
Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung im Automobil

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abkürzungen.....	IV
1 Einleitung.....	1
2 Aktuelle Entwicklungen bei der Zuverlässigkeitsabsicherung elektronischer Systeme	5
2.1 Herausforderungen bei der Qualifizierung elektronischer Systeme für automobile Anwendungen	5
2.2 Methodische Ansätze zur Entwicklung robuster Elektroniksysteme	7
2.2.1 Robust Design-Entwicklung & -Verifikation	7
2.2.2 Robustness Validation-Methode	12
3 Physikalisch-chemische Grundlagen	18
3.1 Luftfeuchtigkeit und Betauung	18
3.2 Fehlermechanismen bei klimatischer Beanspruchung	23
3.2.1 Elektrochemische Korrosion.....	24
3.2.2 Kriechströme durch Elektrolytbildung	26
3.2.3 Elektrochemische Migration	26
3.2.4 Conductive Anodic Filaments	32
3.2.5 Schwefelinduzierte Kriechkorrosion.....	34

4	Optimierte Auslegung von Prüfstrategien für den Effekt der Feuchteadsorption.....	36
4.1	Prüfkonzeptermittlung und -auslegung.....	36
4.2	Feuchte- und betauungsspezifische Prüfverfahren.....	42
4.3	Statistisch optimierte Bewertung von Umweltprüfungen	44
4.4	Ausfallmechanismus und Fehlerauswirkung.....	52
4.5	Vorgehensmodell zur Fehleridentifikation und -verifikation	57
5	Bewertung unterschiedlicher Einflussgrößen bei Betauung	60
5.1	Analyse funktionsrelevanter Signalparameter	60
5.2	Zuverlässigkeitsbewertung von Lotpastensystemen	67
5.3	Prüflingsüberwachung bei Feuchte-/Betauungsprüfungen	71
5.4	Migrationsneigung bleifreier Oberflächenpassivierungen.....	75
5.5	Bauelementabhängige Betauungsrobustheit	81
5.6	Einfluss schädlicher Gase.....	85
6	Klimazuverlässigkeit durch Schutzlacke.....	90
6.1	Schutzlackarten und -auftragsverfahren	90
6.2	Versuchs- und Bewertungsstrategie	93
6.3	Optische Inspektion der Versuchsmuster.....	97
6.4	Zuverlässigkeit der unlackierten Baugruppe	99
6.5	Bewertung der Schutzwirkung verschiedener Lacksysteme	101
7	Automotivegerechte Prüfanforderungen.....	105
7.1	Felddatenanalyse betauungsbedingter Ausfälle	105
7.2	Makroklimatische Anforderungen an das Gesamtfahrzeug	108
7.3	Mikroklimatische Betauungsanforderungen im Automobil	116

7.3.1	Simulation solarer Strahlung	118
7.3.2	Aktive Fahrzeugaufwärmphase bei tiefen Außentemperaturen	123
7.3.3	Passive Fahrzeugaufwärmung durch Kalt-Warm-Umlagerung	125
7.4	Anwendbarkeit bestehender Lebensdauermodelle	128
7.5	Optimierung bestehender Prüfverfahren	134
8	Einsatz der Simulation für die Robustheitsbewertung in den frühen Entwicklungsphasen.....	137
8.1	Leiterplattenlayout und dreidimensionales Platinenmodell.....	139
8.2	Aufbereitung des 3D-Modells für die Strömungssimulation	141
8.3	Ergebnisse der Betaungs- und Temperatursimulation.....	143
8.4	Verifikation der Simulationsergebnisse	145
9	Zusammenfassung und Ausblick	148
	Literaturverzeichnis	150

Abkürzungen

AEC	Automotive Electronics Council
AR	Acrylic Resin
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
Bellcore	Bell Communications Research
BGA	Ball-Grid-Array
CAF	Conductive Anodic Filament
CFD	Computer Fluid Dynamics
DIN	Deutsches Institut für Normung
DV	Designvalidierung
ECM	Elektrochemische Migration
ER	Epoxy Resin
FMEA	Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse
FR4	Flame Retardant
IC	Integrierter Schaltkreis
IEC	International Electrotechnical Commission
IPC	Association Connecting Electronic Industries
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Japanese Industrial Standards
JSAE	Japanese Society of Automotive Engineers
J-STD	Joint Standard
MLCC	Multi Layer Chip Capacitors
OEM	Original Equipment Manufacturer
OSP	Organic Solderability Preservative
QFP	Quad Flat Pack
PBGA	Plastic Ball Grid Array
PTV	Prototypenvalidierung
PV	Produktionsvalidierung
RoHS	Restriction of Hazardous Substances

RPZ	Risikoprioritätszahl
SAE	Society of Automotive Engineers International
SIR	Oberflächenisolationswiderstand (Surface Insulation Resistance)
SMT	Surface Mounted Technology
SOL	Small Outline L-Lead Package
SR	Silicone Resin
UR	Urethan Resin
THT	Through Hole Technology
ZVEI	Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V.

1 Einleitung

Gerade in der Automobilindustrie nimmt die Integration elektronischer Systeme kontinuierlich zu und bestimmt bereits heute etwa zwei Drittel aller Innovationen im Fahrzeug. Hierbei werden ehemals mechanische Komponenten durch elektronische und mechatronische Systeme ersetzt oder durch innovative Systemlösungen um neue Funktionen erweitert. Betrug der Wertanteil der Elektronik im Jahr 2005 noch 20 %, so wird dieser bis zum Jahr 2015 auf etwa 30 % ansteigen. Dafür verantwortlich sind neben Funktionen im Bereich Motor-/Antriebsstrang, Exterior und Chassis vor allem der Elektronikanstieg im Bereich Innenraum sowie Bordnetz [59]. Viele dieser neuen Systeme unterstützen sowohl aktiv als auch passiv den Fahrer im Straßenverkehr oder erfüllen individuelle Kundenbedürfnisse hinsichtlich Komfort und Fahrerlebnis. Exemplarisch können hierbei neben dem Zuwachs an Fahrerassistenzsystemen vor allem der Anstieg an Multimedia- und Infotainmentanwendungen sowie hochinnovativer Car-2-x Kommunikationsfunktionen genannt werden. Bild 1 zeigt den zunehmenden Elektronikanteil im Automobil und wesentliche Innovationstreiber [170].

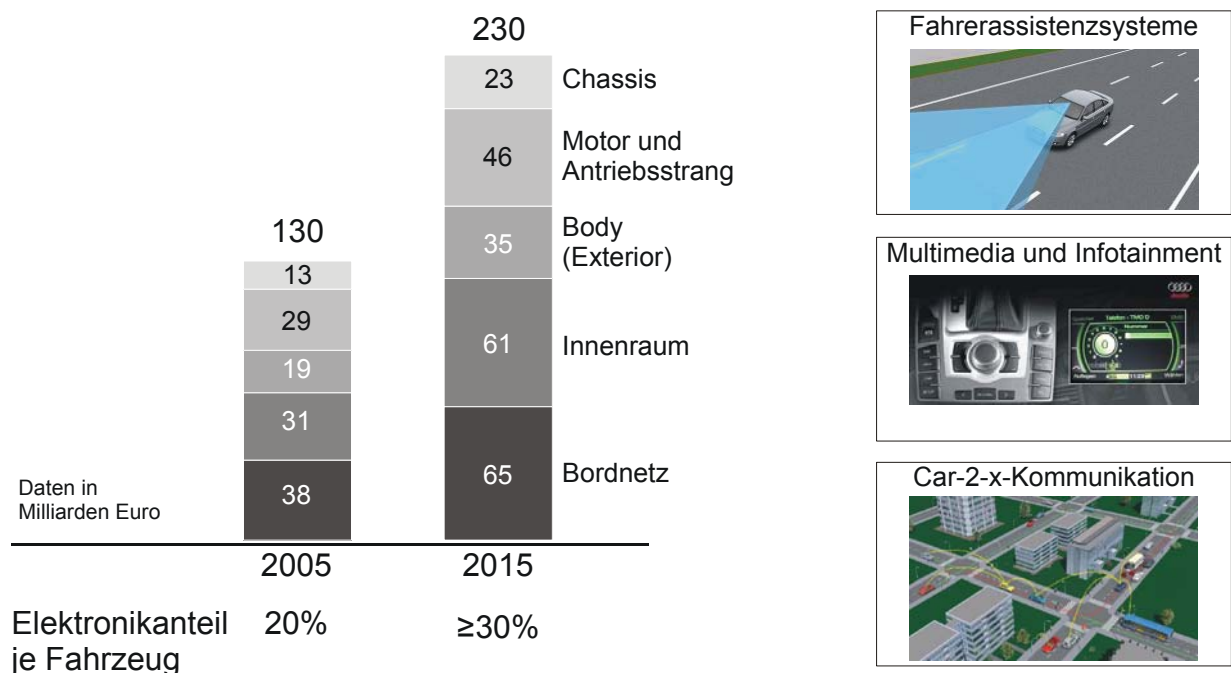


Bild 1: Wachsender Elektronikanteil im Automobil und exemplarische Innovationstreiber [170]

Essenziell für die Integration neuer Komponenten und Systeme ist die Verfügbarkeit dazu benötigter Technologien und Materialien sowie deren Spezifikation für die hohen Anforderungen im Automobil. Vor allem die

Halbleiterindustrie trägt maßgeblich dazu bei, dass rechenintensive Anwendungen Einzug ins Fahrzeug erhalten.

Im Zuge dieser fortschreitenden Elektronikintegration, die zumeist einhergeht mit einer gestiegenen Komplexität und einem hohen Miniaturisierungsgrad der Systeme, kommt der Qualitäts- und Zuverlässigkeitsabsicherung eine immer größere Bedeutung zu. Dies verdeutlichen Daten des Allgemeinen Deutschen Automobil-Clubs und darauf aufbauende Prognosen, nach denen der Anteil an elektronikbedingten Pannen im Jahr 2010 bei etwa 66 % liegen wird [91]. Dies entspricht einem Anstieg von 16 % im Vergleich zum Jahr 2000. In Bild 2 wird schematisch die Zunahme an Einzel- und Systeminnovationen und der prognostizierte Anteil an Elektronikpannen im Jahr 2010 gezeigt [28][98].

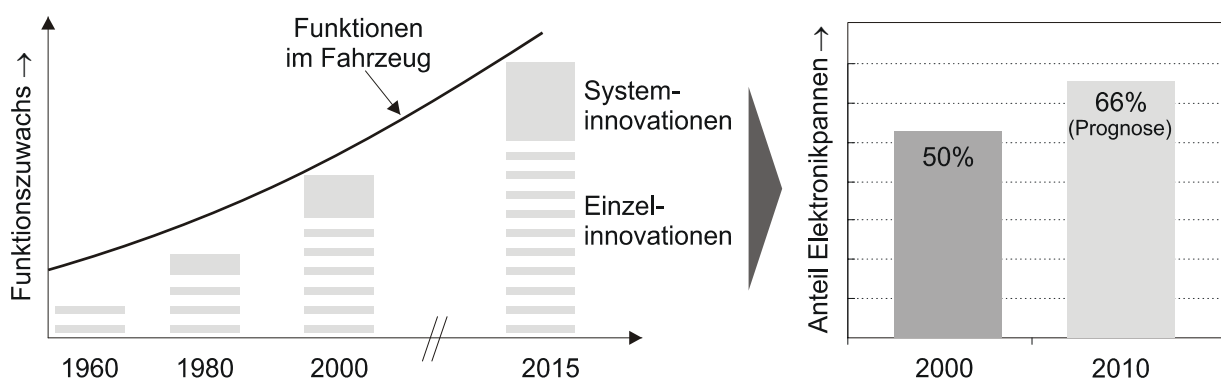


Bild 2: Schematische Darstellung der zunehmenden Funktionsintegration ins Automobil und daraus resultierender steigender Anteil an Elektronikpannen [28][98]

Die anhaltende Globalisierung unter Berücksichtigung der Tatsache, dass heutige Fahrzeuge nahezu baugleich auf allen Orten der Erde eingesetzt werden, und damit unterschiedlichsten klimatischen und kundenspezifischen Anforderungen genügen müssen, stellt eine signifikante Einflussgröße für die Zuverlässigkeit elektronischer Systeme dar. Trotz dieser Randbedingungen werden an elektronische Komponenten und Systeme hohe Lebensdauern Anforderungen gestellt. Diese betragen für alle Elektronikbaugruppen im Fahrzeug 15 Jahre oder 300.000 km. Da die Kosten von Fehlerverhütung beziehungsweise Fehlerentdeckung exponentiell im Produktentstehungsprozess ansteigen, gilt es System-schwachstellen bereits in den frühen Design- und Entwicklungsphasen zu beseitigen [133]. Zudem sind nach Deming 85 % aller Fehler in einem Produktsystem bedingt und daher auf Fehler in der Konzept-, Design- oder Entwicklungsphase zurückzuführen [174]. Aus diesem Grund kommt der Erprobung in den frühen Produktentstehungsphasen eine bedeutende Rolle zu, da hier die Parameter Termin, Kosten und Qualität maßgeblich bestimmt werden. Neben funktionalen Prüfungen auf Fahrzeugebene findet daher in der Automobilindustrie

die Zuverlässigkeitsabsicherung elektronischer und mechatronischer Systeme gegen alle auf das Produkt einwirkenden Belastungen auf Komponenten- und Systemebene statt. In Anlehnung an die Norm ISO 16750, welche die Umwelanforderungen an elektrische und elektronische Systeme in Straßenfahrzeugen beschreibt, gilt es in der Erprobung auf System- und Komponentenebene neben den elektrischen auch die mechanischen, klimatischen und chemischen Belastungen und deren Einflüsse auf das jeweilige Produkt abzusichern [123].

Problemstellung und Zielsetzung

Die entwicklungsbegleitende Erprobung und Qualifizierung elektronischer Komponenten und Systeme für automobiler Anwendungen ist ein umfangreiches und komplexes Aufgabenfeld. In dieser Hinsicht spielt die zeit- und kosteneffiziente Fehleridentifikation und Fehlerabstellung eine entscheidende Aufgabe, um Produkte termingetreu und unter Einhaltung aller Kostenvorgaben in den Markt einzuführen. Gerade die Absicherung gegen Betauung und hohe Luftfeuchtigkeit gewinnt in Anbetracht der zunehmenden Packungsdichte und der steigenden Funktionalität elektronischer Komponenten und Systeme im Automobil immer mehr an Bedeutung. Wie im Rahmen der Arbeit durchgeführte Analyse gezeigt haben, zeigen aktuell bereits etwa ein Viertel aller in der Komponentenerprobung getesteten Produkte Fehler während der zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen, bei denen es zu einer Betauung der Prüflinge kommen kann. Neben optischen Beanstandungen durch Korrosion, Trübung oder Deformation ist der Fehlermechanismus der elektrochemischen Migration (ECM) der primäre Grund für erneute Absicherungsläufe oder Requalifikationen. Vor allem hochintegrierte Baugruppen mit Fine Pitch-Bauelementen und thermisch bedingten Gehäuseöffnungen sind dabei betroffen. Am Beispiel eines Multimediasystems zeigt Bild 3 das unspezifizierte Systemverhalten in Form eines erhöhten Ruhestromverlaufs durch ECM bei einer zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung.

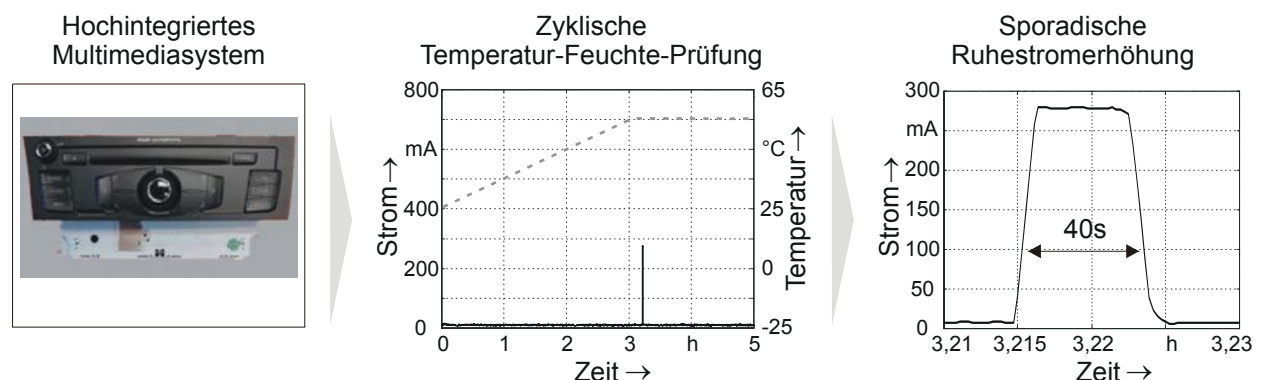


Bild 3: Auffälligkeiten durch einen erhöhten Ruhestrom bei zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen in der Komponentenerprobung

Im Zuge der stetig steigenden Anzahl an hochinnovativen Mikrosystemen mit miniaturisierten Bauelementen und extrem empfindlichen analogen und digitalen Signalen stellt der Effekt der Betauung zukünftig ein erhöhtes Ausfallrisiko dar.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung produkt- und wirkortgerechter Betauungsprüfstrategien für automobiler Elektronikanwendungen sowie die Identifikation zuverlässigkeitsrelevanter Einflussgrößen zur Steigerung aber auch zur Bewertung der Produktzuverlässigkeit in den frühen Entwicklungsphasen. Hierzu werden in einem ersten Schritt die wesentlichen Herausforderungen bei der Qualifizierung elektronischer Systeme für das Automobil aufgezeigt sowie bestehende Methoden und Ansätze für eine robuste Produktauslegung erläutert. Bevor in Kapitel 4 eigene Vorgehensweisen erarbeitet werden, welche eine an das Produkt und den Fehlermechanismus angepasste Prüfkonzeptauslegung, sowie eine statistisch optimierte Prüfdurchführung und eine systematische Fehleranalyse ermöglichen, werden zuvor die physikalisch-chemischen Grundlagen zur Fehlerphysik strukturiert dargelegt.

Auf Basis detaillierter und zielgerichteter Untersuchungen werden in Kapitel 5 unterschiedliche Einflussgrößen, welche die Zuverlässigkeit elektronischer Systeme unter Betauungseinwirkung beeinträchtigen können, analysiert und bewertet. Zudem wird eine Messkette vorgestellt, welche eine nahezu kontinuierliche Überwachung von Testobjekten während der Klimaprüfungen ermöglicht, und dadurch Defizite bestehender Testmethoden eliminiert. Da ein zunehmender Einsatz von Schutzlackierungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen Klimabelastungen zu verzeichnen ist, werden in Kapitel 6 verschiedene Lacksysteme an einem neuartigen Testlayout für Schutzlacke bewertet und ausfallrelevante Ursachen ermittelt.

Da bisher keine Betauungsanforderungen für elektronische Systeme im Automobil spezifiziert sind, werden anhand von umfangreichen Messreihen die klimatischen Belastungen im Automobil bei unterschiedlichen Testszenarien erfasst und daraus Optimierungspotentiale für bestehende Prüfverfahren abgeleitet. Zudem werden diese an den primären Fehlermechanismus sowie dabei relevante Beschleunigungsfaktoren angepasst.

Abschließend wird in Kapitel 8 als innovativer Ansatz zur entwicklungsbegleitenden Zuverlässigkeitsbewertung in den frühen Konzept- und Designphasen die Anwendung einer Betauungs- und Temperatursimulation analysiert und anhand von empirischen Untersuchungen verifiziert.

2 Aktuelle Entwicklungen bei der Zuverlässigkeitsabsicherung elektronischer Systeme

Der Anteil elektronischer und mechatronischer Systeme im Automobil steigt von Modellgeneration zu Modellgeneration stetig an. Dies führt zu neuen Herausforderungen in der Prüfkonzeptauslegung und deren Bewertung. Zusätzlich tragen die extreme Modell- und Ausstattungsvariation bei den unterschiedlichen Fahrzeugklassen zu dieser Problemstellung bei. Werden Produktfehler nicht im Rahmen der Komponenten- oder Gesamtfahrzeugerprobung entdeckt, so werden diese erst im Kundenumfeld im Laufe der Einsatzzeit auftreten. Aufgrund der hohen Anzahl an potenziellen Testfällen, der Komplexität der Funktionsüberwachung und dem Fehlen von ausfallrelevanter Belastungen ist eine zusätzliche Zuverlässigkeitskontrolle in der Produktion der Baugruppen oder vor der Auslieferung der Fahrzeuge bisher nicht realisierbar.

2.1 Herausforderungen bei der Qualifizierung elektronischer Systeme für automobiler Anwendungen

Bei der Betrachtung des Qualifikationsprozesses elektronischer Systeme für das Automobil zeigt sich eine zunehmende Adaption der Prüfstrategien an das jeweilige zu prüfende System. Ein standardisiertes Prüfvorgehen ohne produktspezifische Anpassungen reicht heutzutage nicht mehr aus, um alle Produktschwachstellen vor der Freigabe zu identifizieren. Aufgrund der umfangreichen Integration vernetzter Fahrzeugfunktionen in Steuergeräte, wie zum Beispiel Diagnose, Standby, Wakeup oder Nachlauf, wird eine deutlich höhere Testabdeckung und Testtiefe gefordert. Diese sind geprägt durch eine individuelle Ansteuerung der Prüflinge, eine kontinuierliche Überwachung spezifischer Qualitätsparameter im Test und der Anwendung überlagerter Belastungsarten. Um diese Anforderungen zu erfüllen, werden neben systemspezifischen und meist softwarebasierten Ansteueralgorithmen sowie entsprechender Sensorik vor allem eine intensive und expertenbasierte Prüfkonzeptabstimmung zwischen Lieferant und Automobilhersteller vorausgesetzt. Der Bedarf an produktspezifischen Prüfstrategien wird durch eine im Rahmen der Arbeit durchgeführte Analyse von Auffälligkeiten aus der Komponentenerprobung Elektrik/Elektronik der Audi AG bestätigt. Dabei wurden alle Fehler, die bei der Komponentenerprobung von Elektroniksystemen der aktuellen Modellreihe des Audi A4 aufgedeckt wurden, hinsichtlich der dabei eingesetzten Prüfstrategien untersucht. Wie Bild 4 zeigt, werden etwa ein Drittel aller identifizierten Produktfehler nur mit Hilfe individueller Prüf- und Qualifizierungsstrategien entdeckt. Dazu werden neben standardisierten Testverfahren zunehmend überlagerte Belastungsarten, systemabhängige Qualitätskriterien

oder angepasste Ansteueralgorithmen eingesetzt, um die Lebensdauer der geforderten Systemfunktionen unter verschiedensten Belastungen sicherzustellen.

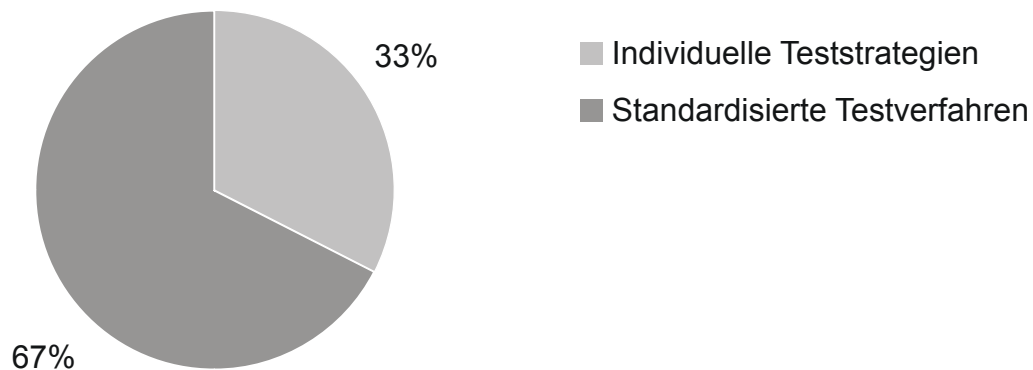


Bild 4: Verteilung produktspezifischer und standardisierter Teststrategien zur Identifikation von Produktschwachstellen in der Komponentenerprobung der Audi AG

Neben an die Systeme angepassten Prüfstrategien und der kontinuierlichen Überwachung individueller Qualitätsparameter tragen vor allem material-, technologie-, betriebs- und belastungsspezifische Fehlermechanismen zu einer zunehmenden Prüfkomplexität und der entsprechenden Ergebnisbewertung bei. Da auf der einen Seite eine permanente Überwachung aller Funktionen unter allen Betriebszuständen meist nicht gewährleistet ist und auf der anderen Seite prüftechnisch keine Überlagerung sämtlicher im Fahrzeug auftretender Belastungen realisiert werden kann, wird die Aussagekraft der Prüfergebnisse zunehmend schwieriger. In Anbetracht der geschilderten Aspekte wird deutlich, dass eine Aufdeckung aller systemrelevanten Fehler stetig komplexer wird.

