidity bias testing with high voltages ≤ 1000 ,“ *SMTA Conference Paper*, 2017.
- [89] K. Lux, L. Henneken, S. Maaß und M. Nowottnick, „Behavior of solder mask and base material of PCBs under harsh environmental conditions and high voltage load,“ in *Electronics in Harsh Environments Conference, SMTA Europe*, Amsterdam, 2019.
- [90] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN ISO 787-5: Allgemeine Prüfverfahren für Pigmente und Füllstoffe, Teil 5: Bestimmung der Ölzahl,“ 1995.
- [91] A. Goldschmidt und H.-J. Streitberger, BASF-Handbuch - Lackiertechnik, Hannover: Vincentz Verlag, 2002.
- [92] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V., „DIN EN ISO 3682 - Bindemittel für die Beschichtungsstoffe. Bestimmung der Säurezahl. Titrimetrisches Verfahren,“ 1996.
- [93] E. Bumiller und D. C. Hillman, „White Paper - A Review of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms,“ DfR Solutions, Maryland.
- [94] Lackwerke Peters GmbH + Co KG, „Applikationsinformation AI 2/1 - Verarbeitungshinweise für die fotostrukturierbaren ELPEMER Lötstopplacke“.

- [95] Lackwerke Peters GmbH + Co KG, „Technische Information TI 15/12: Grundlagen der chemischen Vernetzung von 2-Komponenten-Systemen“.