Betrachtet man die wesentlichen Belastungsarten, welche Fehlermechanismen bei elektronischen Systemen auslösen können, so lässt sich erkennen, dass primär klimatische Belastungen Ausfälle bewirken. Dabei spielen einerseits Temperaturen im unteren und oberen Einsatzbereich und andererseits hohe Luftfeuchtigkeit und Betauung eine entscheidende Rolle. Besonders hochminiaturisierte und komplexe Systeme aus dem Bereich Infotainment sind davon betroffen. Neben den klimatischen Belastungen decken insbesondere auch mechanische und elektrische Beanspruchungen Produktfehler in der Erprobungsphase auf. Chemische Belastungen tragen geringfügig und nur in Einzelfällen zur Fehleridentifikation bei elektronischen Systemen bei. Einen Überblick über die fehlerinduzierenden Belastungsarten in den unterschiedlichen Fahrzeugdomänen gibt Bild 5. Diese untergliedern sich in die Bereiche Infotainment, Komfortelektronik, Antriebselektronik, Beleuchtung und Bedienelemente. Die zugrundeliegende

Datenbasis für die durchgeführte Analyse sind Erprobungsauffälligkeiten bei Elektroniksystemen der Audi A4-Modellreihe.

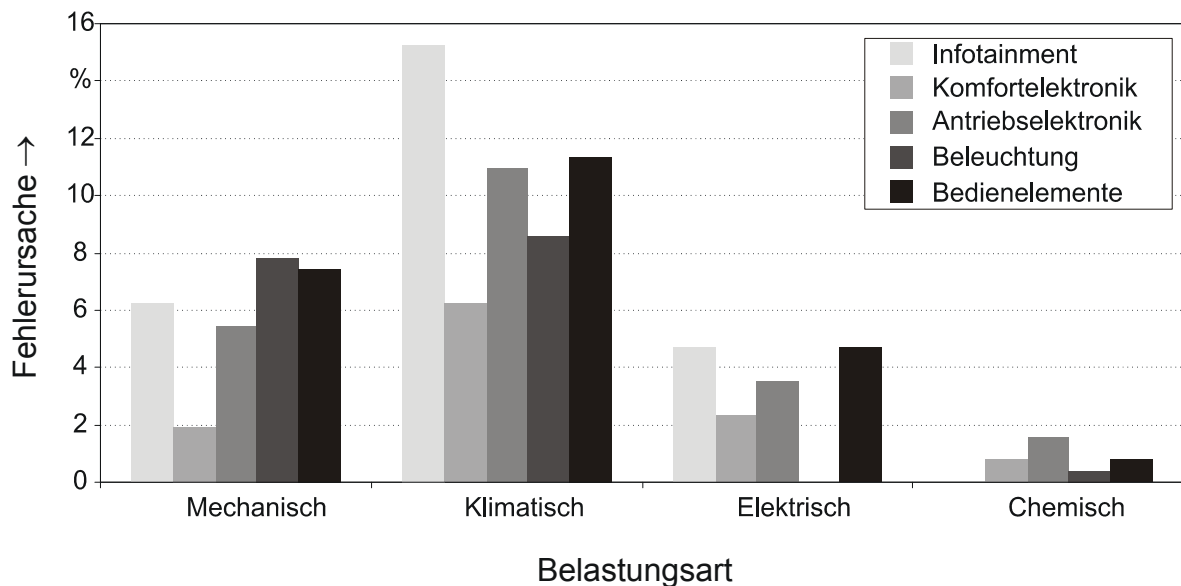


Bild 5: Verteilung der fehlerauslösenden Belastungsarten über die unterschiedlichen Domänen der Fahrzeugelektronik

2.2 Methodische Ansätze zur Entwicklung robuster Elektroniksysteme

Die erfolgreiche Qualifikation elektronischer Systeme mit standardisierten und systemspezifischen Prüfstrategien bildet den Abschluss des Entwicklungsprozesses und stellt einen wesentlichen Integrationsschritt der Elektronikkomponenten und -systeme ins Fahrzeug dar. Aufgrund der zunehmenden Systemkomplexität, der Verwendung innovativer Technologien und Materialien sowie den immer kürzer werdenden Entwicklungszeiten stößt eine Zuverlässigkeitsabsicherung am Ende des Entwicklungsprozesses zunehmend an ihre Grenzen. Hierdurch verringern sich die Möglichkeiten nach wirkungsvollen und robustheitssteigernden Design- und Konzeptmaßnahmen und mögliche Optimierungspotentiale können nur noch mit hohem Kosten- und Zeitaufwand in die Produkte implementiert werden. Im Folgenden werden zwei methodische Ansätze vorgestellt, die eine robuste Entwicklung elektronischer Systeme und deren Absicherung gewährleisten sollen.

2.2.1 Robust Design-Entwicklung & -Verifikation

Um die Forderungen nach einem robusten Konzept und Design zu erfüllen, bietet ein integrativer Entwicklungs- und Erprobungsprozess einen wirkungsvollen Ansatz. Dadurch wird die Robustheit elektronischer Systeme in der frühen

Design- und Entwicklungsphase gesteigert. Um dies zu ermöglichen, muss methodisches, analytisches und bereichsspezifisches Wissen in den unterschiedlichen Projektphasen bereitgestellt werden. Dazu zählt beispielsweise die Kenntnis über technologierelevante Fehlermechanismen, robustes Schaltungsdesign und Schaltungslayout, Materialeigenschaften sowie das Verständnis über kritische Herstellungsprozesse bei der Umsetzung der Produkte. Wird dieses Wissen zielgerichtet in die verschiedenen Projektphasen eingebracht, so kann eine Robustheitssteigerung in der Produktentwicklung erreicht und damit Schwachstellen vermieden oder zumindest so früh wie möglich identifiziert werden. Zur Erreichung dieses integrativen Entwicklungs- und Erprobungsprozesses wurde bei der Audi AG die neuartige Methode *Robust Design-Entwicklung & -Verifikation* installiert. Hierbei wurden zur nachhaltigen Umsetzung der Methode verschiedene Meilensteine während der Produktentwicklungsphase definiert, welche in Bild 6 anhand des V-Modells dargestellt sind.

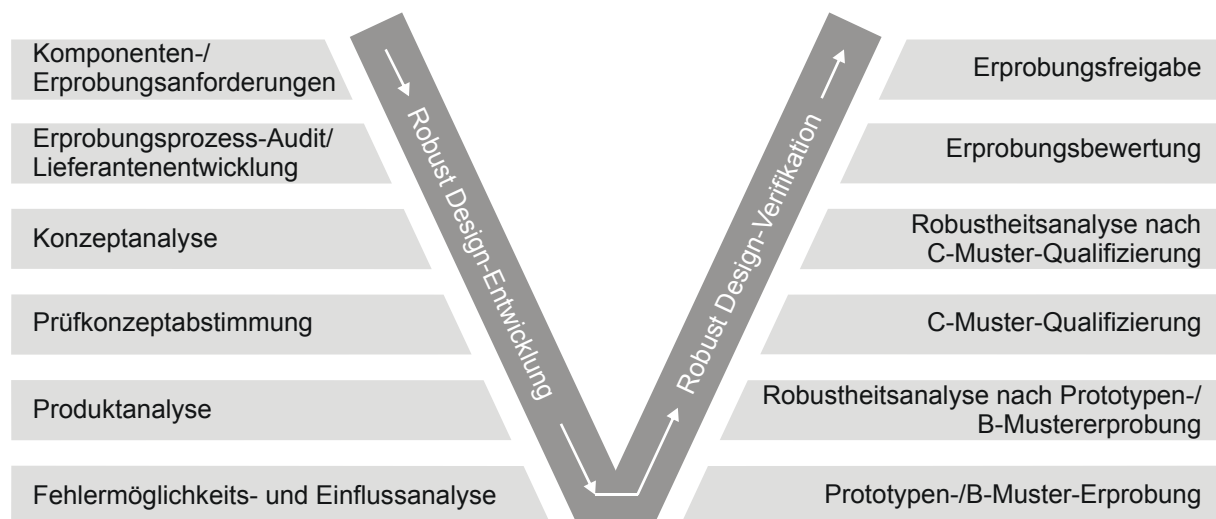


Bild 6: Meilensteine der Methode *Robust Design-Entwicklung & -Verifikation* [152]

Durch ein übergreifendes Zuverlässigkeits-Experten-Netzwerk bei der Audi AG wird gewährleistet, dass das zu den verschiedenen Phasen benötigte Detailwissen zielgerichtet in das Projekt einfließt. Die Inhalte und Zielsetzungen der einzelnen Meilensteine werden im Folgenden erläutert.

Komponenten-/Erprobungsanforderungen

Neben dem Einsatz standardisierter Testverfahren werden aus Fahrzeugmessungen einbauortspezifische Belastungen ermittelt und daraus Test- und Erprobungsanforderungen systemspezifisch angepasst. Anschließend werden die absicherungsrelevanten Testmethoden und -verfahren festgelegt, sowie Akzeptanzkriterien zur Bewertung der Spezifikation definiert. Je nach Einbauort,

Fahrzeugausstattung und Musterstand kann dies eine kontinuierliche Aktualisierung und fortlaufende Optimierung erfordern.

Erprobungsprozess-Audit/Lieferantenbewertung

Neben der Sicherstellung der technischen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Durchführung des Erprobungskonzeptes werden unter anderem die Mitarbeiterkompetenz und die Vernetzung zwischen den Entwicklungs- und Erprobungsabteilungen bei den Lieferanten bewertet. Die abgestimmte Festlegung von Erprobungsverantwortlichen in Verbindung mit teilweise aufwendigen IT-Fehlersystemen ermöglicht darüber hinaus eine ganzheitliche und standortübergreifende Fehlerkommunikation und -abstellung.

Konzeptanalyse

Inhalt dieses Meilensteins ist die Bewertung des mechanischen Aufbaus eines Systems, der verwendeten Materialien, der eingesetzten Technologien sowie der verwendeten elektronischen Bauelemente. Weiterhin wird die Testbarkeit eines Systems hinterfragt. Erkenntnisse aus Simulationen, Messungen und Erfahrungen aus Vorgängerprojekten fließen in die Konzeptbewertung mit ein.

Prüfkonzeptabstimmung

In der Prüfkonzeptabstimmung werden die Testsequenzen, die zu überwachen- den Prüfparameter sowie die entsprechenden Qualitätskriterien festgelegt. Hierzu bilden die Ergebnisse der Konzeptanalyse und komponentenspezifische Funktionsparameter die Basis für die Definition und Abstimmung objektiver und subjektiver Bewertungs- und Akzeptanzkriterien.

Produktanalyse

Anhand erster Prototypen und Musterstände findet unter Beisein von Experten aus den Bereichen Konstruktion, Elektronik und Software eine Analyse des Produktes unter zuverlässigkeitsrelevanten Aspekten statt. Dies erfolgt sowohl auf Automobilhersteller- als auch auf Lieferantenseite parallel. Die Erkenntnisse der Produktanalyse werden anschließend gemeinsam diskutiert und relevante Änderungen für den nächsten Musterstand konkretisiert.

FMEA

Die Durchführung verschiedener Fehlermöglichkeits- und Einflussanalysen (FMEA) begleitet die Produktanalyse oder schließt an diese an. Anhand einer systematischen Risikopriorisierung können entsprechende Schwerpunkte in der Erprobungsdurchführung und -bewertung gelegt werden.

Prototypen-/B-Mustererprobung

Dieser Meilenstein dient der Identifikation systemspezifischer Schwachstellen mit Hilfe verschiedener Testverfahren. Hierbei ist es zielführend, Testmethoden und Testverfahren analog den nachfolgenden Erprobungs- und Qualifikationsanforderungen durchzuführen, jedoch können und müssen diese an den jeweiligen Entwicklungsstand adaptiert und die Testergebnisse auch entsprechend bewertet werden.

Robustheitsanalyse nach Prototypen-/B-Mustererprobung

Unabhängig von den Testergebnissen aus der Prototypen-/B-Mustererprobung findet bei Abwicklung dieses Meilensteins eine Analyse der geprüften Systeme statt. Hierbei gilt es sowohl die Fehlerursachen und entsprechende Fehlermechanismen bei schadhafte Teilen als auch mögliche Vorschädigungen oder Schwachstellen bei nicht ausgefallenen Teilen zu ermitteln. Zudem lassen sich bereits besonders kritische Systembestandteile identifizieren, welche unter spezifischen Belastungsparametern einen Ausfall verursachen. Diese gilt es in einer nächsten Musterphase abzustellen.

C-Musterqualifizierung und Robustheitsanalyse

Sollten trotz der vorangegangenen entwicklungsbegleitenden Maßnahmen zur Robustheitssteigerung dennoch Fehler in der C-Musterqualifizierung auftreten, so können die Zuverlässigkeitsanforderungen nur mit hohem Aufwand seitens des OEM und der Zulieferer erfüllt werden. Konzeptionelle Defizite lassen sich durch die vorherigen Meilensteine in aller Regel minimieren oder sogar vermeiden. Eine Robustheitsanalyse im Anschluss an die Prüfungen liefert, sofern Ausfälle aufgetreten sind, Informationen über Produktschwachstellen, die durch reaktive Maßnahmen abzustellen sind.

Erprobungsfreigabe

Nach der strukturierten Dokumentation der erfolgreich durchgeführten Erprobungen inklusive aller Ergebnisse und Maßnahmen sowie deren Übermittlung an den OEM erfolgt die Erprobungsfreigabe.

Vergleicht man, wie in Bild 7 schematisch dargestellt, die Aufwandsverteilung im Entwicklungsprozess, welche zeitverzögert das Integral über die relative Fehleridentifikation zu den verschiedenen Entwicklungsphasen darstellt, so kann mit Hilfe der Methode Robust Design-Entwicklung & -Verifikation eine deutliche Reduzierung des Aufwands zur Fehleridentifikation und zur Fehlerabstellung erreicht werden. Im Gegensatz zur klassischen Qualifikation am Ende des Entwicklungsprozesses und der hohen Fehleraufdeckung in der C-Musterqualifikation bietet eine entwicklungsbegleitende Erprobung in der B-Musterphase zwar eine frühere Fehlererkennung und damit Änderungsmöglichkei-

ten für nachfolgende Musterstände, eine präventive Produktbeeinflussung ist damit aber nicht möglich. Erst durch einen integrativen Entwicklungs- und Erprobungsprozess und der damit verbundenen aktiven Robustheitssteigerung auf Bauteil-, Modul- und Systemebene in den frühen Konzept- und Designphasen sowie der spezifischen Prüfkonzeptauslegung und dessen -abstimmung kann der Arbeitsaufwand kosten- und wirkungseffizient in die frühen Entwicklungsphasen vorgelagert werden [44][152].

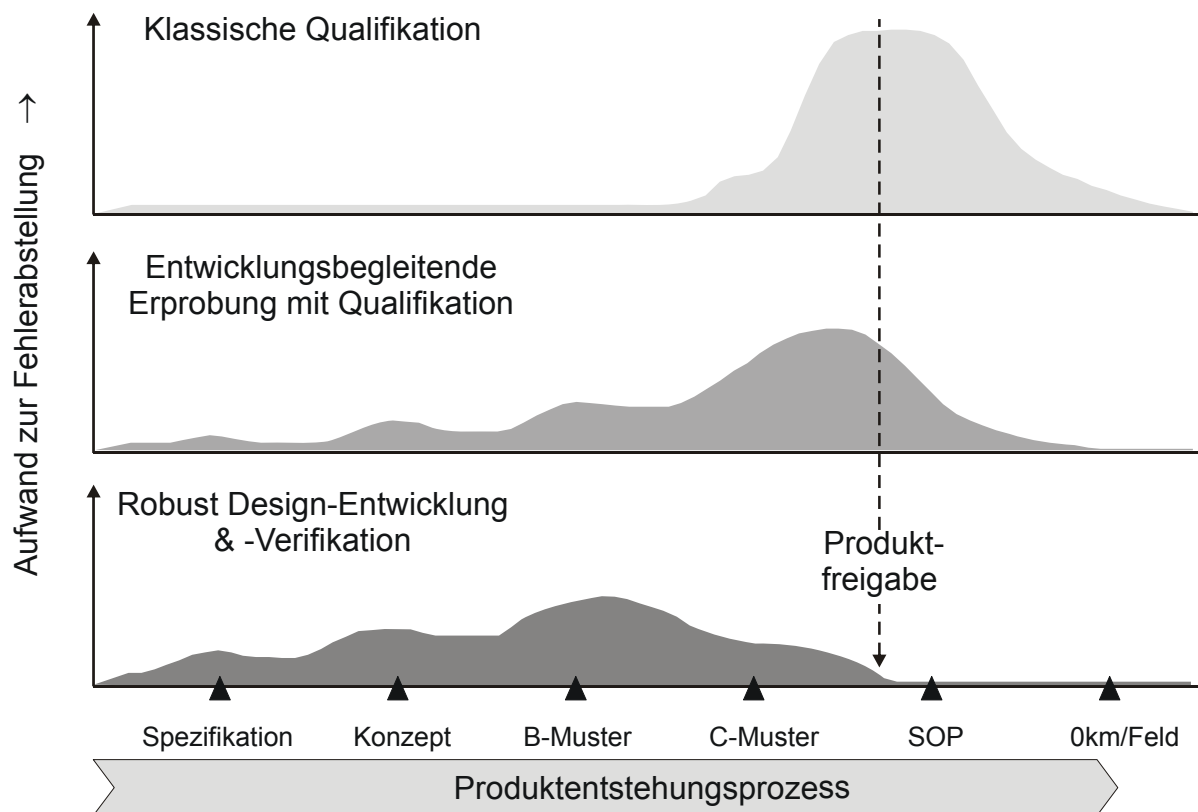


Bild 7: Schematische Darstellung der Aufwandsverteilung zur Abstellung von Fehlern während des Produktentstehungsprozesses [152]

2.2.2 Robustness Validation-Methode

In Anbetracht der Tatsache, dass trotz zahlreicher Absicherungsmethoden und Qualitätskontrollen sowohl seitens der Zulieferer als auch seitens der Automobilhersteller dennoch Elektronikfehler im Kundenumfeld auftreten, kann der Rückschluss gezogen werden, dass die derzeitigen Qualifizierungsmethoden unzureichend sind [65]. Daher wurde vom Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (ZVEI) in Zusammenarbeit mit der International Society of Automotive Engineers (SAE), der Japanese Society of Automotive Engineers (JSAE) und Experten aus der Industrie die Methode *Robustness Validation* in der gleichnamigen Arbeitsgruppe erarbeitet, um der genannten Problemstellung entgegenzuwirken.

Die Zuverlässigkeit gilt als ein Maß für die betriebsbedingte Wahrscheinlichkeit, dass ein Produkt gemäß seinen Anforderungen für eine vorbestimmte Zeit unter den gegebenen Einsatzbedingungen fehlerfrei funktioniert [64]. Um diese Anforderungen zu erfüllen, wird ein ganzheitliches Wissen über die Wechselwirkungen zwischen Fehlermechanismen und fehlerinduzierenden Belastungen benötigt. Die Kenntnis über die realen Einsatz- und Betriebsbedingungen ist dafür eine unabdingbare Voraussetzung. Darüber hinaus wandelt sich die Philosophie der Produktqualifikation von der Fehleridentifikation aus unterschiedlichen Prüfscenarien hin zu der Erzeugung und Wiederverwendung von grundlegendem Wissen über Fehlerphysik und Zuverlässigkeitstechnik sowie durch die strukturierte Untersuchung und Auswertung von Fehlern aus dem Kundenumfeld. Mit *Robustness Validation* wird sowohl den Entwicklern als auch den Anwendern elektronischer Produkte im Automotive-Umfeld eine wissensbasierte Qualifizierungsmethodik zur Verfügung gestellt, um eine robuste Entwicklung elektronischer Komponenten und Systeme und deren Validierung über den gesamten Produktlebenszyklus zu gewährleisten. Dadurch soll sichergestellt werden, dass ein Produkt unter den definierten Einsatzbedingungen mit einer ausreichenden Robustheitsreserve die spezifizierte Funktion über die geforderte Lebensdauer erfüllt. Anhand von Bild 8 wird schematisch der Begriff der Robustheitsreserve zwischen der tatsächlichen Zuverlässigkeit eines Halbleiterbauelementes und der Spezifikation eines Systems, in dem das Bauelement eingesetzt ist, skizziert [174]. Je geringer dieser Unterschied ist, desto wahrscheinlicher ist ein Ausfall des Bauelementes unter den Systemeinsatzbedingungen. Abhängig von der Art der Belastung führen Überschreitungen der Spezifikationsgrenzen zu unterschiedlichen Fehlermechanismen.

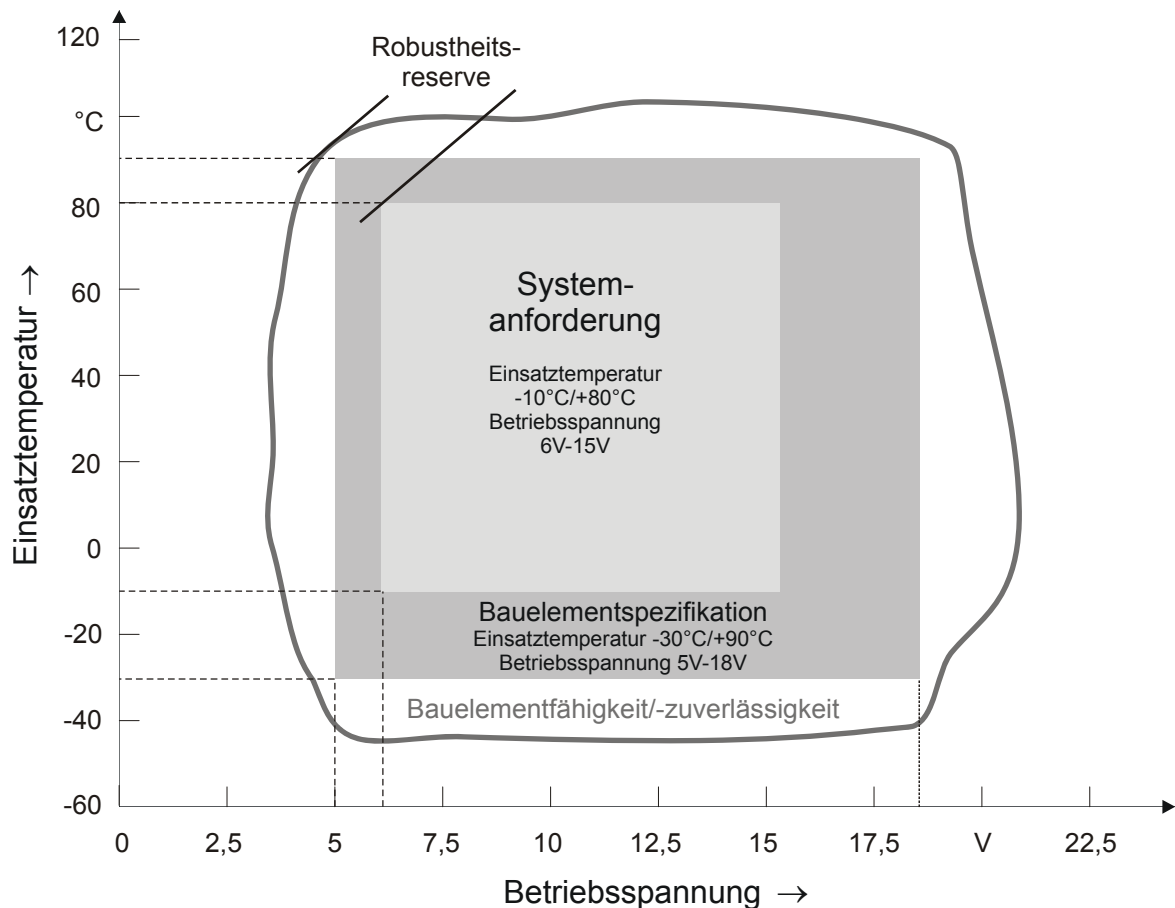


Bild 8: Exemplarisches Robustheits-Diagramm eines Halbleiterbauelementes für dessen Einsatz in einem System mit spezifizierten Anforderungen

Die Ermittlung der Robustheitsreserven beginnt mit der Design- und Entwicklungsphase und erstreckt sich über den gesamten Produktionsprozess eines Systems. Hierzu werden geeignete Überwachungsmechanismen benötigt. Die Methode stützt sich dabei auf den Einsatz entwicklungsbegleitender Simulations- und Analysewerkzeuge, um ein robustes Design vor der Fertigung der physikalischen Komponenten und Systeme zu gewährleisten. Anschließend werden durch Prüfungen bis zum Ausfall die Robustheitsgrenzen identifiziert, um die Lebensdauer unter den realen Einsatz- und Betriebsbedingungen zu prognostizieren und die Fehlerfreiheit des Herstellungsprozesses sicherzustellen. Somit werden durch Ausschluss intrinsischer Fehlerursachen die extrinsischen Fehler mit geeigneten Prüfscenarien ermittelt und in Zuverlässigkeitsaussagen unter Realbedingungen übergeführt. Für eine hohe Effizienz der Methode wird ein proaktives und umfassendes Wissen über die wirklichen Einsatzbedingungen, die Fehlerphysik bei elektronischen Systemen sowie über Qualitätsmanagementwerkzeuge und statistische Versuchsplanung benötigt.

Für eine erfolgreiche Anwendung der Methodik ist ein Informationsfluss vom Automobilhersteller über den Systemlieferanten bis hin zum Bauteilhersteller eine grundlegende Voraussetzung. Nur dadurch ist gewährleistet, dass jeder Projektteilnehmer das entsprechende Produkt einsatzortgerecht absichern kann. Hierbei müssen neben den funktionalen vor allem die belastungsspezifischen Anforderungen kommuniziert werden. Ausgehend vom realen Belastungskollektiv (Mission Profile) und den daraus abgeleiteten Anforderungen an das Gesamtsystem am Einbauort im Fahrzeug werden in einem Top-Down-Vorgehen sukzessive die Belastungskollektive und die Anforderungen an die Systemmodule und die Bauelemente abgeleitet [93]. Das Vorgehen zur Definition eines Mission Profiles von der System- über die Modul- bis hin zur Bauelementebene wird in Bild 9 visualisiert.

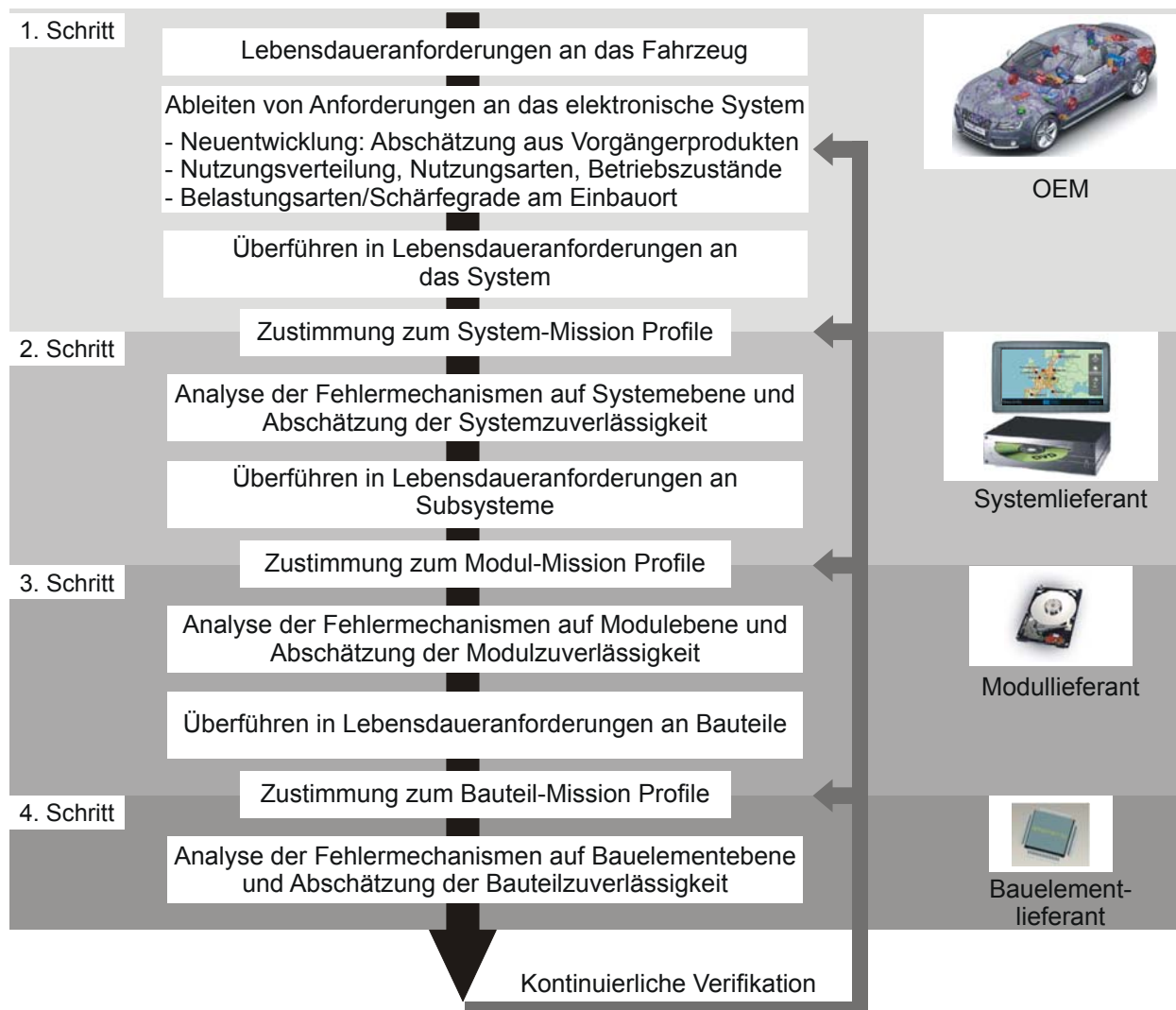


Bild 9: Vorgehensmodell zur Bestimmung eines Mission Profiles vom Gesamtfahrzeug bis hin zum Bauteil [93]

Eine expertenunterstützte Betrachtung der spezifischen Belastungsparameter und deren Verteilung über die Lebensdauer lässt Rückschlüsse über zu erwartende Fehlermechanismen auf Subsystem- sowie Bauelementebene zu, und ermöglicht eine Risikoanalyse bezüglich resultierender Systemfehler. Zu den relevanten Belastungsparametern zählen beispielsweise Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Vibration, Schock, Chemikalien sowie elektrische Belastungen durch überlagerte Wechselspannung, Über-/Unterspannung, Spannungspulse und elektromagnetische Strahlung. Es ergibt sich daraus eine Überlagerung aus Umweltbelastungen und funktionalen Belastungen. Hierbei sind nicht nur die minimalen und maximalen Belastungen von Interesse, sondern vor allem deren Häufigkeitsverteilung über die Lebensdauer. Diese ist beim Automobil definiert als 15 Jahre oder 300.000 km mit etwa 12.000 h Motorbetrieb und 54.000 Startvorgängen. Abgeleitet davon ergeben sich die Anforderungen hinsichtlich Betriebsmodi und mechanischen, klimatischen, chemischen und elektrischen Anforderungen an die einzelnen Systeme, deren Subsysteme und die entsprechenden Bauelemente. Ausgehend von den Belastungskollektiven gilt es einen systematischen Erprobungs- und Validierungsplan zu entwickeln. Wichtig hierbei sind die Festlegung zuverlässigkeitsrelevanter Prüfverfahren, deren Zeitdauern und Schärfegrade sowie eindeutige Qualitätsparameter und Ausfallkriterien, welche es während der Tests zu überwachen beziehungsweise die nach Testende zu analysieren gilt. Da die Zuverlässigkeit eines Produktes stark von dessen Herstellungsprozess abhängt, ist eine Robustheitsanalyse des Fertigungsprozesses wesentlicher Bestandteil der Robustness Validation Methode. Dabei ist ein Wissen und Verständnis zwischen potenziell auftretenden Prozessschwankungen oder Prozessproblemen und deren Auswirkungen auf die Robustheit eines Produktes unter Berücksichtigung des Einsatzzweckes von essenzieller Bedeutung. Der Herstellungsprozess eines Produktes beginnt dabei beim Wareneingang und erstreckt sich über die Materialverarbeitung bis hin zur Montage, der Verpackung und dem Versand. Erst ein stabiler Prozessschritt, welcher sich innerhalb der spezifizierten Toleranzgrenzen befindet und sich bei Schwankungen nicht negativ auf die Produktrobustheit auswirkt, gilt als robuster Prozess. Berücksichtigt man die Tatsache, dass sich auf heutigen elektronischen Baugruppen, die in zahlreichen Prozessschritten aufgebaut werden, bis zu mehrere tausend Bauelemente befinden, welche größtenteils unterschiedlich spezifiziert sind, wird die Komplexität von Wechselwirkungen zwischen involvierten Prozessschritten und deren Auswirkung auf die Robustheit eines Produktes deutlich. Sobald zuverlässigkeitsrelevante Prozessparameter identifiziert sind und deren Einfluss bekannt ist, beginnt die Durchführung des konzipierten Erprobungs- und Validierungsplans. Bestandteil hierbei sind Prototypen- (PTV), Design- (DV) und Produktionsvalidierung (PV). Während in der Prototypenvalidierung die Identifikation von intrinsischen Schwachstellen

fokussiert wird, können hierbei stark beschleunigte Testverfahren herangezogen werden, um Ausfälle zu generieren. Bei der Designvalidierung empfiehlt sich eine Einhaltung beziehungsweise eine moderate Überschreitung der Spezifikationsgrenzen, wobei zur Ermittlung der Robustheitsgrenzen die Prüfungen bis zum Lebensdauerende durchzuführen sind. Daraus können Korrelationen zwischen Test- und Realbedingungen abgeleitet werden. Mittels der Dokumentation der Versuchsergebnisse in Form von Radar-, Spinnen- oder Kiviatdiagrammen lassen sich die spezifischen Robustheitsreserven bei bestimmten Belastungen und unter Anwendung von Raffungsmodellen bewerten und visualisieren. Prüfungen im Rahmen der Produktionsvalidierung dienen zur Identifikation prozessbedingter Fehler. Hierbei sind die Spezifikationsgrenzen einzuhalten und die Testdauern richten sich nach den entsprechenden mathematischen Beziehungen der Beschleunigungsmodelle. Die erfolgreiche Durchführung der Produktionsvalidierung bestätigt die Robustheit eines Produktes für dessen Einsatz. Bei allen Validierungsphasen empfiehlt sich die Anwendung simulativer und statistischer Methoden und Verfahren, um die jeweiligen Schritte effizient zu gestalten und die Ergebnisse der einzelnen Prüfungen zu verifizieren. Statistische Informationen aus dem Produktionsprozess bei Serienanlauf sollten herangezogen werden, um die Validierungsergebnisse mit einer größeren Datenbasis zu bestätigen. In Bild 10 ist der beschriebene Prozessablauf grafisch dargestellt [93].

Die nachhaltige Umsetzung der Methode resultiert in einem Produkt, welches für einen zuverlässigen Einsatz unter realen Bedingungen und nicht für das Bestehen eines Qualifikationsstandards entwickelt ist. Daher ist häufig der Ausdruck „Fit for Application“ in Zusammenhang mit der Methode Robustness Validation zu finden.

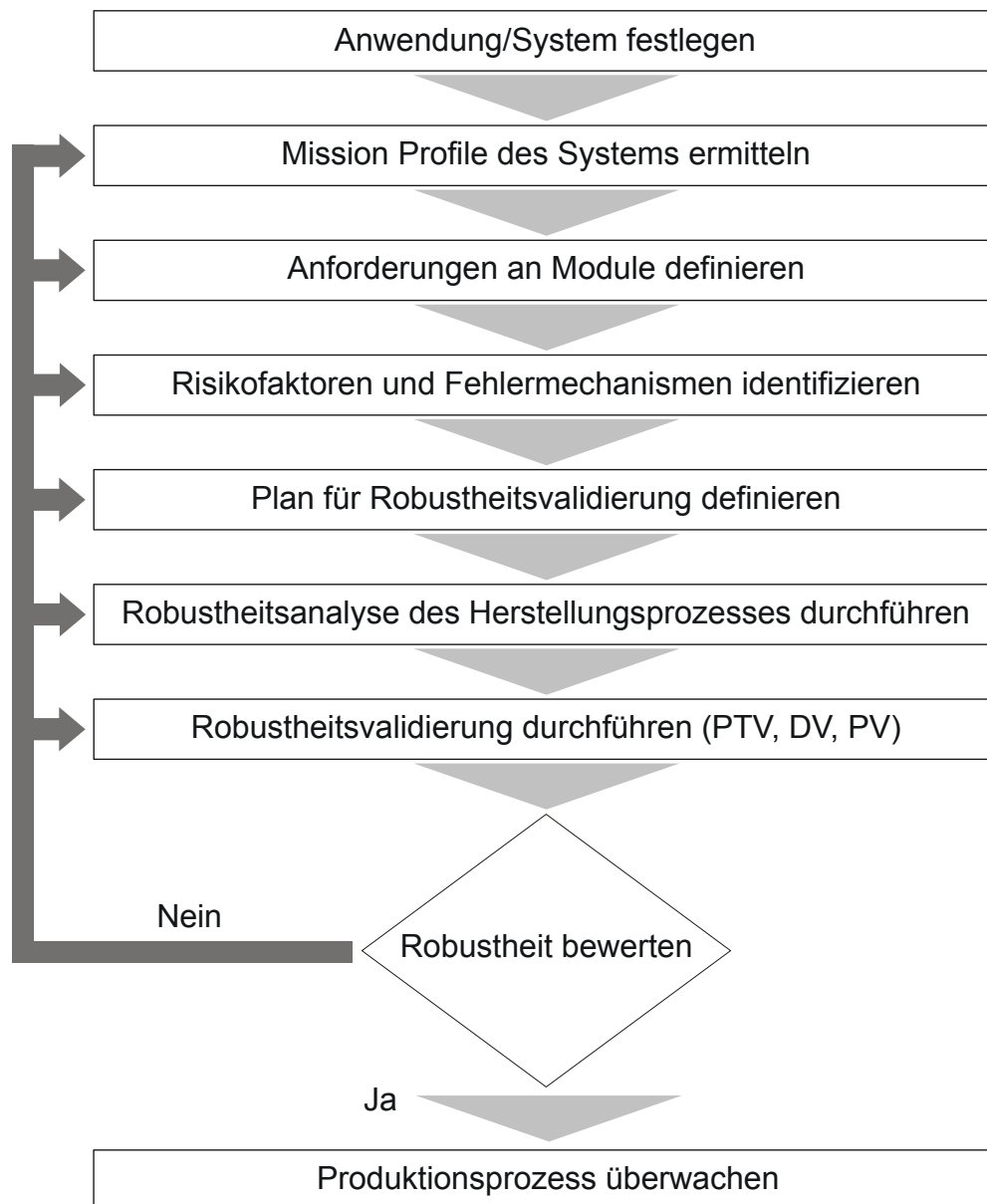


Bild 10: Prozessablauf der Robustness Validation-Methode [93]

3 Physikalisch-chemische Grundlagen

Wirken klimatische Einflüsse auf elektronische Systeme ein, so können eine Reihe von unterschiedlichen Fehlermechanismen induziert werden. Neben den physikalisch-chemischen Grundlagen werden im Folgenden die wesentlichen Fehlermechanismen bei Betauung und hoher Luftfeuchtigkeit vorgestellt.

3.1 Luftfeuchtigkeit und Betauung

Befinden sich elektrische und elektronische Komponenten und Systeme im Einsatz, so sind diese stets einer atmosphärischen Belastung ausgesetzt. Hierzu zählt auch die Belastung durch Feuchtigkeit in der Luft, bei der die Baugruppenoberfläche mit dem Wasserdampf der Umgebung in einem Gleichgewicht steht. Um die komplexen physikalisch-chemischen Zusammenhänge hinsichtlich der Effekte hoher Luftfeuchtigkeit und Betauung sowie der daraus resultierenden Fehlermechanismen zu verstehen, werden zunächst die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten ausführlich erläutert.

Luftfeuchtigkeit

Die Feuchtigkeit bezeichnet im Allgemeinen den Anteil des Wassers in einer Substanz. Der Wasserdampfanteil in Luft φ_{rel} wird im Speziellen als Luftfeuchtigkeit bezeichnet. Das am häufigsten verwendete Maß ist die relative Luftfeuchtigkeit, welche in Prozent angegeben wird. Sie ist gemäß der Gleichung 1 definiert als das Verhältnis von momentanem Wasserdampfpartialdruck p_w zum Sättigungspartialdruck p_s bei gleicher Temperatur [55].

$$\varphi_{\text{rel}} = \frac{p_w}{p_s} \text{ in \%} \quad (\text{Gl. 1})$$

Dagegen gibt die absolute Luftfeuchtigkeit (φ_{abs}) entsprechend der Gleichung 2 die Masse des Wasserdampfes (m_w) in einem definierten Gesamtluftvolumen (V_L), also die tatsächlich vorhandene Konzentration des Wasserdampfes an [30].

$$\varphi_{\text{abs}} = \frac{m_w}{V_L} \text{ in } \frac{\text{g}}{\text{m}^3} \quad (\text{Gl. 2})$$

Dampfdruckkurve und Taupunkt

Wasserdampfpartialdruck und Sättigungspartialdruck sind im Gegensatz zur Wasserdampfkonzentration temperaturabhängig und können mit Hilfe der Zustandsgleichung für ideale Gase nach der Gleichung 3 beschrieben werden. Hierbei ergibt sich der Gas- bzw. Dampfdruck (p) aus dem Quotienten der Gas-

beziehungsweise Dampfmasse m , der individuellen Gaskonstante R , der Temperatur T und dem Gesamtvolumen $V=f(p,T)$ [159].

$$p = \frac{m \cdot R \cdot T}{V} \text{ in Pa} \quad (\text{Gl. 3})$$

Aus dieser Formel lässt sich eine Dampfdruckkurve für beliebige Stoffe ableiten. Innerhalb definierter Grenzen gibt es für jeden Druck einer Flüssigkeit eine entsprechende Temperatur, bei der diese mit ihrem Feststoff im Gleichgewicht steht. In Bild 11 wird dieser Zusammenhang $p(T)$ als Schmelzdruckkurve bezeichnet. Im Gegensatz dazu gibt die Sublimationsdruckkurve das Gleichgewicht zwischen Feststoff und Gas wieder. Neben Schmelzdruckkurve und Sublimationsdruckkurve ist in der genannten Abbildung auch die Dampfdruckkurve eingezeichnet, welche den Zusammenhang zwischen flüssiger und gasförmiger Phase beschreibt. Alle drei genannten Kurven treffen sich im sogenannten Tripelpunkt, dem Punkt, bei dem die feste, die flüssige und die gasförmige Phase im Gleichgewicht stehen. Für Wasser liegt dieser Tripelpunkt definitionsgemäß bei einer Temperatur von 273,16 K und einem Druck von 611,657 Pa. Abhängig von Temperatur und Druck liegen daher verschiedene Zustände vor, welche von komplexen Phasenübergängen geprägt sind [26] [30][45][57].

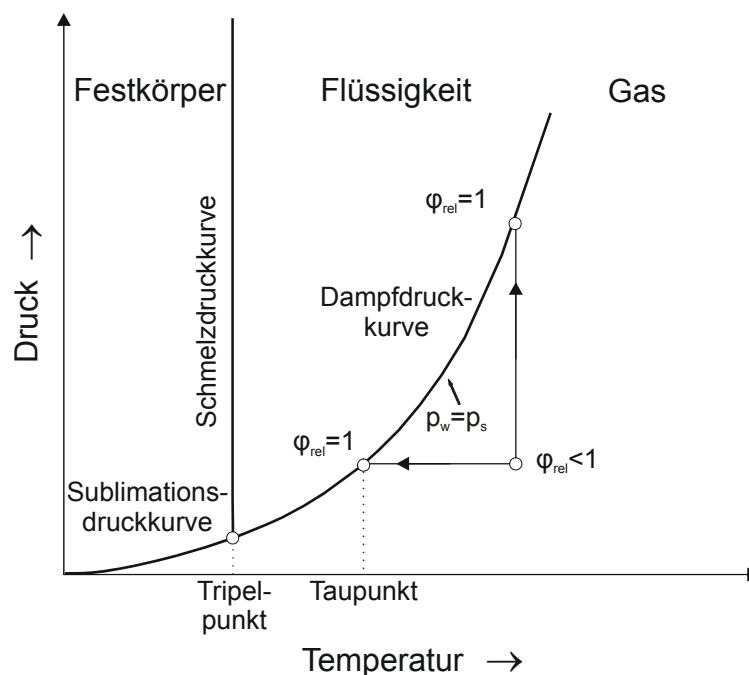


Bild 11: $p(T)$ -Diagramm und schematische Darstellung der Phasenbereiche

Der Sättigungspartialdruck beschreibt dabei den thermodynamischen Gleichgewichtszustand bei dem die Wasseraufnahme (Verdunstungsrate) und die Wasserabgabe (Kondensationsrate) gleich groß sind und eine Sättigungs-

konzentration von Wassermolekülen vorliegt. Ist der Wasseranteil kleiner als der entsprechende Maximalwert, spricht man von ungesättigter feuchter Luft. Wird die Sättigungskonzentration erreicht, ist die feuchte Luft gesättigt. Übersteigt die Wasserdampfkonzentration den Maximalwert, beispielsweise durch schnelle Senkung der Temperatur und des damit verbundenen Sättigungsdampfdrucks, kondensiert der überschüssige Wasserdampf und man spricht von übersättigter feuchter Luft und Taubildung. Der Wasserdampfpartialdruck ändert sich ab diesem Zeitpunkt nicht mehr und die relative Luftfeuchtigkeit ist dann konstant 100 %. Der Punkt der Dampfdruckkurve, an dem die Kondensation von Wasser überwiegt, wird auch Taupunkt genannt. Die Abkühlung von feuchter Luft unter gleichem Druck wird als isobare Abkühlung bezeichnet [42]. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn feuchte Luft auf eine kältere Oberfläche trifft oder wenn ein kaltes Objekt in eine warme Umgebung transferiert wird.

Die Kondensation des Wassers tritt in der Realität überwiegend an sogenannten Keimstellen auf, da es für die Wassermoleküle aufgrund der Oberflächenspannung der Wassertropfen ungeeignet ist, in der Luft zu kondensieren. Keimstellen können Staubpartikel oder ähnliche Verunreinigungen sein. Ausschlaggebend für die Tropfenbildung an einer Stelle ist die Benetzungsfähigkeit, ausgedrückt durch den aus Keimoberfläche und Wasser gebildeten Randwinkel. Dieser ergibt sich aus dem Winkel am Kontaktpunkt zwischen der benetzten Oberfläche und der Tangente an der Oberfläche des Wassertropfens. Der Randwinkel kann mit Hilfe der Youngschen Gleichung beschrieben werden und ist in Bild 12 dargestellt.

$$\cos \alpha = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{12}}{\sigma_{23}} \quad (Gl. 4)$$

σ_{12} : Grenzflächenspannung Festkörper - Flüssigkeit
 σ_{13} : Oberflächenspannung des Festkörpers
 σ_{23} : Oberflächenspannung der Flüssigkeit

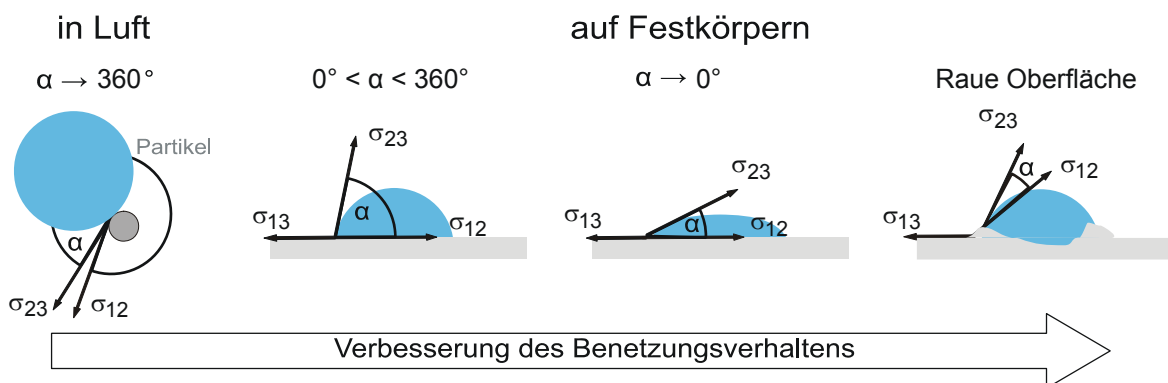


Bild 12: Benetzungsverhalten in Abhängigkeit vom Randwinkel

Aufgrund des kleineren Randwinkels kondensiert Wasser also vorzugsweise auf Festkörpern mit geringer Oberflächenspannung beziehungsweise auf rauen oder verunreinigten Oberflächen, bei denen sich die Wassertropfen in Profilsenken leichter bilden. Der kondensierte Tropfen an einer Oberfläche kann dabei selbst als Keimstelle fungieren. Durch die Oberflächenbenetzung mit Wasser können Spuren wasserlöslicher Stoffe absorbiert werden, die sich dann in den Tröpfchen sammeln. Verdunstet anschließend das Wasser wieder, bleiben die Verunreinigungen zurück und bilden bei einer erneuten Kondensation so genannte Kondensationszentren, deren Aktivität mit jeder Kondensationsphase steigt. An benachbarten Keimen oder Zentren mit geringerer Aktivität sinkt dann die Kondensationswahrscheinlichkeit [38][20].

Die Wasserkondensation auf Flächen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % wird im Allgemeinen als Tau bezeichnet, bei technischen Geräten wird von Betauung gesprochen. Als hohe Luftfeuchtigkeit wird der Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit >80 % bezeichnet, bei dem aufgrund der geringen Taupunktdifferenz eine Betauungsgefahr gegeben ist [154].

Zur Bestimmung der Taupunkttemperatur kann die Magnus-Formel herangezogen werden. Unter der Verwendung der Koeffizienten nach Magnus (C_1, C_2, C_3) aus Tabelle 1 und des Wasserdampfpartialdruckes p_w erfolgt die mathematische Berechnung des Taupunktes T_{Tau} nach der Gleichung 5 [147].

$$T_{\text{Tau}} = \frac{-\ln\left(\frac{p_w}{C_1}\right) \cdot C_3}{\ln\left(\frac{p_w}{C_1}\right) - C_2} \quad (\text{Gl. 5})$$

Phase	Temperatur	C_1	C_2	C_3
Eis	-50,9 °C - 0,0 °C	6,10714 mbar	22,44294	272,440 °C
Wasser	-50,9 °C - 0,0 °C	6,10780 mbar	17,84362	245,425 °C
Wasser	0,0 °C - 100,0 °C	6,10780 mbar	17,08085	234,175 °C

Tabelle 1: Koeffizienten nach „Magnus“

Zur Lösung der Gleichung 5 muss der Wasserdampfpartialdruck bekannt sein. Dieser Wert ist entweder aus veröffentlichten Dampfdrucktabellen zu entnehmen oder mit Hilfe der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und den Koeffizienten nach Magnus wie folgt zu berechnen:

$$p_W = C_1 \cdot e^{\frac{C_2 \cdot T}{C_3 + T}} \cdot \frac{\varphi_{\text{rel}}}{100\%} \quad (\text{Gl. 6})$$

Allerdings ist der Effekt der Betauung, wie dieser in den Gleichungen 5 und 6 beschrieben ist, eine idealisierte Berechnungsmethode. Hinter dieser vereinfachten Betrachtungsweise stehen komplexe Abläufe. Dabei kann der physikalische Effekt der Betauung aus der Atmosphäre nicht nur aus unterschiedlichsten Stoffen wie Gasen und Aerosolen, sowie deren Verbindung mit atmosphärischen Kontaminationskeimen bestehen, sondern hängt darüber hinaus auch, wie bereits erläutert, maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit eines Produktes ab [14].

Ein weiterer signifikanter Einflussfaktor für eine potenzielle Feuchteadsorption ist die thermische Energie des betauenden Werkstoffes, welche von dessen Masse und der spezifischen Wärmekapazität abhängig ist. Da ein Temperaturunterschied zwischen Umgebung und Werkstoff bei einer definierten Temperatur T gleichbedeutend ist mit einer Enthalpiedifferenz, folgt aus der Gleichung 7, dass je geringer die Masse m eines Systems mit einer spezifischen Wärmekapazität c ist, desto kleiner ist die Wärmemenge ΔQ , die bei einem Temperaturunterschied ΔT aufgenommen werden muss, um ein identisches Energieniveau zu erreichen.

$$\Delta Q = m \cdot c \cdot \Delta T \quad (\text{Gl. 7})$$

Infolgedessen hat aufgrund der physikalischen Gesetzmäßigkeiten eine Taupunktunterschreitung bei geringen thermischen Massen einen sehr geringen und kurzweiligen Einfluss, so dass eine Kondensation praktisch kaum auftritt [41]. Die Diffusion von Wasser- oder Gasmolekülen in oder durch eine Isolationsschicht hindurch beruht auf dem physikalischen Prozess der thermischen Eigenbewegung von Teilchen. Die Ursache für eine Diffusion sind unterschiedliche Partialdrücke beziehungsweise Stoffkonzentrationen auf beiden Seiten einer Isolationsschicht [39]. Technische Auswirkungen hat die Diffusion dahingehend, dass beispielsweise Wasserdampf aus der Umgebung durch ein mechanisches Gehäuse aus Kunststoff oder Kunststoff-Metall-Kombinationen eindringt oder aufgenommen wird. Daraus resultierend können sich die mechanische Festigkeit oder die elektrischen Eigenschaften der im Gehäuse befindlichen Leiterplatte verändern [47]. Unter Absorption versteht man die physikalische oder chemische Einlagerung von Wassermolekülen in einen Werkstoff, wodurch es zu geometrischen oder physikalischen Veränderungen eines Werkstoffes kommen kann [146]. Das Gegenteil davon ist die Desorption, bei der Moleküle aus einem Stoffgemisch ausgelagert werden. Je nach Wasserdampfpartialdruck und maximalem Aufnahmevermögen des Feststoffes treten Absorption und Desorption unterschiedlich stark auf. Durch die eingelagerten Moleküle sinkt der Isolations-

widerstand organischer Materialien [59]. Bild 13 zeigt die eben beschriebenen Mechanismen Desorption, Adsorption, Absorption und Diffusion [161].

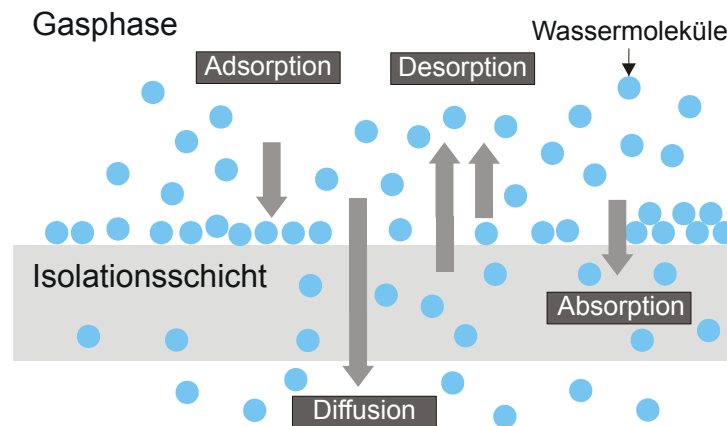


Bild 13: Thermodynamik von Wassermolekülen

Bei der Adsorption beziehungsweise Kondensation hingegen lagern sich Wassermoleküle auf der Oberfläche eines Körpers an. Je nach Temperatur, Druck und Wasserdampfpartialdruck adsorbieren Wassermoleküle aus der Gasphase an der Oberfläche oder desorbieren von der Oberfläche in die Umgebung und bilden dadurch ein kontinuierliches Gleichgewicht. Adsorption tritt demnach auch bei geringer Luftfeuchtigkeit, also bei unter 60 % relativer Luftfeuchtigkeit auf, die Ablagerung ist dann jedoch nur etwa 10 Monolagen dick. Neben Druckunterschieden an der Grenzfläche sind auch physikalische Adhäsionskräfte zwischen Wasser- und Werkstoffmolekülen eine Ursache für eine verstärkte Wasseradsorption [39].

3.2 Fehlermechanismen bei klimatischer Beanspruchung

Da die Lagerung, der Transport und der Betrieb eines elektronischen Systems unter hoher Luftfeuchtigkeit oder potenziell auftretender Betauung eine klimatische Belastung darstellt, gilt es dadurch induzierte Fehlermechanismen sowie deren Fehlerauswirkungen zu eruieren. Nur ein detailliertes Wissen über die genauen physikalischen und chemischen Mechanismen sowie dafür relevante Einflussparameter ermöglicht die gezielte und nachhaltige Vermeidung von kostenintensiven und rufschädigenden Feldausfällen. Aus diesem Grund sollen im Folgenden die wesentlichen physikalisch-chemischen Fehlerursachen näher erläutert werden, wobei es primär um Mechanismen geht, die auf Leiterplattenebene auftreten können. Fehlermechanismen, die zu einem Versagen spezifischer Bauelemente wie integrierter Schaltkreise (ICs) oder Stecker führen, werden hier bewusst vernachlässigt. Diese beruhen auf Absorptions- und Diffusionsvorgängen in gehäuseten Bauelementen und leiten dort korrosive Prozesse ein. Da die Vermeidung dieser Fehlerbilder der Aufgabe der

Bauelementhersteller unterliegt, welche nach einschlägigen Industriestandards wie beispielsweise der AEC-Q100 und der AEC-Q200 für diskrete und passive Bauelemente ihr offeriertes Bauelementspektrum testen und qualifizieren, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Fehlermechanismen auf Bauelementebene nicht weiter vertieft [100][101]. Bei einer Vielzahl von Werkstoffen und Systemen im Automobil, wie beispielsweise Interiorverkleidung, Anbauteile im Außenbereich oder am Getriebe, spielt eine Betauung keine zuverlässigkeitsrelevante Rolle. Allerdings kann dieser Effekt gerade bei elektronischen Baugruppen erheblichen Schaden verursachen. Vor allem die komplexe Vernetzung der einzelnen Steuergeräte, von denen sich in einem heutigen Oberklassefahrzeug bis zu 80 Stück befinden, und die hohe Signalempfindlichkeit bei minimalen Kontaktschlüssen erhöhen das Risiko feuchte- und betauungsbedingter Ausfälle erheblich.

3.2.1 Elektrochemische Korrosion

Unter Korrosion von Metallen wird im Allgemeinen die Beschädigung und Qualitätsminderung metallischer Werkstoffe durch chemische Reaktionen des Metalls mit Bestandteilen der Umgebung verstanden. Die speziell im Zusammenhang mit Elektrolyten auftretende Korrosion tritt an der Phasengrenze zwischen Metall und Elektrolytlösung auf und wird elektrolytische oder elektrochemische Korrosion genannt. Aufgrund der Existenz zweier metallischer Werkstoffe, welche entweder direkt oder über den Elektrolyten verbunden sind, wird auch häufig die Bezeichnung Kontaktkorrosion verwendet. Die elektrochemische Korrosion eines Metalls vollzieht sich dadurch, dass den Metallatomen Elektronen entzogen werden und so das Metall oxidiert wird. Dies gilt nicht nur, wenn eine Sauerstoffreaktion stattfindet, sondern auch bei der Bildung anderer Metallverbindungen [66]. Der Korrosionsvorgang an Elektroden kann lokal in anodische Oxidation des Metalls Me



und kathodische Reduktion



eines reaktiven Mediums X unterschieden werden. Enthält die angrenzende Elektrolytlösung beispielsweise gelösten Sauerstoff, so kommt es nach Gleichung 10 zur Metallauflösung und kathodischen Reduktion von Wasserstoff.



Zudem findet eine Sauerstoffreduktion und Bildung von Hydroxidionen an der Kathode entsprechend der Gleichung 11 statt.



Die bekannteste Korrosionsform, die sogenannte Sauerstoffkorrosion, ist die Folge und führt entsprechend der Gleichung 12 zur Ablagerung von Oxidschichten.



Das Wachstum dieser Oxidschichten wird dabei durch den Diffusionsvorgang von Sauerstoff und von der Temperatur bestimmt. Die Kinetik der elektrochemischen Korrosion ist von vielen Faktoren abhängig. Welcher kathodische Teilvorgang abläuft, hängt unter anderem vom pH-Wert des Elektrolyten, der Konzentration der Reaktionspartner und vom Standardpotenzial des Metalls ab. Der tatsächliche Bindungszustand der meist gelösten Metallionen kann sehr verschieden sein. Es können daher hydratisierte Kationen, welche eine Hydrathülle mittransportieren, hydrolysierte Kationen oder andere Bindungen wie zum Beispiel Ammoniak- oder Cyanidkomplexe vorliegen [8][66][47]. Durch die Oxidation und einer anliegenden Spannung zwischen Kathode und Anode stellt sich zudem ein Ausgleichsprozess aus Metallauflösung und Metallabscheidung an den Elektroden ein. Dadurch wandern Metallionen aus der Grenzschicht der Anode in die Elektrolytlösung und die Leitfähigkeit des Elektrolyten nimmt bis zu einer bestimmten Konzentration an dieser Elektrode zu. Elektroden, bei denen Metallionen in die Lösung übertreten und so das Elektrodenpotential bestimmen, bezeichnet man auch als Elektroden erster Art [50]. Die Auflösung beziehungsweise Abscheidung des Metalls kann bis zur vollständigen Trennung oder Verbindung einer Leiterbahn erfolgen und ist darüber hinaus Grundlage für eine elektrische Doppelschicht, die ein Elektrodenpotential, die sogenannte Galvani-Spannung, an einer Elektrode ohne äußere anliegende Spannung bedingt. Oxidations- und Reduktionsreaktionen werden ebenfalls durch das elektrochemische Potential eines Metalls bestimmt. Galvani-Spannungen können demnach auch bei metallisierten Oberflächen oder bei Metallen auftreten, die sich im gleichen Elektrolyten befinden und unterschiedliche elektrochemische Potentiale aufweisen. Die Größenordnungen sind zwar meist vernachlässigbar, die auftretenden Potentiale erhöhen jedoch die Korrosionsgeschwindigkeit. Die elektrochemische Korrosion kann in die elektrochemische Migration (ECM) übergehen, wenn ein äußeres elektrisches Feld als treibende Kraft vorhanden ist, um eine Migration von Ionen zu verursachen [1].

3.2.2 Kriechströme durch Elektrolytbildung

Stoffe oder Stoffgemische, bei denen ein Stromtransport über Ionen erfolgen kann, werden als Elektrolyte bezeichnet. Generell liegen die Ionen des Elektrolyten als sogenannte Assoziate mit einem oder mehreren Lösungsmittelmolekülen vor [47]. Eine Wasseradsorption auf einer elektronischen Baugruppe hat den Effekt, dass sich im Metallgefüge oder auf der Oberfläche befindliche Verunreinigungen, beispielsweise durch den Fertigungsprozess eingebrachte Salze oder Halogenide, Metallionen aus den freiliegenden Leiterbahnen oder Substanzen angrenzender organischer Isolierstoffe, wie unverbrauchte Vernetzer oder Härter, im angesammelten Wasser lösen und teilweise in Ionen zerfallen. Zusätzlich kann durch adsorbiertes Wasser Kohlendioxid aus der Luft aufgenommen und in stark ionische Kohlensäure umgewandelt werden [31]. Neben der Wasseradsorption besteht auch die Möglichkeit, dass organische, nichtionische Verunreinigungen aufgrund ihrer hygroskopischen Wirkung Feuchtigkeit aus der Atmosphäre aufnehmen und einen geschlossenen Wasserfilm ausbilden [178]. Die Leitfähigkeit des Elektrolyten und der damit verbundene Kriechstrom ist dabei abhängig von der Ionenkonzentration, den Ladungszahlen, der Ionenbeweglichkeit und der Temperatur [1]. Abhängig von der Empfindlichkeit elektronischer Schaltungen kann diese Leitfähigkeit ausreichen, um Störungen zu bewirken. Nachdem das Adsorbat getrocknet ist, verschwindet die Leitfähigkeit. Tritt jedoch erneut eine Betauung auf, so treten die Kriechströme aufgrund einer Aufkonzentration verstärkt auf [150].

3.2.3 Elektrochemische Migration

Mit zunehmender Packungsdichte, hochohmigeren Schaltungen und miniaturisierten Anschlussstrukturen bei gleichen Signalpegeln tritt der Fehlermechanismus der elektrochemischen Migration (ECM) immer mehr in den Fokus und wird von Krumbein als lange bekannte Fehlerursache von Feldausfällen deklariert [3][10][71]. Als Bezeichnung dieses Fehlermechanismus sind neben der ECM auch die Begriffe der Metallmigration, der Ionenmigration oder der elektrolytischen Migration in der Literatur vorzufinden [162]. Im Weiteren soll aber einheitlich der Begriff der elektrochemischen Migration verwendet werden. Umfangreiche Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass es hierbei aufgrund einer Metallwanderung in einer elektrolytischen Lösung zwischen Kathode und Anode zu einer Abnahme des Oberflächenisolationswiderstandes und einem damit verbundenen Leckstrom kommt [176][179]. Diese metallischen Brücken werden als Dendriten bezeichnet [151]. Kohman untersuchte dieses Phänomen anhand von Silber, bis festgestellt wurde, dass auch andere Metalle von diesem Fehlermechanismus betroffen sein können [52]. Bild 14 zeigt exemplarisch das optische Erscheinungsbild dieses Fehlermechanismus anhand zweier benachbarter Kupferleiterbahnen.

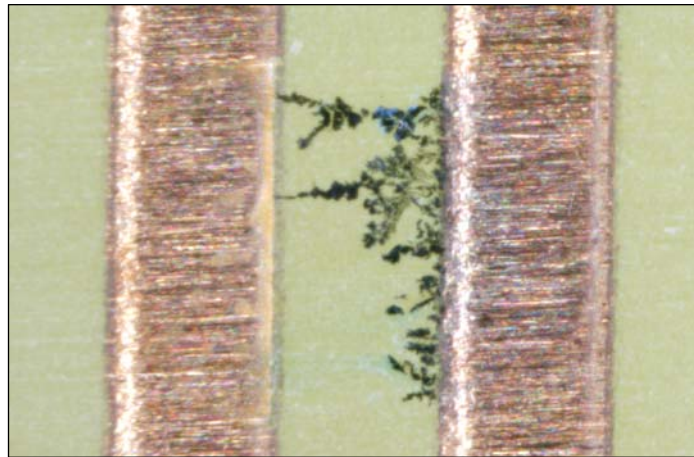


Bild 14: Dendrit zwischen benachbarten Kupferleiterbahnen

Mit fallender Tendenz migrieren in destilliertem Wasser auch Kupfer, Zinn, Blei, Wismut, Cadmium und Zink, wobei Silber die stärkste Migrationsaffinität aufweist. Unter Anwesenheit von Halogenen im Allgemeinen und Chloriden im Speziellen zeigen auch Gold, Indium, Palladium und Platin dieses Verhalten [151][4]. Im Gegensatz zu allen genannten Materialien findet bei Nickel kein kathodisches Dendritenwachstum, sondern eine Metallwanderung von der Anode zur Kathode statt [52][53]. Dies ist begründet durch die Ausbildung temporärer Komplexverbindungen, welche negativ geladen sind und eine Rückwanderung zur Anode bewirken, wo diese sich ablagern [54]. Aufgrund der singulären Relevanz der anodischen Dendritenausbildung wird im Folgenden nur das kathodische Wachstum erörtert. Der genannte Fehlermechanismus kann an freien Leiterplattenoberflächen, an internen Schnittstellen und in gehäuseten Bauelementen auftreten [120]. Die wesentlichen Grundvoraussetzungen um den Fehlermechanismus zu induzieren, sind eine elektrolytische Lösung, eine Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode sowie eine gewisse Betriebszeit bei den genannten Voraussetzungen [54]. Als minimale Bedingungen für einen leitenden Pfad zwischen den Elektroden und Metallwanderung werden in der Literatur 20 Monolagen Wasser sowie 2 V Gleichspannung genannt [10][11]. Dabei tritt ECM vorwiegend bei Gleichspannung auf und konnte bei Wechselspannung über 60 Hz nicht mehr nachgewiesen werden [176][71]. Bei niedrigen Spannungen (2 V - 4 V) lässt sich die Beziehung zwischen Ausfallzeit und angelegter Spannung über die loglineare Form der Butler-Volmer Gleichung beschreiben [167]. Ab einer Gleichspannung von 100 V kommt es zu einem Wechsel des Fehlermechanismus, welcher sich von ECM zu Conductive Anodic Filament (CAF) ändert [10]. Dieser Fehlermechanismus wird in Abschnitt 3.2.4. noch ausführlich erläutert. Anhand von Bild 15 wird der Ablauf der ECM dargestellt.

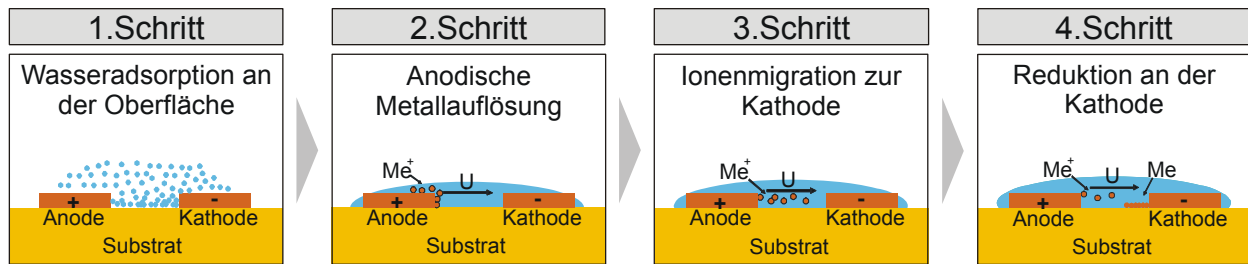


Bild 15: Fehlermechanismus der elektrochemischen Migration

Im ersten Schritt findet die Ausbildung eines leitenden Pfades zwischen den Elektroden statt. Die Wahrscheinlichkeit einer Feuchteadsorption hängt im Wesentlichen von den Materialeigenschaften der Baugruppe, der Luftfeuchtigkeit, dem Druck sowie der Temperaturdifferenz zwischen Baugruppe und Umgebungsluft ab [6]. Hygroskopisch wirkende Verunreinigungen sowie eine höhere Oberflächenenergie der Materialien beschleunigen hierbei den ersten Schritt der Wasseradsorption [179]. Gerade Verunreinigungen durch Fingerabdrücke, Luftpartikel, Metallspäne, Flussmittelrückstände aus dem Lötprozess und Ausgasungsprodukte aus unterschiedlichen Materialien wirken als Kondensationskeime auf der Oberfläche und ermöglichen eine beschleunigte Adsorption von Wassermolekülen [53][71]. Eben genannte Einflüsse führen dazu, dass eine Kondensation bereits ab einer kritischen relativen Luftfeuchtigkeit von 55-70 % stattfinden kann und der Taupunkt von 100 % deutlich herabgesetzt wird [164]. Unter der spezifischen kritischen Luftfeuchtigkeit tritt keine Migration auf [6].

Bei der Metallauflösung an der Anode wirken die anliegende Potentialdifferenz sowie die betroffene Oberfläche als signifikante Einflussgrößen [46]. Darüber hinaus wirken Temperatur, Druck, spezifische Leitfähigkeit, Konzentration der elektrochemisch aktiven Verbindungen und die Art des Elektrodenmaterials bei der Auflösungskinetik an der Anode mit. Halogenide im Allgemeinen und Chlor im Speziellen dienen als Katalysatoren bei der anodischen Metallauflösung [11] [149]. Für den Fall der anodischen Kupferauflösung wird von einem aktivierungskontrollierten Prozess gesprochen [145]. Die Prozesse bei der anodischen Metallauflösung werden in Bild 16 dargestellt [140].

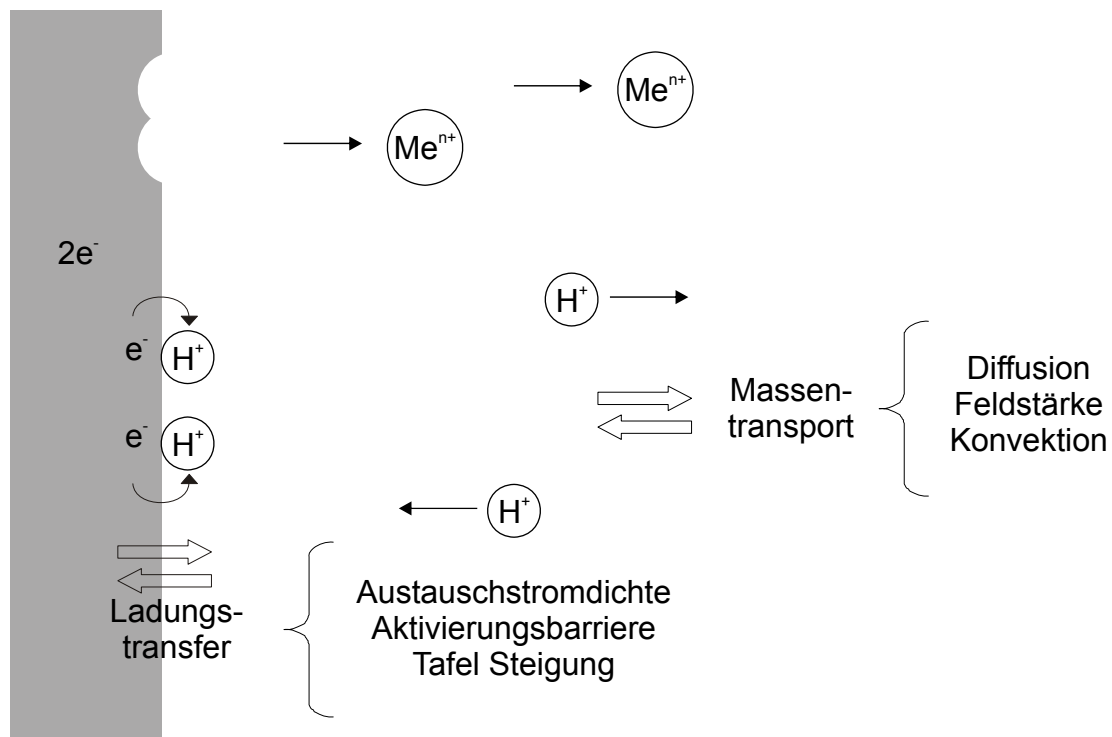


Bild 16: Prozesse an der Grenzschicht zwischen Anode und elektrolytischer Lösung

Die Reaktionsgeschwindigkeit für den anodischen Metallauflösungsprozess kann mit Hilfe des Arrhenius-Gesetzes nach Gleichung 13 beschrieben werden [62].

$$k = k_0 \cdot e^{\left(-\frac{\Delta E_A}{R \cdot T}\right)} \quad (\text{Gl. 13})$$

mit k =Reaktionsgeschwindigkeit, k_0 =maximale Reaktionsgeschwindigkeit bei hohen Temperaturen, E_A =Aktivierungsenergie der Reaktion (mol^{-1}), R =allgemeine Gaskonstante ($8,31 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$) und T =Temperatur.

Im nächsten Schritt migrieren die aufgelösten Metallionen entlang des elektrischen Feldes in Richtung der Kathode. Zwar kann dieser Prozess auch diffusionsgesteuert stattfinden, was aber in Anbetracht der Relevanz auf elektronischen Schaltungsträgern sekundär ist [147]. Dieser dritte Schritt wird maßgeblich durch die Feldstärke, die Temperatur und die Konzentration der Verunreinigungen bestimmt. Dabei kann der Zusammenhang zwischen Ionen-Migrationsgeschwindigkeit m_v und der elektrischen Feldstärke E , beziehungsweise der Spannung U und Elektrodenabstand d , sowie der Ionenmobilität μ mit Hilfe der Gleichung 14 beschrieben werden [179].

$$m_v = \mu \cdot E = \mu \cdot \frac{U}{d} \quad (\text{Gl. 14})$$

Der Einfluss der Temperatur ist dadurch begründet, dass sowohl die Leitfähigkeit der elektrolytischen Lösung als auch die Ionenbeweglichkeit mit der Temperatur zunehmen und die Viskosität entsprechend abnimmt. Verunreinigungen tragen darüber hinaus zu einer Erhöhung der Leitfähigkeit bei [71]. Dies lässt sich dadurch erklären, dass für Elektrolytlösungen das Ohmsche Gesetz gilt. Der elektrische Widerstand einer Lösung mit dem spezifischen Widerstand ρ , gemessen zwischen zwei Elektrodenflächen A mit dem Elektrodenabstand d , ergibt sich aus.

$$R = \rho \cdot \frac{d}{A} \quad [\Omega\text{m}] \quad (\text{Gl. 15})$$

Der Reziprokwert des spezifischen Widerstands ist die Leitfähigkeit κ mit der SI-Einheit Sm^{-1} beziehungsweise $1/\Omega\text{m}$. Um die Leitfähigkeit verschiedener Elektrolyte zu vergleichen, werden gleiche Stoffmengenkonzentrationen bezogen auf die Ionenäquivalente verwendet. Man definiert die Äquivalentleitfähigkeit Λ , die die Leitfähigkeit einer Lösung bezogen auf eine Äquivalentkonzentration

$$c \cdot \left(\frac{1}{z^*} \cdot X\right) \quad (\text{Gl. 16})$$

eines Teilchens X darstellt. Damit ergibt sich die Äquivalentleitfähigkeit

$$\Lambda = \frac{\kappa}{c \cdot \left(\frac{1}{z^*} \cdot X\right)} \quad \left[\frac{\text{m}^2}{\Omega\text{mol}}\right]. \quad (\text{Gl. 17})$$

Starke Elektrolyte dissoziieren in wässriger Lösung vollständig. Für ideale Lösungen kann das Gesetz der unabhängigen Ionenbeweglichkeit angewendet werden. Dadurch liefert jede Ionensorte einen charakteristischen Beitrag zur Leitfähigkeit. Die Ionenleitfähigkeit λ_{\pm} einiger Ionen bei 25 °C kann der Tabelle 2 entnommen werden [139][141].

Ionensorte	λ_{\pm} in $\text{cm}^2/(\Omega\text{mol})$	Ionensorte	λ_{\pm} in $\text{cm}^2/(\Omega\text{mol})$	Ionensorte	λ_{\pm} in $\text{cm}^2/(\Omega\text{mol})$
H_3O^+	349,8	Mg^{++}	53,1	Br^-	78,4
Li^+	38,7	Ba^{++}	63,6	I^-	76,8
Na^+	50,1	Fe^{+++}	68,0	NO_3^-	71,4
K^+	73,5	OH^-	198	SO_4^{--}	79,9
NH_4^+	73,4	Cl^-	76,3	CO_3^{--}	70,0

Tabelle 2: Ionenleitfähigkeit ausgewählter Ionen bei 25 °C

Abschließend findet die Reduktion der Metallionen und damit die Metallablagerung an der Kathode statt [53]. Anhand der Gleichungen 18 bis 22 werden die elektrochemischen Vorgänge am Beispiel der Silbermigration erläutert [46][52][136].

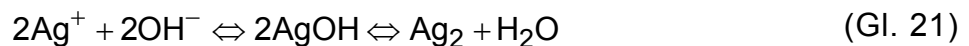
Metallauflösung und Elektrolyse von Wasser an der Anode:



Elektrolyse von Wasser an der Kathode:



Equilibrium zwischen H^+ und OH^- Ionen:



Ionenreduktion an der Kathode und Metallabscheidung:



Diese durch elektrochemische Redoxreaktionen entstandenen Metallbrücken sind äußerst empfindlich und können bei höheren Stromdichten schnell durch thermische Überhitzung zerstört werden. Hierbei kommt es zunächst zu einem elektrischen Kurzschluss, bei dem hohe Ströme fließen können und anschließend zu einem Abfall des Stromes [135]. Bei hochohmigen Schaltungen kann aber auch ein statischer Leckstrom auftreten. Somit können sowohl sporadische als auch permanente Fehler auf elektronischen Schaltungsträgern auftreten, wodurch eine Fehleranalyse an Ausfallteilen aus dem Feld stark erschwert wird und häufig erfolglos bleibt [10]. In [52] wird angedeutet, dass dieser Fehlermechanismus zufällig auftritt und stark von den klimatischen Umgebungsbedingungen abhängt. Diesbezüglich kommt der relativen Luftfeuchtigkeit eine höhere Bedeutung als der Temperatur zu [176]. Bei Abständen größer 0,2 mm kann der Reinheit einer Baugruppe eine größere Bedeutung zugeordnet werden als der effektiven Feldstärke [32][33][148].

SIR-Test zur Detektion elektrochemischer Migration

Um Technologien, Materialien oder Prozesse zu bewerten oder zu qualifizieren, wird vorwiegend eine Überwachung des Oberflächenisolationswiderstandes (**Surface Insulation Resistance- SIR**) bei den Feuchteprüfungen eingesetzt. Dies ist die Eigenschaft eines Materials und eines Elektrodensystems, welche den elektrischen Widerstand zwischen zwei Leiterbahnen, die durch ein Dielektrikum getrennt sind, beschreibt. Zwar ist der SIR-Test primär auf die Erfassung des Oberflächenisolationswiderstandes ausgelegt, es werden aber auch Leckströme durch verschiedene Dielektrika oder durch die Luft erfasst. Hierzu existiert eine Reihe von standardisierten Testmustern, welche überwiegend aus ineinandergreifenden Kammstrukturen mit unterschiedlichen Leiterbahnabständen aus Kupfer bestehen. Das Substratmaterial ist in den meisten Fällen aus Standard-FR4, kann aber je nach Untersuchungsgegenstand variieren. Entsprechend dem SIR-Handbuch der IPC (Association Connecting Electronic Industries) sollten hierbei Kammabstände von 200 μm mit Leiterbahndicken von 400 μm und Testspannungen von 5 V verwendet werden. Durch Verwendung von hochohmigen Vorwiderständen ($10^6 \Omega$) vor jeder Kammstruktur wird eine thermische Überhitzung potenzieller Dendriten und damit deren Zerstörung vermieden. Die Messintervalle werden mit 20 min angegeben, wobei die minimale Testdauer 72 h betragen sollte. Als Testbedingungen werden statische Temperatur-Feuchte-Prüfungen mit 40 °C / 93 % für bleifreie und 85 °C / 85 % für bleihaltige Prüflinge vorgeschlagen. Je nach Qualifikationsgegenstand variieren sowohl die Testmuster, die zu verwendenden Prüfverfahren, die anzulegenden Versorgungsspannung als auch das Bewertungskriterium, welches zwischen $1,2 \cdot 10^5 \Omega$ und $10^{10} \Omega$ liegen kann. Neben der elektrischen Überwachung wird eine optische Inspektion der Teststrukturen hinsichtlich gewachsener Dendriten empfohlen. Weiterhin wird aber auf den Bedarf an neuen Testmustern hingewiesen, um Materialien und Prozesse zu bewerten und zu qualifizieren [153][119].

3.2.4 Conductive Anodic Filaments

Mitte der 1970er Jahre wurde im Zusammenhang mit der steigenden Packungsdichte und den immer härter auf die Elektronik einwirkenden Umgebungsbedingungen in den Bell Laboratorien ein völlig neuer Fehlermechanismus entdeckt [118]. Dieser zeigt sich in einem abrupten Abfall des Isolationswiderstandes zwischen benachbarten Leitern unterschiedlichen Potentials und resultiert aus einem leitenden Film von der Anode zur Kathode unterhalb der Leiterplattenoberfläche. Dieses leitfähige Konstrukt, genannt Conductive Anodic Filament (CAF), ist das Resultat eines elektrochemischen Korrosionsprozesses, der an der Anode beginnt, und entlang der Glasfasern im Substrat in Richtung der Kathode wächst [129]. Diese Strukturen sind sehr dünn und können selbst bei Strömen von nur wenigen Mikroampere zerstört werden [118]. Wie Bild 17 zeigt, stehen CAF bei

heutigen Leiterplatten, die sich durch reduzierte Leiterbahnabstände, Durchkontaktierungen (Vias) über unterschiedliche Leiterplattenebenen und kleine Vias-Durchmesser auszeichnen, mehrere Wege zur Verfügung, um leitende Pfade zwischen den Elektroden zu bilden. Hierbei kann der dargestellte Effekt auch in Zwischenlagen von mehrlagigen Leiterplatten auftreten [77].

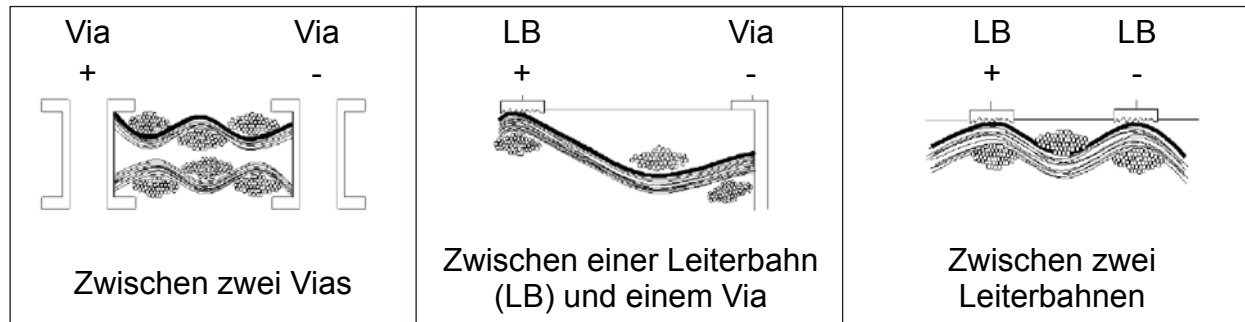
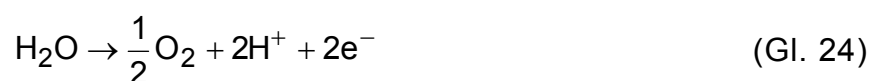


Bild 17: Konfigurationsmöglichkeiten für CAF [143]

Im Gegensatz zu Dendriten bei der ECM, bei der Metallionen in Lösung gehen und auf der Substratoberfläche von der Kathode zur Anode wandern, wachsen CAF von der Anode aus und bestehen nicht aus Metall, sondern aus Kupfersalzen. Aufgrund des hohen pH-Wertes an der Kathode lagert sich das Kupfer dort nicht in reiner Form ab, sondern primär als ein unlösliches Salz. Ein zusätzlicher Unterschied zwischen ECM und CAF besteht darin, dass ECM auf der Leiterplattenoberfläche stattfindet, wohingegen CAF unter der Oberfläche stattfindet [165]. Grundlegende Voraussetzungen für diesen Ausfallmechanismus sind die Anwesenheit von Kupfer, elektrischer Spannung und Glasfasern, wobei die Adsorption von Wasser und anschließende Diffusion des Wassers in das Laminat die Prozesse auslöst. Bei Anwesenheit einer wässrigen Lösung kann sich ein Elektrolyt bilden und einen stromleitenden Pfad bereitstellen, der bei vorhandener Potentialdifferenz elektrochemische Prozesse initiieren kann. Hierbei kommt es zur Oxidation und Auflösung von Kupfer an der Anode und anschließender Migration der Kupferionen zur Kathode, wo diese wieder zu Kupfer reduziert werden. In den Gleichungen 23 bis 29 sind die idealisierten Reaktionsgleichungen dargestellt [77][142][166].

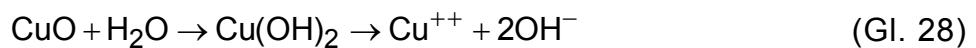
Kupferauflösung und Hydroniumionenbildung an der Anode:



Elektrolyse von Wasser und Hydroxidionenbildung an der Kathode:



Leitender Pfad entlang der Glasfasern in Richtung der Kathode:



Die Pfade, welche für CAF nötig sind, bilden sich durch Grenzflächendelamination zwischen den einzelnen Fasern und der organischen Harzmatrix. Als Ursache werden unzureichende Bohrprozesse und thermische Wechselbeanspruchungen vermutet. Neuere Untersuchungen haben gezeigt, dass CAF auch unter Anwesenheit von Hohlfasern, also im Inneren einer Faser, auftreten kann. Wesentliche Einflussfaktoren sind sowohl Leiterplatteeigenschaften wie Harzmaterial, Lötstopplack und Leiterarchitektur als auch Betriebsbedingungen wie Spannungspegel, Temperaturen und Luftfeuchtigkeit [143]. Laut Pecht wird CAF im Kundenumfeld so gut wie nie erkannt, da der leitende Pfad bei einem elektrischen Kurzschluss thermisch stark überhitzt und dadurch vaporisiert [129].

3.2.5 Schwefelinduzierte Kriechkorrosion

Mit der Einführung der Richtlinie zur Beseitigung schädlicher Substanzen in elektronischen Baugruppen (RoHS- **R**estriction **o**f **H**azardous **S**ubstances) im Jahre 2006 sind neue Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprobleme aufgetreten. Diese sind zurückzuführen auf einen Wechsel in den Lotlegierungen, den Löttemperaturen, den Flussmitteln und den Oberflächenpassivierungen. In diesem Zusammenhang tauchte der Fehlermechanismus der schwefelinduzierten Kriechkorrosion auf. Bei diesem Fehlermechanismus bilden sich in schwefelhaltiger Industrieumgebung Korrosionsprodukte, vorwiegend Kupfersulfid (Cu_2S) oder Silbersulfid (Ag_2S), welche anschließend entlang einer nichtkorrodierenden Oberfläche in alle Richtungen kriechen. Diese nichtkorrodierenden Oberflächen können entweder ein edleres Metall oder ein Dielektrikum sein [153]. Das dendritenartige Wachstum ist nicht zu verwechseln mit dem Effekt der ECM, welche feldstärkegetrieben ist [130]. Wesentliche Einflussgrößen für den Korrosions- und Kriechprozess sind die Luftfeuchtigkeit, die Temperatur, die Galvani-Spannung, Schichtdicken und die Konzentration von Verunreinigungen. Hohe Luftfeuchtigkeit

in Verbindung mit Schadgasen wie Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, Chlor oder Stickstoffdioxid beschleunigt den Mechanismus. Um den Kriechvorgang auszulösen, wird eine Mindestkonzentration an Chlor (Cl) und Hydrogensulfid (H₂S) benötigt, wobei die effektive Kriechdistanz von der Chlorkonzentration abhängt [19][51][158]. Als mögliche physikalisch-chemische Ursache für das Kriechen der Korrosionsprodukte wird einerseits die Diffusionstheorie, also ein Kriechen aufgrund von Konzentrationsgradienten, und andererseits die Theorie der galvanisch getriebenen Korrosion vermutet [52]. Marurkiewicz führt den Effekt der Kriechkorrosion auf einen galvanisch getriebenen Mechanismus zurück und beschreibt in seiner Arbeit die elektrochemischen Vorgänge für die Bildung von Kupfersulfid unter einer Silberoberfläche wie folgt:



Silber fungiert hierbei als edleres Metall, wobei das Elektrodenpotential von Kupfer 0,8 V und das von Silber 0,34 V beträgt [73]. Überbrückt das Korrosionsprodukt den Isolationsabstand zwischen benachbarten Anschlüssen, so kann es aufgrund der Leitfähigkeit des Korrosionsproduktes zu einem Widerstandsabfall von mehreren Megaohm kommen [40]. Bild 18 zeigt exemplarisch das Erscheinungsbild der Kriechkorrosion an Kupferleiterbahnen und Durchkontaktierungen mit chemisch versilberter Oberflächenpassivierung (ImAg) [153][175].

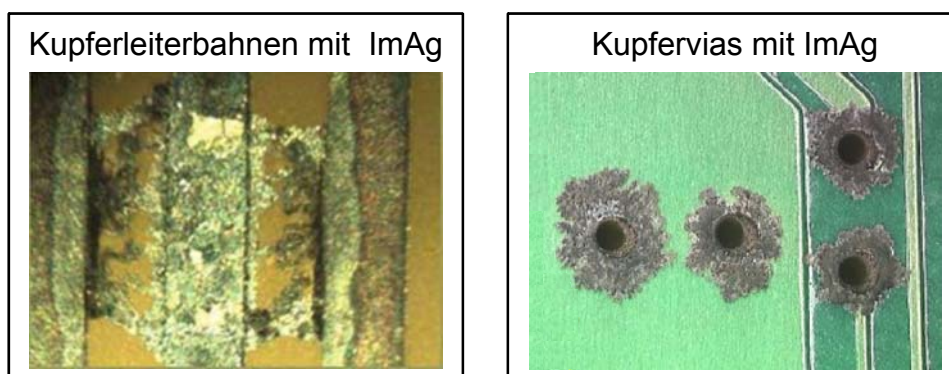


Bild 18: Kriechkorrosion auf Kupferleiterbahnen mit chemisch versilberter Oberfläche

Um den beschriebenen Mechanismus der Kriechkorrosion beschleunigt zu simulieren, werden im Rahmen der Umwelterprobung Mischgasprüfungen durchgeführt. Hierbei werden Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Konzentration der schädlichen Gase, Volumenaustausch und Strömungsgeschwindigkeit geregelt. Derzeitige Testbeschreibungen sind in den Normen DIN EN 60068-2-60 (Test Ke), ASTM B845 und Bellcore GR-63-CORE zu finden [158][40].

4 Optimierte Auslegung von Prüfstrategien für den Effekt der Feuchteadsorption

Gilt es, nach erfolgreich abgeschlossener Entwicklung einer Komponente oder eines Systems, die Zuverlässigkeit unter Einsatzbedingungen abzusichern, so werden neben einem durchgängigen Systemverständnis zudem Kenntnisse über die am Einsatzort vorherrschenden Belastungen sowie dadurch mögliche Fehlermechanismen benötigt. Dies stellt eine wesentliche Grundvoraussetzung dar, um Prüfstrategien individuell an einzelne Systeme anzupassen und potenzielle Produktschwachstellen frühzeitig zu identifizieren. Gerade für den Effekt der Feuchteadsorption, welche mit zunehmender Funktionsintegration und damit einhergehender Miniaturisierung von Leiterbahn- und Kontaktabständen an Bedeutung gewinnt, werden systematische Vorgehensweisen benötigt, die eine produkt- und einsatzortspezifische Robustheitsabsicherung ermöglichen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der Arbeit methodische Ansätze entwickelt, welche eine ganzheitliche Zuverlässigkeitsabsicherung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betauung und hoher Luftfeuchtigkeit gewährleisten. Diese reichen von der Prüfkonzeptgestaltung über die Prüfdurchführung bis hin zu deren Bewertung.

4.1 Prüfkonzeptermittlung und -auslegung

Ausgehend von den bereits vorgestellten Methoden von Robustness Validation und Robust Design-Entwicklung & -Verifikation wird im Folgenden ein Konzept vorgestellt, welches eine produktorientierte und auf der Fehlerphysik einzelner Systembestandteile basierende Herangehensweise bei der Auslegung von Erprobungs- und Qualifikationsstrategien elektronischer Systeme ermöglicht. Gerade bei neuen oder funktional erweiterten sowie konzeptionell oder technologisch veränderten Produkten, für die keine Erfahrungen aus Vorgängerprojekten vorliegen, ist eine ganzheitliche und systematische Zuverlässigkeitsabsicherung erforderlich. Die erarbeiteten Einzelschritte des Konzeptes werden im Folgenden näher erläutert.

Systemanalyse

Im ersten Schritt erfolgt eine detaillierte Systemanalyse. Von Fachleuten der Entwicklungsbereiche Software, Elektronik, Mechanik sowie gegebenenfalls der Produktion gilt es, das System als Ganzes aber auch die spezifischen Teilsysteme zu analysieren. Zentrales Ziel muss die Identifikation zuverlässigkeitsrelevanter Schlüsselmodule und deren Schnittstellen sowie interdisziplinärer Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Domänen sein. Dies kann nur durch eine intensive Kommunikation zwischen den beteiligten Bereichen

gewährleistet werden. Erforderliche Parameter können hierbei mechanische und elektronische Toleranzen, thermische Eigenschaften aber auch Gehäuse- und Steckerdichtigkeit sowie mechanische Verrastungen und Befestigungen sein. Gerade bei dem Einsatz innovativer Technologien in der Elektronikproduktion, wie Ball-Grid-Array- (BGA) Bauelementen oder Folienleitern, gilt es, die entsprechende Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) bei diesen Systemen zu berücksichtigen und zu bewerten. Eine Möglichkeit für eine ausführliche Systemanalyse in den frühen Entwicklungsphasen bieten Design-Reviews, bei denen die angesprochenen Aspekte expertenbasiert und übergreifend diskutiert werden. Entsprechend industriell etablierter Verfahren und Methoden, wie beispielsweise verschiedenen FMEA-Arten, lassen sich anhand von Risikoprioritätszahlen (RPZ) kritische Systembestandteile aufdecken. Die Ausfallursache und der verantwortliche Fehlermechanismus spielen bei der Risikoabschätzung keine Rolle, da diese aus Kundensicht keine Relevanz haben. Das erläuterte Vorgehen bei der Systemanalyse wird schematisch in Bild 19 gezeigt.



Bild 19: Vorgehen zur Identifikation kritischer Systembestandteile am Beispiel eines komplexen mechatronischen Systems

Fehlerspezifische Betrachtung der Teilsysteme

Einen wesentlichen Prozessschritt dieses Konzeptes stellt die anschließende fehlerspezifische Betrachtung der eruierten kritischen Systembestandteile dar. Basierend auf Erfahrungen aus Vorgängerprojekten (Lessons Learned-Dokumentation), Fehlerdatenbanken sowie individuellem Expertenwissen oder spezifischer Fachliteratur gilt es, einzelne Fehlermechanismen und deren induzierenden Belastungen sowie daraus folgende Fehlerauswirkungen auf das System zu ermitteln. Exemplarisch können hier Belastungsbrüche durch Vibration oder mechanischen Schock, Bauteilversagen aufgrund einer falschen Kühlkonzept- oder Schaltplanauslegung sowie Feuchte- und Wassereintrag ins Schutzgehäuse durch Dichtigkeitsdefizite aufgeführt werden. Eine systematische Ausarbeitung der durch die verschiedenen Fehlermechanismen ausgelösten

Fehlerauswirkungen auf System- und Fahrzeugebene ermöglicht eine Priorisierung und Gewichtung der verschiedenen Fehler. Auswirkungen können dabei von nicht erkennbaren Effekten über funktionale Einschränkungen bis hin zu einem Systemversagen reichen. Eine mögliche Visualisierung der komplexen Zusammenhänge und der vielfältigen Wechselwirkungen kann die Ausarbeitung eines Fehlerbaumes liefern. Anknüpfend an das in der Systemanalyse aufgeführte mechatronische System zeigt Bild 20 am Beispiel des Teilsystems *Folienleiter* eine mögliche Darstellungsart der Zusammenhänge. Am Beispiel einer Betauungsbelastung werden die dadurch ausgelösten Fehlermechanismen und deren Fehlerfolgen sowie die Fehlerauswirkungen auf Systemebene aufgeführt.

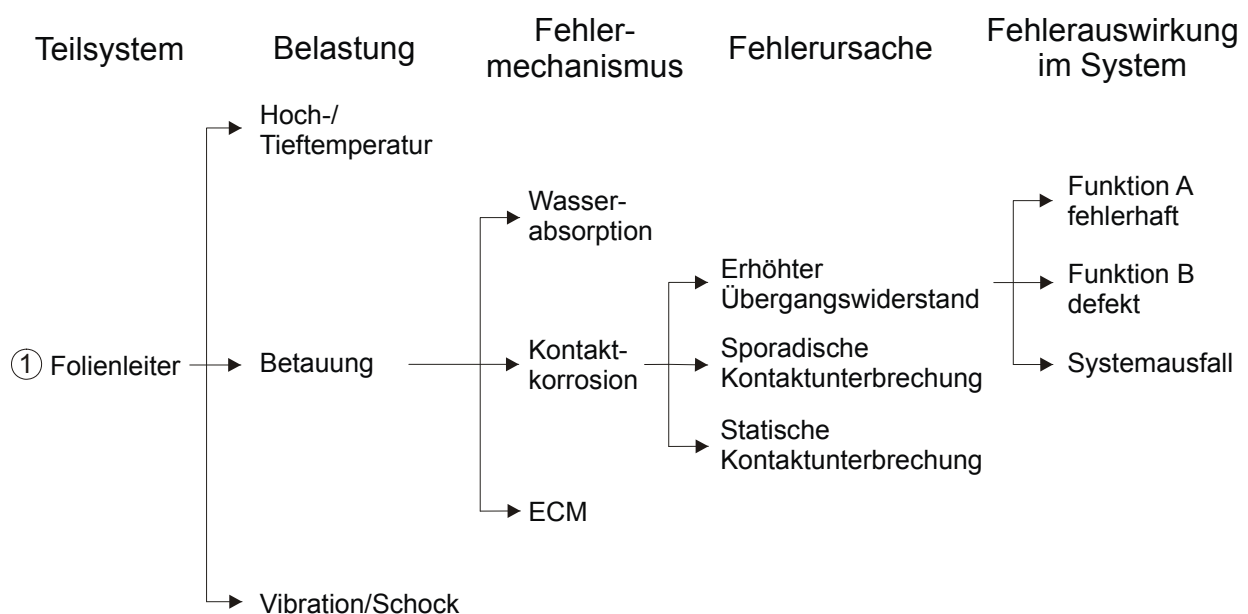


Bild 20: Darstellung belastungsspezifischer Wirkzusammenhänge am Beispiel eines Folienleiters

Neben den Fehlermechanismen und den dafür verantwortlichen Belastungsarten gilt es zudem die fehlerspezifischen Einflussparameter aus dem Design und dem Prozess zu dokumentieren. Dies ist dahingehend von Bedeutung, als dass bei potenziellen Auffälligkeiten in den Erprobungen Stellgrößen bekannt sind, um die Fehler zielgerichtet zu beseitigen.

Festlegen der Systemanforderungen

Im Anschluss an die Ermittlung möglicher Fehlermechanismen gilt es, die Systemanforderungen festzulegen. Dieser Schritt korreliert mit der Ermittlung eines Mission Profiles bei der Robustness Validation Methodik. In diesem Zusammenhang steht die ganzheitliche Betrachtung aller auf ein System einwirkender Belastungen im Vordergrund. Dazu zählen neben den spezifischen Betriebszuständen/-dauern und Nutzungsarten/-häufigkeiten auch verschiedene äußere Belastungsarten wie Minimal-/Maximaltemperaturen oder Vibration sowie Extremszenarien durch ein individuelles Kundenverhalten. Bei den letztgenannten Szenarien können bei Automobilanwendungen das Überfahren einer tiefen Bodenunebenheit oder ein offenes Fahrzeugverdeck bei plötzlich einsetzendem Regen aufgeführt werden. Auch globale Einsatzorte und deren spezifischen Anforderungen wie Kundenverhalten, Klima und Straßenzustände sind zu berücksichtigen. Sofern die Erkenntnisse über mechanische, klimatische, chemische und elektrische Belastungen auf das System und entsprechende Nutzungsarten/-häufigkeiten nicht vorliegen, sind diese anhand gezielter und klar definierter Messreihen zu erarbeiten beziehungsweise statistisch abzuleiten. Die quantitativ erfassten Umweltparameter sind mit den unterschiedlichen Betriebszuständen und Nutzungshäufigkeiten in der Art zu kombinieren, dass ausfallrelevante Belastungskollektive entstehen. Exemplarisch könnte hier die Anzahl verschiedener Betriebszustände eines Systems bei unterschiedlichen Temperaturniveaus genannt werden. Da gerade die Überlagerung verschiedener Belastungsarten für eine Reihe von Fehlermechanismen verantwortlich ist oder diese extrem beschleunigt, sind diese bei der Anforderungsdefinition in ähnlicher Art und Weise zu berücksichtigen. Somit kann sich ein multidimensionales Netz an Belastungsanforderungen ergeben, welches je nach Einbauort und Systemspezifikation in den Schärfegraden der einzelnen Belastungen variiert. Um dies zu verdeutlichen, sind in Bild 21 schematisch die wesentlichen Belastungsgrößen und exemplarische Wechselbeziehungen am Beispiel von elektrischen und klimatischen Belastungen sowie von mechanischen Belastungen in Kombination mit unterschiedlichen Betriebsarten dargestellt.

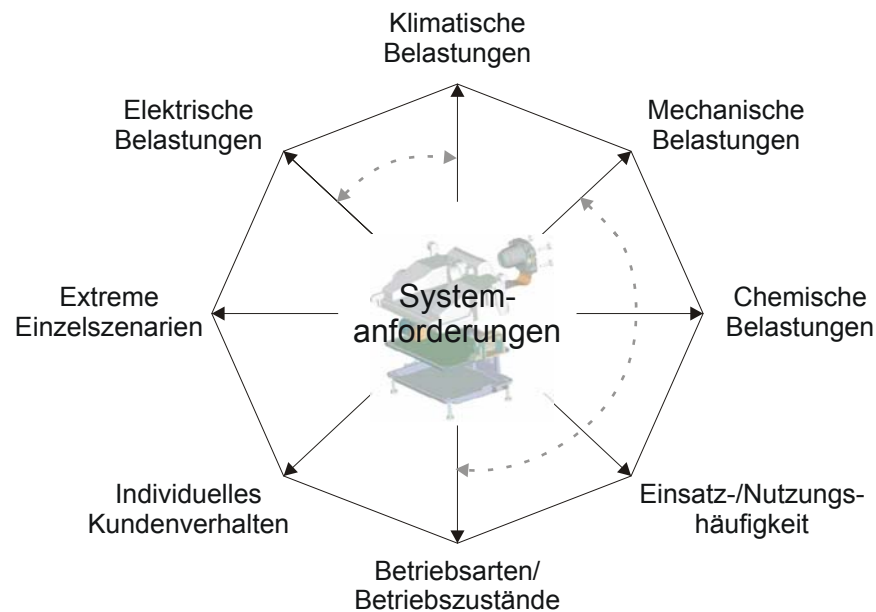


Bild 21: Potenzielle Belastungen und exemplarische Wechselbeziehungen bei elektronischen Systemen im Automobil

Bestimmung relevanter Belastungen/Belastungskollektive

Die aus dem letzten Prozessschritt gewonnenen Erkenntnisse über auftretende Beanspruchungen, deren Verteilung und Überlagerung müssen mit dem Wissen über relevante Fehlermechanismen und den entsprechenden Spezifikationen hinsichtlich der geforderten Lebensdauer kombiniert werden, um daraus zuverlässigkeitskritische Belastungen oder Belastungskollektive abzuleiten. Hierbei sind vor allem die Anforderungen zu betrachten, welche die aus dem zweiten Schritt identifizierten Fehlermechanismen auslösen können. Als Eingangsgrößen bei diesem Prozessschritt dienen die Lebensduranforderungen an das System, die Erkenntnisse über die fehlerinduzierenden Belastungen, die aus Messungen ermittelten kritischen Beanspruchungen sowie die einsatzland- und kundenabhängigen Einzelanforderungen. Obwohl Parallelen zwischen den letzten beiden Prozessschritten vorzufinden sind, fokussiert dieser Abschnitt die detaillierte Definition derjenigen Belastungsparameter, die aus fehlerphysikalischer Sicht die eingangs identifizierten Fehlermechanismen auslösen.

Definition der Testanforderungen

Im letzten Schritt werden diese Ergebnisse verwendet, um in Verbindung mit bestehenden oder neuen Testverfahren, den relevanten Fehlermechanismen und deren mathematischen Beschleunigungsmodellen die Testanforderungen an ein System zu bestimmen. Um Belastungsparameter im Test nicht zu hoch anzusetzen, empfiehlt es sich, die Testschärfegrade auf etwa 6σ der potenziellen Anforderungsverteilung im Kundeneinsatz auszulegen. Besonderes Augenmerk ist darauf zu richten, dass bestehende oder neue Prüfverfahren so gewählt werden, dass diese gezielt und zeitoptimiert potenzielle Fehlermechanismen auslösen und zudem eine mathematisch oder grafisch beschreibbare Beschleunigung zu den reellen Bedingungen am Verbauort darstellen. Aus der fehlerphysikorientierten Sichtweise können dabei sequentielle oder parallele Prüfabläufe, sowie standardisierte oder individuelle Teststrategien angewendet werden. Sind Testverfahren, Schärfegrade und Testdauern definiert, so sind ausgehend von den bereits eruierten Fehlerauswirkungen geeignete Bewertungsparameter zu definieren, welche auch während der Tests kontinuierlich überwacht werden müssen. Eine Analyse der während der Prüfungen aufgezeichneten Daten in Verbindung mit analytischen Untersuchungen nach Prüfende ermöglicht eine schnelle und zielgerichtete Aussage über aufgetretene Fehlermechanismen, deren Fehlerursache sowie möglichen Einflussparametern. Der jeweilige Entwicklungsstand des Prüflings ist zu berücksichtigen, da aufgetretene Fehler möglicherweise durch angepasste Prozesse oder geplante Designänderungen bereits eliminiert sind. Werden neue oder bisher unbekannte Fehlermechanismen im Rahmen der Erprobung entdeckt, so sind diese in geeigneter Art und Weise zu dokumentieren. Somit wird eine Nachhaltigkeit für weitere Projekte sichergestellt. Sowohl die als kritisch antizipierten Systembestandteile als auch die als kritisch erachteten Fehlermechanismen sind nach Testende bei der Fehleranalyse und der Fehlerbewertung zu verifizieren. Bild 22 zeigt zusammenfassend den konzipierten Prozessablauf und die jeweiligen Eingangs- und Ausgangsgrößen.

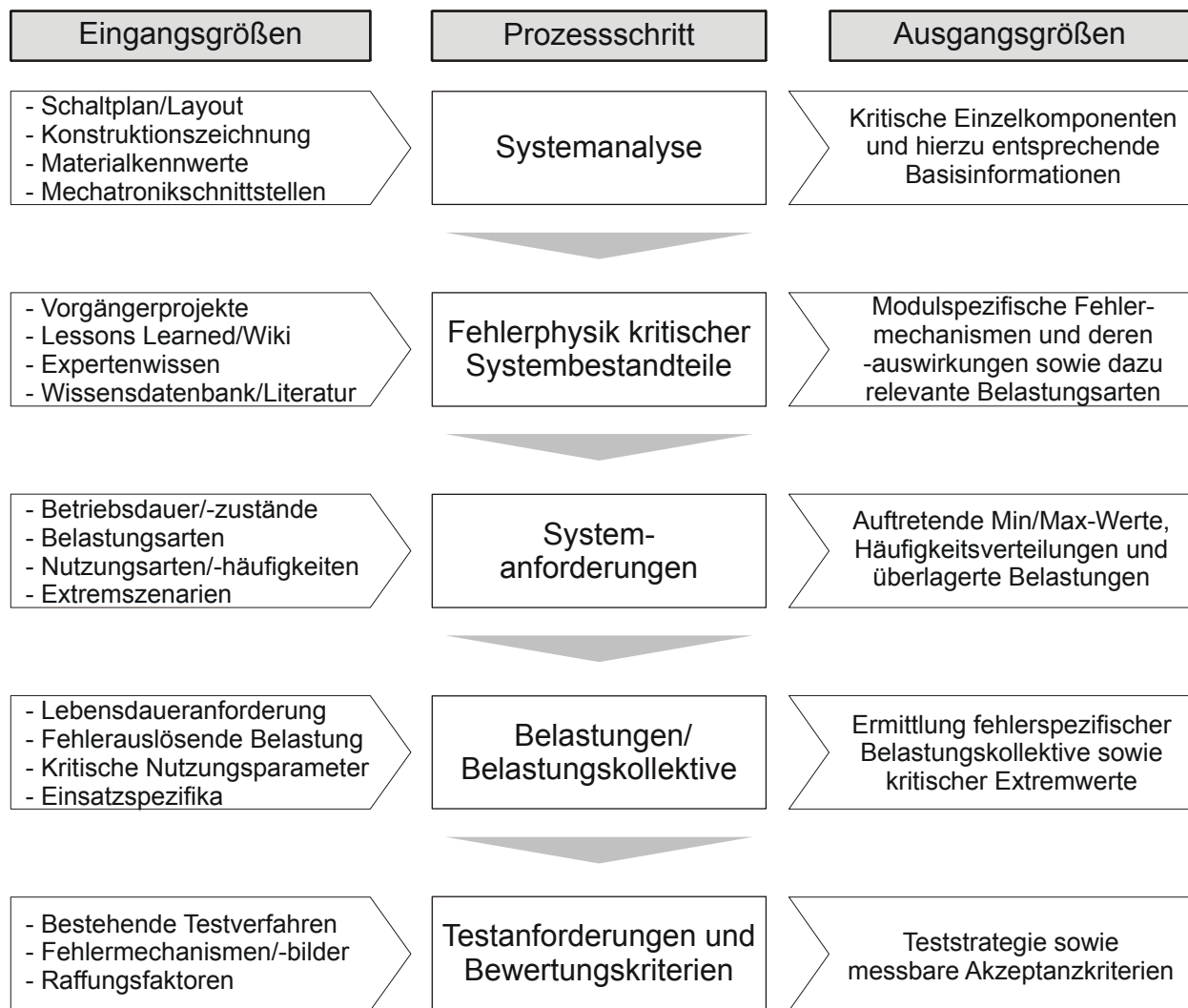


Bild 22: Vorgehensmodell zur Ermittlung und Bewertung systemspezifischer Prüfstrategien

Dieses Vorgehen kann unabhängig davon, ob es sich um eine Design-, Produkt- oder Prozessvalidierung handelt, angewendet werden. Einzig die Schärfegrade und die Zeitdauern (Zyklenanzahl) sowie die Art der Bewertung sind an die verschiedenen Validierungsphasen anzupassen.

4.2 Feuchte- und betauungsspezifische Prüfverfahren

Betrachtet man die Vielzahl an möglichen Prüfverfahren, die zur Absicherung elektronischer Komponenten und Systeme gegen die Einwirkung von hoher Luftfeuchtigkeit und Betauung zur Verfügung stehen, so stellt sich die Frage nach der Einsetzbarkeit beziehungsweise der Anwendung der einzelnen Testverfahren. Die Tabelle 3 zeigt einige der industriell eingesetzten Prüfstandards zur Absicherung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung statischer und zyklischer Temperatur-Feuchte-Belastungen sowie die dabei verwendeten

Prüfparameter. Diese werden sowohl zur Qualifizierung einzelner Materialien oder Prozesse gegen spezifische Fehlermechanismen als auch zur Produktqualifizierung herangezogen.

Standard	Temperatur/Luftfeuchtigkeit	Testdauer/Testzyklen
IEC 61189-5	1) 40 °C/93 %	> 72 h
	2) 85 °C/85 %	> 72 h
ISO 9455-17	85 °C/85 %	168 h
J-STD-001C	85 °C/85 %	168 h
Bellcore 2.6.3.3	35 °C/85 %	120 h
DIN EN 60068-2-78	1) 30 °C/93 % 2) 30 °C/85 % 3) 40 °C/93 % 4) 40 °C/85 %	12 h, 16 h, 1 d, 2 d, 6 d, 12 d, 21 d, 56 d
DIN EN 60068-2-30	1) 25 °C→40 °C in 3 h, 9 h bei 40 °C, 40 °C→25 °C in 3 h, 9 h bei 25 °C; 93 %	2,6,12,21,56 Zyklen
	2) 25 °C→55 °C in 3 h, 9 h bei 55 °C, 55 °C→25 °C in 3 h, 9 h bei 25 °C; 93 %	1,2,6 Zyklen

Tabelle 3: Prüfstandards und deren Prüfparameter für statische und zyklische Temperatur-Feuchte-Prüfungen

Durch die große Anzahl an Prüfstandards, welche sich im Wesentlichen in den minimalen und maximalen Temperaturen, der relativen Luftfeuchtigkeit und den Testdauern unterscheiden, kann der Rückschluss gezogen werden, dass kein eindeutiges Bild von der Anwendung und der Eignung der jeweiligen Prüfungen vorliegt. Grundsätzlich kann zwischen statischen und zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen differenziert werden. Hierbei dienen die statischen Prüfverfahren dazu, die Einwirkung hoher Luftfeuchtigkeit bei einer konstanten Temperatur zu untersuchen, ohne dass dabei eine Betauung auftritt. Da Wasserdampfmoleküle einen kleineren Durchmesser als Wassermoleküle besitzen, werden diese Prüfverfahren eingesetzt um Diffusionseffekte, insbesondere bei kunststoffgekapselten Bauelementen, zu beschleunigen [29]. Im Gegensatz dazu dienen zyklische Temperatur-Feuchte-Prüfungen dazu, elektronische Erzeugnisse hinsichtlich ihrer Eignung für Betrieb, Transport und Lagerung bei hoher Luftfeuchtigkeit in Verbindung mit zyklischen Temperaturänderungen zu bewerten. Hierbei kommt es im Allgemeinen zu einer Feuchteadsorption an der Oberfläche des Prüflings. Anhand von Bild 23 werden einige Fehlermechanismen auf Leiterplattenebene aufgeführt, wie diese durch statische und zyklische Prüfverfahren induziert werden. Die in der Abbildung schematisch dargestellten Prüfprofile sind der Normenreihe DIN EN 60068-2 entnommen und enthalten nicht die zulässigen Toleranzen für Temperatur und Luftfeuchtigkeit [108][112][168].

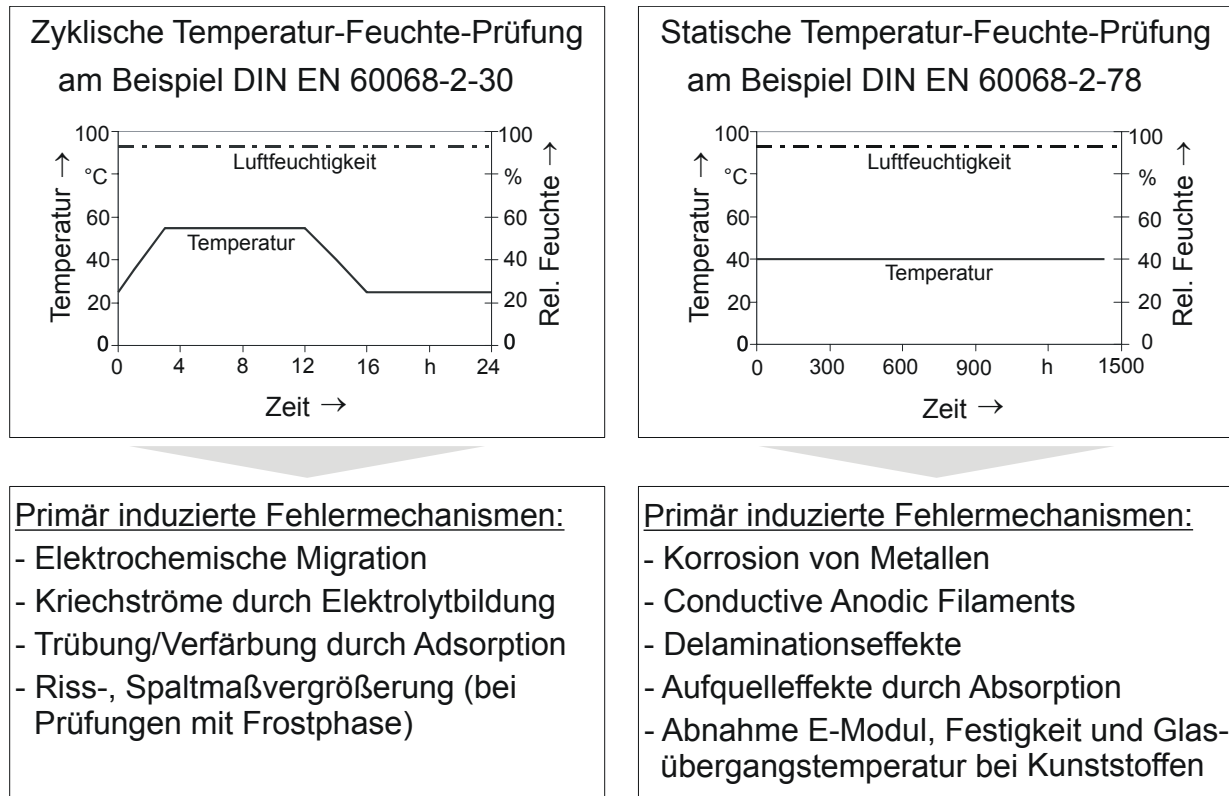


Bild 23: Primär induzierte Fehlermechanismen auf elektronischen Baugruppen bei statischen und zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen

Prinzipiell gilt es, sowohl bei den statischen als auch bei den zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen zur Qualifizierung bleifreier Baugruppen eine Vorkonditionierung bei höheren Temperaturen zu vermeiden. Grund hierfür ist, dass sich Flussmittel, welche sich nach dem Löten noch auf der Baugruppe befinden können, ab Temperaturen von etwa 40 °C verflüchtigen [120]. Wie und für wie lange eine Komponente oder ein System getestet werden muss, ist anhand der Einsatz- und Betriebsbedingungen, der geforderten Lebensdauer und den relevanten Fehlermechanismen des Systems zu ermitteln.

4.3 Statistisch optimierte Bewertung von Umweltprüfungen

Die aktuelle Herangehensweise bei der Qualifizierung elektronischer Systeme für automobiler Anwendungen ist geprägt durch die Verwendung einer definierten Anzahl an Prüflingen und einer fest vorgegebenen Belastungsschärfe für eine bestimmte Zeitdauer. Häufig treten bei den Prüfungen zwischen ein und drei Ausfälle bei sechs Testgeräten auf, wodurch eine Aussage über die Zuverlässigkeit nur begrenzt möglich ist.

Gilt es die Zuverlässigkeit komplexer elektronischer Komponenten und Systeme zu bewerten, so bietet die Anwendung statistischer Verfahren und Methoden eine nützliche Hilfestellung. Dabei stehen zur mathematischen Beschreibung des

Ausfallverhaltens von Produkten unterschiedliche statistische Verteilungsfunktionen zur Verfügung. Neben einer Reihe von Verteilungsfunktionen, wie der Normalverteilung, der Binomialverteilung oder der Exponentialverteilung, eignet sich für elektronische Baugruppen vor allem die Weibullverteilung. Diese erlaubt eine Beschreibung von unterschiedlichen Ausfallverhalten und bietet damit die Möglichkeit, alle drei Bereiche der sogenannten Badewannenkurve, welche das Ausfallverhalten technischer Produkte bezogen auf die gesamte Produktlebensdauer charakterisiert, abzubilden.

Die Weibullverteilung liegt in Form einer zweiparametrischen und einer dreiparametrischen Verteilungsfunktion vor. Neben dem Formparameter b und der charakteristischen Lebensdauer T besitzt die dreiparametrische Verteilung im Gegensatz zur zweiparametrischen Verteilung zusätzlich den Parameter t_0 , welcher die ausfallfreie Zeit definiert. Der Formparameter b gilt als ein Maß für die Streuung der Ausfallzeiten und bestimmt die Form der Verteilungsfunktion. Durch Variation von b ist es möglich, die Verteilungsfunktion anderen Verteilungen anzunähern. Für $b \in [0,5;1[$ wird näherungsweise die Exponentialverteilung dargestellt, für $b=2$ die logarithmische Normalverteilung und für $b \in [3,2;3,6]$ die Normalverteilung. Mittels der charakteristischen Lebensdauer T wird die Lage der Verteilungsfunktion bezüglich der Zeitachse definiert. Eine Ausfallwahrscheinlichkeit von 63,2 % ($b=1$, $t=T$) wird als charakteristische Lebensdauer bezeichnet. Der Wert von 63,2 % für die charakteristische Lebensdauer wird als Mittelwert der Verteilung verstanden. Die Ausfallzeiten eines technischen Produktes verzögern sich zeitlich, wenn sich die charakteristische Lebensdauer vergrößert [23][173]. Im Folgenden werden die mathematischen Eigenschaften der Weibullverteilung näher erläutert.

Die Ausfallverteilung $F(t)$ in Abhängigkeit von der statistischen Variablen t lautet in der zweiparametrischen Form

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{T}\right)^b}, \quad t, T, b > 0. \quad (\text{Gl. 32})$$

In der dreiparametrischen Form ist die Ausfallverteilung $F(t)$ gegeben durch

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}, \quad t, t_0, T, b > 0. \quad (\text{Gl. 33})$$

Die Zuverlässigkeit oder Überlebenswahrscheinlichkeit $R(t)$ ist das Komplement der Ausfallwahrscheinlichkeit und ergibt sich in der dreiparametrischen Form mit

$$R(t) = 1 - F(t) = e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b}. \quad (\text{Gl. 34})$$

Aus der Ableitung der Ausfallwahrscheinlichkeit ergibt sich nach der Gleichung 35 die Dichtefunktion der Weibullverteilung.

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^b} \quad (\text{Gl. 35})$$

Aus dem Quotienten der Dichtefunktion $f(t)$ und der Zuverlässigkeit $R(t)$ resultiert nach der Gleichung 36 die Ausfallrate $\lambda(t)$.

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \frac{b}{T-t_0} \cdot \left(\frac{t-t_0}{T-t_0}\right)^{b-1} \quad (\text{Gl. 36})$$

In Bild 24 werden anhand weibullverteilter Zufallsausfallzeitpunkte mit einer charakteristischen Lebensdauer von $T=10$ Stunden und einem Formparameter $b=2$ die genannten Funktionen und Zusammenhänge dargestellt.

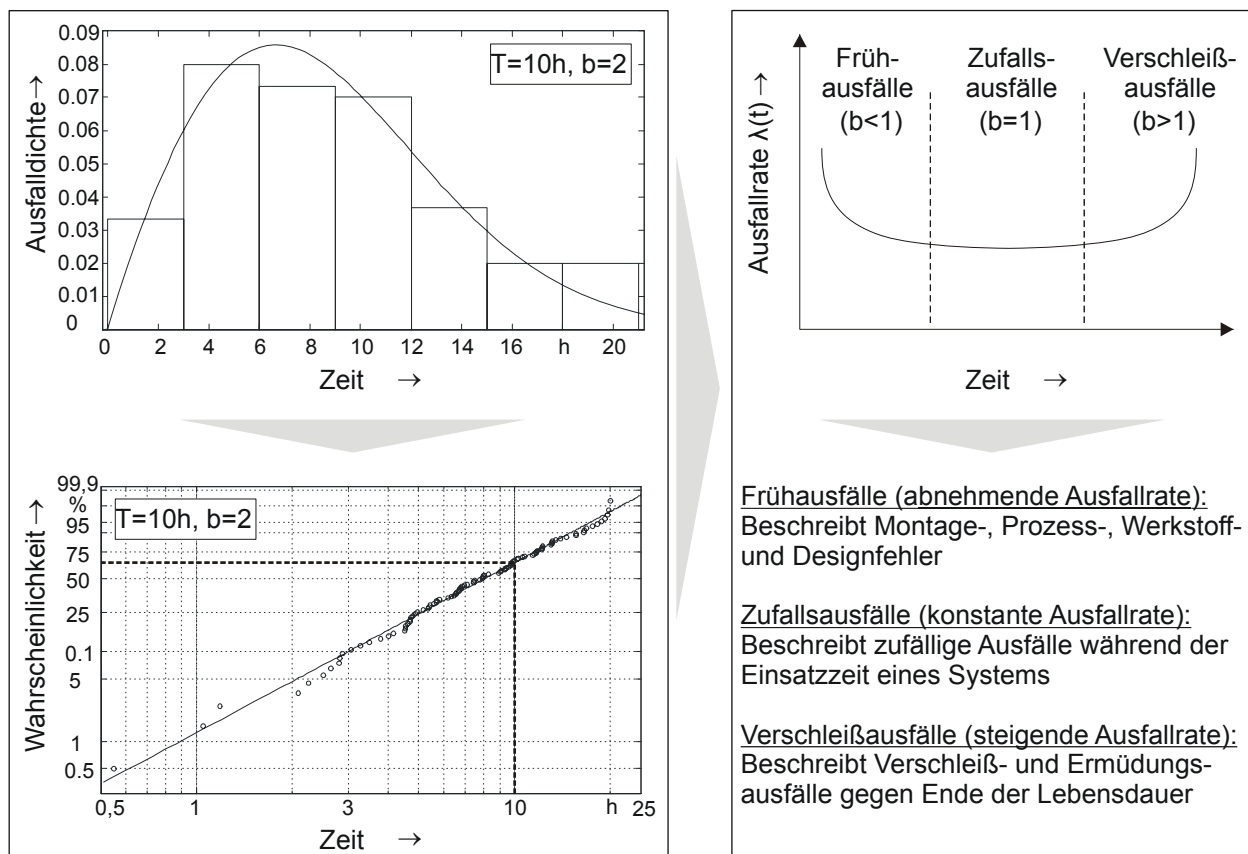


Bild 24: Zusammenhang zwischen Dichtefunktion, Ausfallwahrscheinlichkeit und Ausfallrate (Badewannenkurve)

Zur Erstellung einer Weibullverteilung für eine Messreihe müssen der Formparameter und die charakteristische Lebensdauer ermittelt werden. Die gängigste Methode hierbei stellt das Arbeiten mit einem sogenannten Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz dar. In dieser grafischen Darstellung liegt auf der X-

Achse der Zeitbereich in einfacher logarithmischer und auf der Y-Achse die Ausfallwahrscheinlichkeit in doppelter logarithmischer Skalierung von 0 % bis 100 % oder in einer Skala von 0 bis 1 vor. In den meisten Fällen werden die Ausfallzeitpunkte der Prüflinge in Zeitdauern oder in zyklisch auftretenden Intervallen aufgetragen. Zunächst muss für jedes Intervall eine Fehlerratenabschätzung $\hat{F}(t_i)$ bestimmt werden. Diese Abschätzung ist abhängig von dem Stichprobenumfang. Bei einem Stichprobenumfang $n \leq 50$ ist die Fehlerabschätzung des Intervalls i gegeben durch

$$\hat{F}(t_i) \approx \frac{i-0,3}{n+0,4}. \quad (\text{Gl. 37})$$

Ist der Stichprobenumfang $n > 50$, so berechnet sich die Fehlerratenabschätzung mit Hilfe der Ranggröße i aus

$$\hat{F}(t_i) \approx \frac{i}{n+1}. \quad (\text{Gl. 38})$$

Die Ranggröße eines jeden Intervalls ergibt sich aus der Sortierung aller Intervalle nach ansteigender Zeitdauer oder Zyklenzahl und anschließender Zuordnung zu den Rängen $i=1,2,3,4,\dots,n$. Werden jedoch die Ausfallzeitpunkte fortlaufend bestimmt, müssen die Prüfergebnisse zunächst in Intervallen zusammengefasst werden, um anschließend für diese eine Fehlerabschätzung durchzuführen. Das Aufteilen der Gesamtprüfungsdauer in Intervalle lässt sich aus dem Stichprobenumfang n sowie dem Prüfzeitbeginn t_{\min} und dem Prüfzeitende t_{\max} berechnen. Die Klassenbreite B ergibt sich dabei aus

$$B = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{\sqrt{n}}. \quad (\text{Gl. 39})$$

Durch die Klassenbreite wird die Intervalldauer vorgegeben.

Die Bestimmung des Formparameters erfolgt durch die logarithmische Umformung der Verteilungsfunktion und ergibt sich für die zweiparametrische Verteilung aus der Gleichung 40.

$$b = \frac{\ln[-\ln(1-F(t))]}{(\ln t - \ln T)}. \quad (\text{Gl. 40})$$

Durch diese Transformation ähnelt die Verteilungsfunktion einer Geradengleichung $y=mx+c$. Die Steigung dieser Geraden entspricht im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz dem Formparameter und berechnet sich entsprechend der Gleichung 41 aus

$$b = \frac{\ln[-\ln(1-\hat{F}_2(t))]-\ln[-\ln(1-\hat{F}_1(t))]}{\ln(\ln t_2 - \ln t_1)}. \quad (\text{Gl. 41})$$

Der Formparameter bildet somit eine Gerade durch die aufgetragenen Fehlerratenabschätzungen. Nach Bestimmung des Formparameters und der charakteristischen Lebensdauer ist es möglich, sämtliche Funktionen der Weibulldarstellung, wie Ausfallwahrscheinlichkeit, Überlebenswahrscheinlichkeit, Fehlerrate und Ausfallrate, darzustellen.

Eine weitere Bestimmungsmethode der Weibullparameter, die häufig sehr viel genauere Ergebnisse liefert als die grafische Bestimmung, ist die Ermittlung der Parameter durch statistische Analyseverfahren. Die meistgenutzten Verfahren sind hierbei die lineare Regressionsanalyse und die Maximum Likelihood Methode (Verfahren der größten Wahrscheinlichkeit). Die Funktionsweise der linearen Regressionsanalyse, auch Methode der kleinsten Quadrate genannt, ist sehr ähnlich der oben gezeigten grafischen Ermittlung des Formparameters. Bei diesem Verfahren erfolgt die Bestimmung der Geradensteigung nicht aus der logarithmischen Umformung der Verteilungsfunktion, sondern es wird diejenige Gerade gesucht, deren Abstand zur Gesamtheit aller Punkte im Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetz am geringsten ist. Zur Bestimmung der Geradengüte werden entsprechend der Gleichung 42 die Abstände der Punkte zu der aufgestellten Geraden quadriert und aufsummiert. Diejenige Gerade, die hier ein Minimum der Abstände aufweist, ist nach der linearen Regressionsanalyse die bestmögliche Beschreibung des linearen Zusammenhanges von $t_i \rightarrow \hat{F}(t_i)$.

$$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2 = \min \quad (\text{Gl. 42})$$

In der Gleichung 42 stellt \hat{y}_i den Wert der Fehlerabschätzung $\hat{F}(t_i)$ innerhalb des Weibull-Wahrscheinlichkeitsnetzes zum Zeitpunkt t_i und y_i den Wert der Regressionsgeraden zum Zeitpunkt t_i dar. Die Regressionsgerade der Form $\hat{y}_i = c + bx_i$ berechnet sich aus den beiden Parametern c und b entsprechend den Gleichungen 43-44.

$$c = \bar{y} - b\bar{x}, \quad (\text{Gl. 43})$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (\text{Gl. 44})$$

Mit:

- | | | | |
|----|-------------------|-------------|--|
| i: | Ranggröße | \bar{x} : | arithmetischer Mittelwert von t_i , |
| n: | Stichprobenumfang | \bar{y} : | arithmetischer Mittelwert von $\hat{F}(t_i)$, |

Die Steigung der Regressionsgeraden entspricht hierbei genau dem zur Berechnung der Weibullverteilung nötigen Formparameter b . Die charakteristische Lebensdauer T kann damit gemäß der Gleichung 45 berechnet werden.

$$T = e^{\frac{c}{b}} \quad (\text{Gl. 45})$$

Ebenso kann die charakteristische Lebensdauer aus dem Schnittpunkt der Regressionsgeraden mit der Ausfallwahrscheinlichkeit bei 63,2 % grafisch bestimmt werden.

Einen anderen Ansatz zur Ermittlung der Weibullparameter verfolgt die Maximum-Likelihood-Methode. Diese versucht das Testergebnis einer Messreihe mathematisch zu erklären. Da die Dichtefunktion mittels der Ausfallzeitpunkte einer Versuchsreihe bekannt ist, genügt es, die noch unbekannt Parameter der Verteilungsfunktion zu bestimmen, um die Testresultate mathematisch zu reproduzieren. Die Maximum-Likelihood-Funktion L ergibt sich aus

$$L = f(t_1, T, b) \cdot f(t_2, T, b) \cdot \dots \cdot f(t_n, T, b), \quad (\text{Gl. 46})$$

wobei $f(t_i, T, b)$ der Dichtefunktion $f(t_i)$ zum Zeitpunkt t_i entspricht.

Als beste Schätzung der unbekannt Parameter werden diejenigen Werte gewählt, bei denen die Likelihood-Funktion ihr Maximum erreicht. Zur Berechnung des Maximums wird die Likelihood-Funktion entsprechend der Gleichung 47 logarithmiert. Dadurch geht die Produktgleichung in eine Summengleichung über.

$$\ln L = \sum_{i=1}^n \ln f(t_i, T, b) \quad (\text{Gl. 47})$$

Die Extrema lassen sich durch die partielle Differenziation der logarithmischen Likelihood-Funktion aus

$$\frac{d \ln L}{dT} = 0 \quad \text{und} \quad \frac{d \ln L}{db} = 0. \quad (\text{Gl. 48})$$

berechnen. Aus der Anzahl N der ausgefallenen Prüflinge, dem Stichprobenumfang, den Ausfallzeiten und der Ranggröße kann der Formparameter aus der Gleichung 49 berechnet werden.

$$\frac{N}{b} + \sum_{i=1}^N \ln t_i - N \cdot \frac{\sum_{i=1}^N t_i^b \cdot \ln t_i}{\sum_{i=1}^N t_i^b} = 0 \quad (\text{Gl. 49})$$

Da in der Gleichung 49 alle Variablen bis auf den Formparameter statisch sind, kann dieser durch numerische Verfahren, meist iterative Verfahren, so bestimmt

werden, dass sich eine wahre Aussage ergibt. Wurde für den Formparameter durch Schätzung ein Wert ermittelt, kann die charakteristische Lebensdauer mit Hilfe der Gleichung 50 ermittelt werden [5][27][43][134][173].

$$T = \left(\sum_{i=1}^n \frac{t_i^b}{N} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (\text{Gl. 50})$$

Um die statistische Vorgehensweise zur Lebensdauerermittlung mittels der Maximum-Likelihood-Methode zu verifizieren, wurde eine theoretische Betrachtung der Ausfallverteilung, der Dichtefunktion und der Überlebensdichte auf Basis einer unterschiedlichen Anzahl von generischen Ausfallzeiten durchgeführt. Hierzu wurde eine stochastische Datenbasis generiert, welche die Ausfallzeiten in Zyklen bei unterschiedlicher Prüflingsanzahl wiedergibt. Analysiert wurde hierbei die Abweichung der Lebensdauer und des Formparameters in Abhängigkeit von der Anzahl an ausgefallenen Teilen. Ausgehend von 15 Ausfallteilen wurde aus diesem Datensatz eine zufällige Parameterextraktion von 10, 5 und 3 Ausfallzeiten durchgeführt und die Parameter T und b mittels der Maximum-Likelihood-Methode ermittelt. Einzig bei der Wahl der ersten und der letzten Ausfallzeitpunkte wurde für die extrahierten Datensätze einer der Randwerte des Ursprungsdatensatzes verwendet. In der Tabelle 4 sind die generischen Daten sowie die daraus ermittelte Lebensdauer und der Formparameter dargestellt.

Anzahl Ausfallteile	Ausfallzeitpunkte in Zyklen	Formparameter b	Lebensdauer T
15	3,9,15,17,26,31,34, 42,48,55,67,75,78,81	1,62	48,04
10	9,15,26,31,42,48,67, 69,78,81	1,94	52,49
5	9,17,34,67,78	1,50	45,50
3	9,42,81	1,42	48,25

Tabelle 4: Theoretische Parameterbetrachtung bei unterschiedlicher Prüflingsanzahl unter Anwendung der Maximum-Likelihood-Methode

Wie der obigen Tabelle zu entnehmen ist, beträgt die maximale Abweichung der charakteristischen Lebensdauer bei einer Reduzierung der Prüflingsanzahl im dargestellten Beispiel maximal 10 %. Anhand von Bild 25 werden die Dichtefunk-

tionen und die Ausfallwahrscheinlichkeiten auf Basis der Daten aus obiger Tabelle visualisiert.

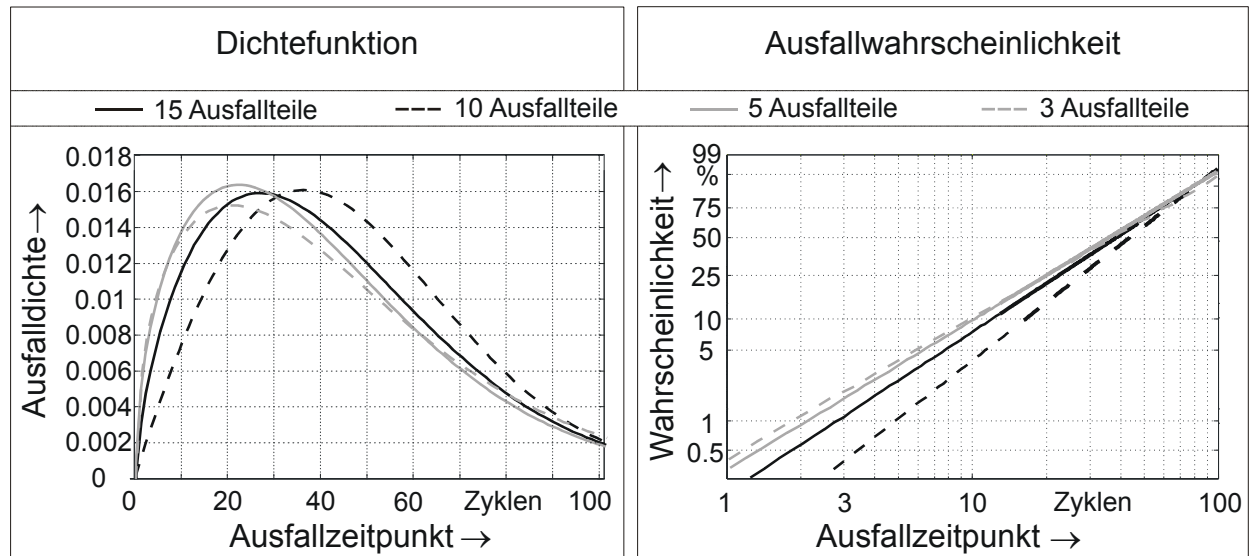


Bild 25: Verteilungsfunktionen bei unterschiedlicher Prüflingsanzahlen unter Anwendung der Maximum-Likelihood-Methode für generische Zufallsausfallzeitpunkte

Wie aus der Abbildung ersichtlich ist, liefert die Parameterschätzung mittels der Maximum-Likelihood-Methode trotz einer reduzierten Prüflingsanzahl sehr gute Ergebnisse.

Für eine statistische Auswertung von Testreihen und Lebensdaueruntersuchungen sind einige Vorüberlegungen zu treffen. Zunächst gilt es zu entscheiden, ob eine Prüfung mit zeitlicher Begrenzung, eine Prüfung bis zum Versagen eines jeden Prüflings (End-of-Life) oder eine Sudden-Death-Prüfung durchgeführt wird. Bei einer Sudden-Death-Prüfung werden die Testobjekte in gleich große Prüfgruppen aufgeteilt. Der Versuch wird nun solange durchgeführt, bis ein Testobjekt aus jeder Prüfgruppe ausfällt. Die Sudden-Death-Prüfung liefert nur eine mittlere Aussagewahrscheinlichkeit, da beim Versagen eines Bauteils auf das Verhalten mehrerer geschlossen wird. Die höchste Aussagewahrscheinlichkeit erhält man durch eine Prüfung bis zum Versagen eines jeden Prüflings, da hier alle Versagenszeitpunkte bekannt sind. Die Prüfung mit zeitlicher Begrenzung liefert, sofern bei Testende nicht alle Prüflinge ausgefallen sind, die geringste Aussagewahrscheinlichkeit, da über den weiteren Verlauf der Ausfallzeitpunkte nichts bekannt ist. Die Ergebnisse einer solchen Prüfung werden als rechtszensiert bezeichnet. In Bild 26 werden die unterschiedlichen Testprinzipien dargestellt [97].

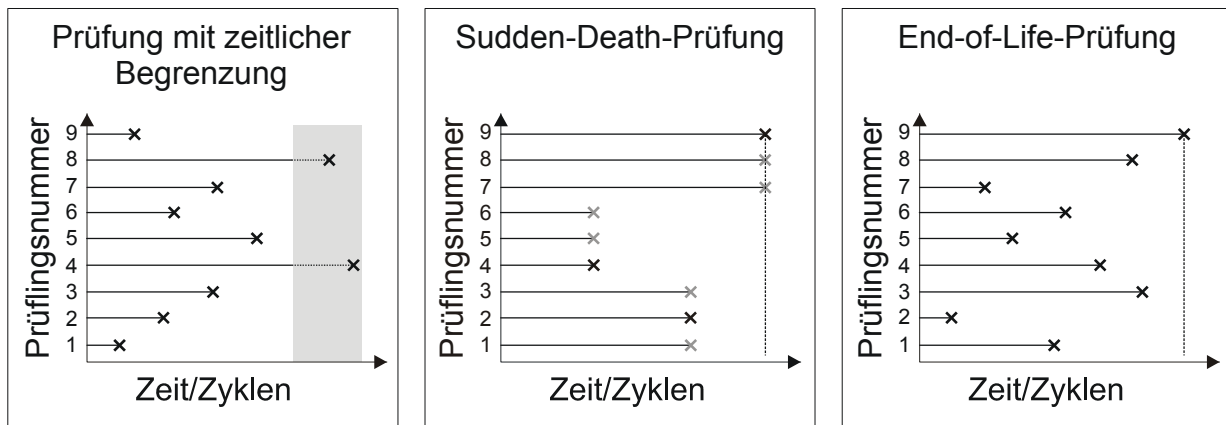


Bild 26: Alternative Strategien zur Durchführung von Lebensdauerprüfungen

Sofern über die Anzahl der Prüflinge entschieden werden kann, was häufig durch eine begrenzte Verfügbarkeit an Testmustern nicht der Fall ist, so ist diese statistisch zu ermitteln. Repräsentiert $R(t)$ die Überlebenswahrscheinlichkeit eines Prüflings, so stellt $R(t)^n$ die Wahrscheinlichkeit dar, dass alle n untersuchten Teile die geforderte Lebensdauer bis zum Zeitpunkt t erreicht haben. Damit gilt für die Aussagewahrscheinlichkeit P_A , dass bis zum Zeitpunkt t mindestens ein Prüfling ausgefallen ist. Diese lässt sich nach der Gleichung 51 ermitteln.

$$P_A = 1 - R(t)^n \quad (\text{Gl. 51})$$

Setzt man voraus, dass bis zum Zeitpunkt t noch kein Ausfall eingetreten ist, so kann der erforderliche Mindeststichprobenumfang entsprechend der Gleichung 52 berechnet werden [173].

$$n = \frac{\ln(1 - P_A)}{\ln R(t)} \quad (\text{Gl. 52})$$

4.4 Ausfallmechanismus und Fehlerauswirkung

Betrachtet man den Fehlermechanismus der ECM auf einfachen Kammstrukturen, so ist die Fehleridentifikation optisch und elektrisch sehr einfach nachzuweisen. Sind allerdings komplexe Steuergeräte, bei denen mehrere tausend Bauelemente und Durchkontaktierungen sowie unzählige parallel verlaufende Leiterbahnen oder Anschlussstrukturen enthalten sind, betroffen, so zeigt sich eine komplexe Wechselwirkung zwischen Fehlermechanismus und der dadurch induzierten Fehlerauswirkung. Durch die vielfältigen Betriebszustände hochintegrierter Systeme im Automobil steigt die Anzahl gefährdeter Layoutbereiche entsprechend an. Im Allgemeinen bewirkt die Ausbildung metallischer Dendriten einen Leckstrom zwischen der lokalen Kathode und Anode der Schaltung. Abhängig davon, an welcher Stelle auf einer Leiterplatte dieser Mechanismus auftritt, werden unterschiedlichste Fehler ausgelöst.

Auf Gesamtfahrzeugebene lassen sich im Wesentlichen drei unterschiedliche Auswirkungen unterscheiden. Diese sind im schlimmsten Fall eine eingeschränkte Mobilität durch ein Versagen betriebsrelevanter Fahrzeugfunktionen, eine Beeinträchtigung von Einzel- oder Systemfunktionen oder im harmlosesten Fall ein Überschreiten der Spezifikationsgrenzen ohne Funktionseinschränkungen. Wie in Bild 27 darstellt, kann der Fehlermechanismus der ECM je nach lokalem Auftreten in der Fehlerauswirkung stark variieren. Berücksichtigt man zudem, dass sich in einem Oberklassefahrzeug bis zu 80 Steuergeräte befinden, die untereinander vernetzt sind, wird deutlich, wie umfangreich und komplex die Ermittlung einer Fehlerursache und der dafür verantwortlichen Fehlermechanismen sein kann. Verschärft wird diese Problematik durch die Tatsache, dass ein Teil der im Kundenumfeld auftretenden Fehler nur sporadischer Natur sind. Diese Fehler treten unter spezifischen Randbedingungen auf und bewirken einen temporär fehlerhaften Systemzustand, welcher bei Abklingen der Belastungen wieder abgestellt ist. Je nach Auftretenshäufigkeit des Fehlers suchen Kunden in aller Regel daraufhin eine Servicewerkstatt auf, welche das laut Fehlerdiagnoseprotokoll verantwortliche System identifiziert und gegebenenfalls wechselt. Bei der anschließenden Analyse der Geräte sind oftmals weder die beanstandeten Fehler reproduzierbar noch dafür verantwortliche Fehlermechanismen identifizierbar. Somit verursachen diese Fehler, sofern sie im Garantiezeitraum auftreten, hohe Gewährleistungskosten und bewirken zudem eine hohe Kundenzufriedenheit.

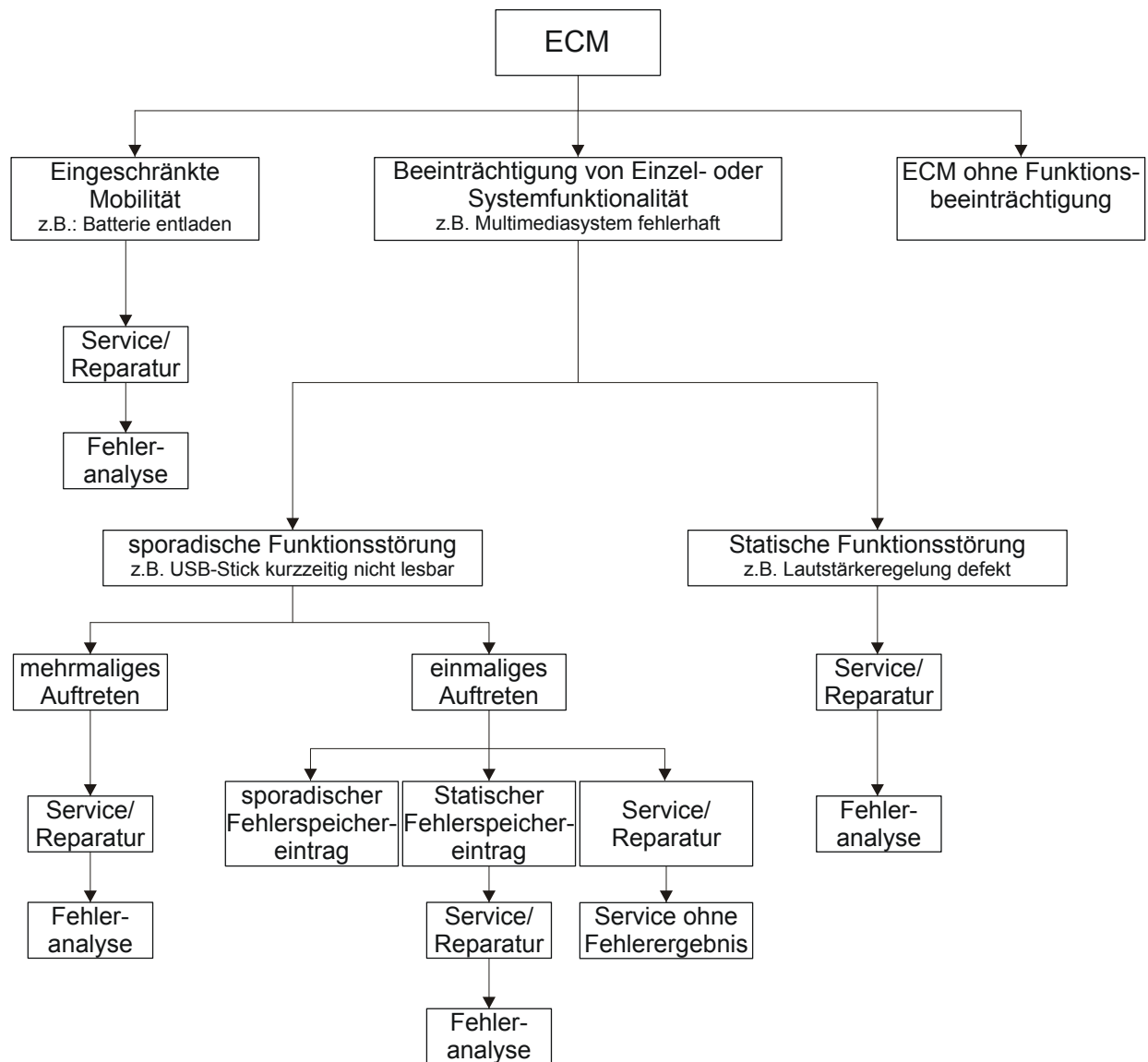


Bild 27: Komplexer Zusammenhang zwischen Fehlermechanismus und Fehlerauswirkung auf Fahrzeugebene

Da sich die Umwelterprobung auf Komponenten- und Systemebene konzentriert, bei der die Prüflinge meist überwacht werden und nur wenige Belastungsarten auf das Produkt einwirken, vereinfacht sich die Wirkkette. Um allerdings Fehlermechanismen und Fehler sowie deren Ursachen zu ermitteln, ist ein intensives Verständnis von Hardware und Software nötig. Im Folgenden werden zwei Szenarien aufgeführt, welche anhand des Fehlermechanismus der ECM die Komplexität und die Wirkkette auf Schaltungsebene verdeutlichen. Dadurch wird ein essenzielles Systemverständnis und Fehlerbewusstsein ausgebildet, womit Rückschlüsse zwischen detektierten Fehlern und deren verantwortlichen Mechanismen gezogen werden können.

Beispiel 1: Leckstrom durch ECM an einem Keramikkondensator

Häufig werden bei Automobilanwendungen Spannungsregler mit Softstart-Funktionalität in der Eingangsbeschaltung von Steuergeräten verwendet, um ein geregeltes Hochlaufen der Betriebsspannungen zu gewährleisten. Die Zeit bis zum Erreichen der definierten Ausgangsspannung wird über eine externe Kapazität eingestellt. Kommt es an dieser Kapazität zu einem Nebenschluss, so verlängert sich die Hochlaufzeit bis zum Erreichen der Ausgangsspannung. Ein anschließend folgender zeitgesteuerter Resetkomparator, dessen Aufgabe es ist, Unterspannungen im System zu detektieren und durch einen Reset wieder einen definierten Systemzustand herzustellen, erkennt eine zu geringe Ausgangsspannung des Spannungsreglers (U_{out}). Solange die Hochlaufzeit des Spannungsreglers verzögert ist, schaltet der Komparator den Resetausgang auf HIGH und den Spannungsausgang (U_a) auf LOW. Infolgedessen werden nachfolgende Mikroprozessoren nicht mit Spannung versorgt und können nicht aktiviert werden. Je nach Funktion und Aufgabe der Mikroprozessoren kann sich die Fehlerauswirkung im System unterscheiden. Dies kann vom Verlust einzelner Funktionen bis hin zu einem Erliegen des ganzen Systems führen. Bild 28 zeigt das erläuterte Beispiel [22].

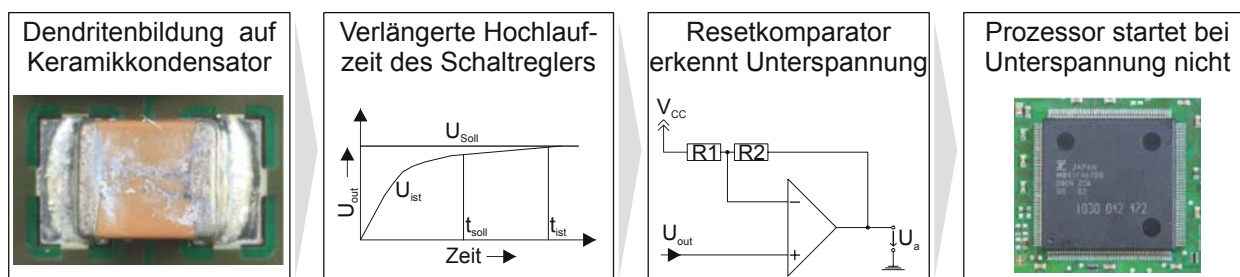


Bild 28: ECM auf einem Keramikkondensator zur Einstellung der Softstart-Funktion an einem Spannungsregler und dessen Auswirkungen auf Systemebene

Beispiel 2: Leckstrom durch ECM zwischen benachbarten IC-Anschlüssen

Um den Fahrer eines Fahrzeugs auf gewisse Situationen oder Sachverhalte hinzuweisen, werden visuelle Signale meist in Verbindung mit akustischen Signaltönen eingesetzt. Derartige Hinweise sind beispielsweise ein leerer Tankinhalt, eine ungelöste Handbremse oder ein zu geringer Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. Zur schaltungstechnischen Umsetzung dieser Funktionen werden unter anderem Akustikverstärker zur Ansteuerung eines Lautsprechers eingesetzt. Einige dieser Akustikverstärker besitzen Diagnosefunktionen um beispielsweise Lotbrücken zu diagnostizieren. Dies kann über eine Widerstandserkennung zwischen spezifischen Anschlussbeinchen geschehen.

Am Beispiel des Akustikverstärkers LM48100Q der Firma National Semiconductor wird ein Widerstand $<3\text{ k}\Omega$ zwischen den Anschlüssen acht und neun oder zwischen den Anschlüssen neun und zehn diagnostisch als Kurzschluss erkannt. Die Anschlussbeschreibung kann dem Datenblatt des Herstellers entnommen werden und sei hier nicht weiter ausgeführt [21]. Ein niederohmiger Pfad aufgrund von ECM zwischen den genannten Anschlüssen führt dazu, dass die Ausgänge des Verstärkers ausgeschaltet werden und der Fehlerausgang (Fault) auf LOW gesetzt wird. Dadurch ist die akustische Ausgabe von Signalen über die Lautsprecher unterbunden. In dem in Bild 29 gezeigten Beispiel kann dies zu einem Aufblinken einer Signalleuchte in der Schalttafel führen. Je nach Verwendung der Informationen aus dem Fehlerausgang kann es zu anderen oder weiteren Funktionseinschränkungen und Folgeereignissen kommen.

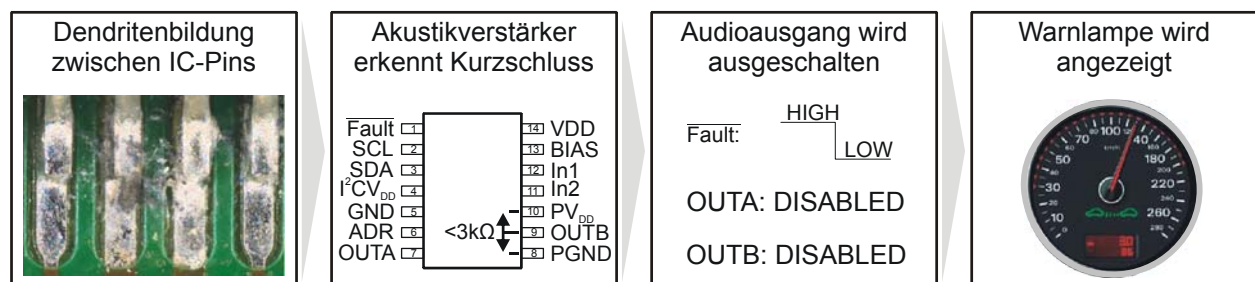


Bild 29: ECM zwischen benachbarten IC-Anschlüssen an einem Akustikverstärker und dessen Auswirkung auf Systemebene

Wie die beiden Beispiele verdeutlichen, ist der Zusammenhang zwischen Fehlermechanismus und Fehlerauswirkung stark systemabhängig und bedarf einer individuellen und intensiven Betrachtung durch Hardware- und Softwareexperten. Ob und inwieweit sich Funktionseinschränkungen über die Grenzen eines Systems hinaus auswirken, hängt von der Steuergerätetopologie und der Abhängigkeit der Systeme untereinander ab. So kann beispielsweise ein fehlerhaftes Signal eines Sensors, welches in mehrere Systeme eingelesen oder für mehrere Funktionen benötigt wird, die korrekte Funktion dieser Systeme unterbinden oder beeinträchtigen.

4.5 Vorgehensmodell zur Fehleridentifikation und -verifikation

Da zum heutigen Zeitpunkt trotz entwicklungsbegleitender Maßnahmen zur Robustheitssteigerung dennoch Produktschwachstellen aus dem Konzept, dem Design oder aus dem Prozess im Rahmen der Erprobung aufgedeckt werden, gilt es, die Fehlerursachen und die dafür verantwortlichen Fehlermechanismen schnellstmöglich zu identifizieren, um Abstellmaßnahmen für weitere Musterphasen zu definieren. Im Folgenden wird daher ein Vorgehensmodell erläutert, welches bei betauungsbedingten Auffälligkeiten die Fehlerursache effizient identifiziert und verifiziert.

Treten bei zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen elektrische Auffälligkeiten auf, so kann in den meisten Fällen auf korrosionsinduzierte Kriechströme oder elektrochemische Migration geschlossen werden. Um aber die Effekte auf Leiterplatten zu lokalisieren, werden effiziente Methoden und Vorgehensweisen benötigt, um schnellstmöglich kritische Schaltungs- oder Layoutbereiche auf der Leiterplatte zu identifizieren sowie Fehlermechanismen und entsprechende Fehlerbilder zu verifizieren.

Hardware-/ Layoutreview

Hierzu gilt es im ersten Schritt mit einem Hardware- und Layoutreview zu beginnen. Durch Visualisierung von potentialgetrennten Signalpfaden, vorwiegend zwischen Bezugsmasse und verschiedenen Funktionssignalen, im Layout auf Ober- und Unterseite der bestückten Leiterplatte, können sowohl relevante Leiterzüge als auch betroffene Bauelemente identifiziert werden. Wichtig ist es dabei, dies für die unterschiedlichen Betriebszustände einer Komponente oder eines Systems durchzuführen. Die benötigten Eingangsgrößen und Kompetenzen bei diesem Prozessschritt sind ein Schaltplan und das entsprechende Leiterplattenlayout sowie die Systemexperten aus den Bereichen Hardware und Software.

Analyse der Signalintegrität

In einem nächsten Schritt wird die Signalintegrität der zuvor identifizierten Signalpfade ermittelt. Mittels der Schaltungsauslegung, den Toleranzgrenzen der verwendeten Bauteile und den entsprechenden Schwellspannungspegeln lassen sich unterschiedliche Stellen im Schaltplan beziehungsweise im Layout erkennen, die bei Leckströmen im Mikro- und Milliamperebereich die zuverlässige Funktion einer Schaltung bei einer Feuchteadsorption beeinträchtigen. Vorzugsweise können hierbei Bauelemente mit Rastermaß kleiner 1 mm beziehungsweise Leiterbahnabstände kleiner 500 µm fokussiert werden. Auch Testpunkte für Funktionsprüfungen oder In-Circuit-Test, welche nahe an Bauelementanschlüssen oder Leiterbahnen platziert sind, müssen beachtet werden.

Definition der Fehlerauswirkung auf Systemebene

Im Anschluss an diesen Schritt müssen die Fehlerauswirkungen, welche sich bei potenziellen Nebenschlüssen an den unterschiedlichen Stellen im Layout ergeben, abgeleitet werden. Sowohl eine Simulation der Schaltung oder der betroffenen Schaltungsbereiche als auch die mathematische Aufbereitung der unterschiedlichen Signale unter Anwendung der elektrotechnischen Gesetzmäßigkeiten und der Funktionseigenschaften der aktiven Halbleiterbausteine liefert bei diesem Schritt die geforderten Ergebnisse. Die Erkenntnisse sind besonders dahingehend von Bedeutung, als dass diese wichtige Informationen über Funktions- und Qualitätsparameter bereitstellen, die während der Klimaprüfungen zu überwachen sind.

Risikopriorisierung

Gemäß der Ermittlung einer Risikoprioritätszahl bei einer FMEA sind die Fehlerbilder anschließend in Form einer Risikobewertung zu priorisieren. Hierbei können zum Beispiel Kundenrelevanz, Eintrag im Fehlerspeicherprotokoll oder Sicherheitsrelevanz von Bedeutung sein.

Fehlerverifikation

Um die theoretisch erarbeiteten Zusammenhänge zu verifizieren, kann mittels eines Tröpfchentests die jeweilige Fehlerauswirkung bei unterschiedlichen Systemzuständen verifiziert werden. Durch Auftrag einer geringen Menge an destilliertem Wasser mit einer Pipette oder einer Spritze mit feiner Dispensnadel an die kritischen Stellen im Layout, wird eine Feuchteadsorption simuliert. Abhängig vom Elektrodenabstand, Menge und Art der Verunreinigungen auf der Leiterplatte und den Spannungspotentialen können sich metallische Brücken durch ECM ausbilden. Unter Umständen sind Schaltungsbereiche so sensibel, dass bereits die geringe Leitfähigkeit von Wasser in Verbindung mit lokalen Verunreinigungen zu einer Funktionsbeeinträchtigung des Systems führt. Diese Bereiche sind aufgrund ihrer hohen Empfindlichkeit als besonders kritisch zu bewerten. Mittels optischer Analysen der geprüften Stellen im Layout kann der Fehlermechanismus nachgewiesen werden. Anhand des Vorgehensmodells in Bild 30 werden die erläuterten Schritte nochmals zusammengefasst.

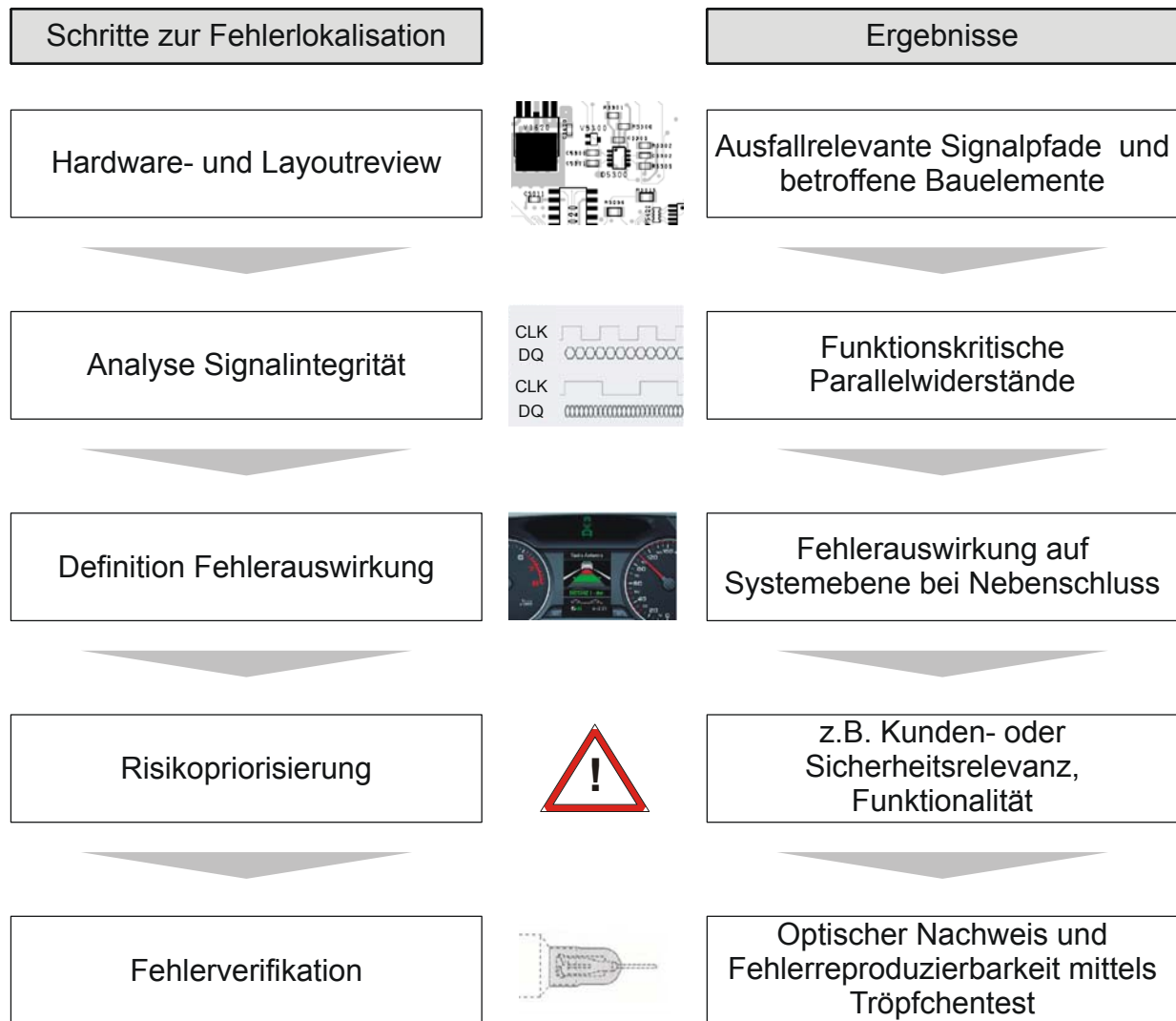


Bild 30: Vorgehensmodell zur Lokalisation und Verifikation von betauungsbedingten Fehlerursachen

Nach einer Fehlerlokalisierung und dessen Verifikation beginnt die Einleitung von Abstellmaßnahmen. Diese können sowohl mit Konzept- oder Designänderungen als auch durch Prozessoptimierungen verbunden sein. Mögliche Prozessoptimierungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Reduzierung von Verunreinigungen beziehungsweise auf eine Reinigung der Baugruppen nach dem Lötprozess. Neben der Lokalisation von Fehlerursachen bei Auffälligkeiten nach einer Prüfung eignet sich dieses Vorgehen darüber hinaus insbesondere auch dazu, bereits vor Testbeginn Schwachstellen eines Systems zu identifizieren und bereits vor Ausführung von Design- oder Produktqualifizierungen die Robustheit einer Anwendung zu steigern.

5 Bewertung unterschiedlicher Einflussgrößen bei Betauung

5.1 Analyse funktionsrelevanter Signalparameter

Die technische Weiterentwicklung elektronischer Steuergeräte ist gekennzeichnet durch einen zunehmenden Einsatz an digitaler Technologien, welche die bisherigen analogen Technologien zunehmend ersetzen oder ergänzen. Gerade die geringere Störempfindlichkeit digitalen Signale im Gegensatz zu analogen Signalen begünstigt deren Verwendung. Diese Entwicklung gilt gleichermaßen für die Sensorik wie auch für die Aktorik. Bei der Realisierung verschiedener Funktionen werden unterschiedlichste Signalformen eingesetzt. Sowohl in der Analog- als auch in der Digitaltechnik spielen Spannungspegel, Frequenz und Signalform eine entscheidende Rolle.

Um Aussagen über betauungsempfindliche Bereiche einer elektronischen Baugruppe machen zu können, muss bekannt sein, wie unterschiedliche Signalformen die Zuverlässigkeit bei einer Feuchteadsorption beeinflussen. Daher wurde eingangs das Ausfallverhalten durch ECM bei unterschiedlichen Signalformen und Signalfrequenzen analysiert. Zunächst wurde der Einfluss der unipolaren Signalformen Dreieck und Rechteck mit einer Frequenz von 10 Hz sowie der Einfluss eines Gleichsignals auf die Bildung metallischer Dendriten untersucht. Die Spannungsamplitude betrug bei allen Signalen 10 V. In Bild 31 werden die verwendeten Signalformen dargestellt.

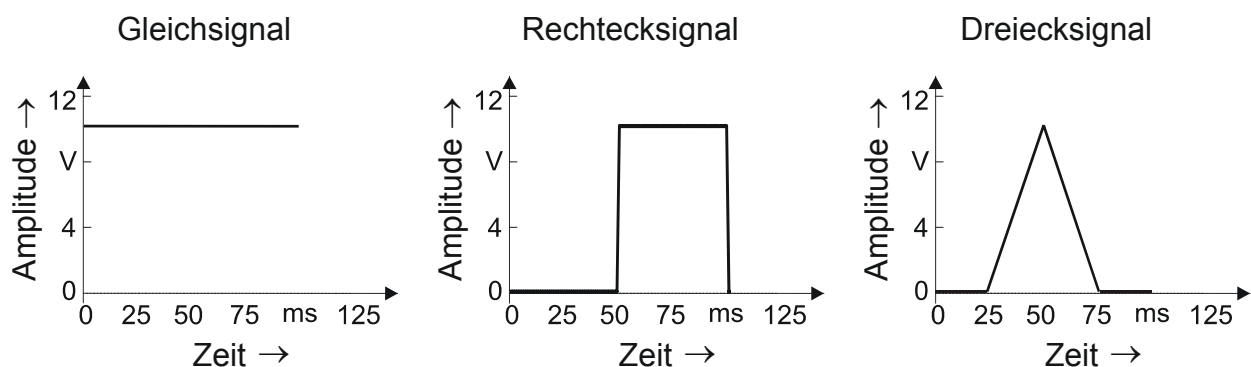


Bild 31: Unipolare Signalformen als Versorgungsspannungen bei den Migrationsuntersuchungen

Diese Signalformen wurden an eine ineinandergreifende Kammstruktur aus Kupfer mit 400 μm Leiterbahnbreite und -abstand angelegt (U_{In}). Als Substrat wurde Standard FR4 verwendet, wobei kein Lötstopplack appliziert war. Mittels eines zur Kammstruktur in Reihe geschalteten Widerstandes von 1 k Ω , über den

der Spannungsabfall mit einer Abtastrate von 100 Hz überwacht wurde, konnte ein elektrischer Kurzschluss durch ECM präzise detektiert werden. Für alle durchgeführten Experimente wurde das Shannonsche Abtasttheorem, welches in der Gleichung 53 mathematisch beschrieben ist, zur Bestimmung der minimalen Abtastfrequenz beachtet.

$$f_A > 2 \cdot f_B \quad (\text{Gl. 53})$$

Dieses besagt, dass ein Zeitsignal der Signalbandbreite f_B mindestens mit der doppelten Abtastfrequenz f_A abgetastet werden muss, damit der Informationsgehalt des Signals nicht verändert wird [180].

Um eine Betauung der Kammstruktur beschleunigt zu simulieren, wurde mit einer Pipette und einer Dosiernadel mit einer Öffnung von $100 \mu\text{m}$ eine definierte und reproduzierbare Menge deionisiertes Wassers aufgebracht. Das Vorgehen kann dadurch legitimiert werden, als dass sich bei einer Kondensation der Wasserfilm sequentiell aus singulären Tropfen und deren Zusammenschluss zu größeren Tropfen ausbildet. Erst wenn die akkumulierte Tropfengröße den Elektrodenabstand erreicht, wird eine Elektrolyse und damit die Migration von Ionen ermöglicht. Da Verunreinigungen jeglicher Art das Dendritenwachstum signifikant beeinflussen, erfolgte eine Reinigung der Leiterplatten vor der Tropfenaufbringung mit Isopropanol und deionisiertem Wasser. Dadurch können parasitäre Effekte durch ionische Verunreinigungen ausgeschlossen werden. Bei einer statistischen Auswertung von 40 applizierten Tropfen ergab sich ein arithmetischer Mittelwert des Tropfendurchmessers von $\mu=1225 \mu\text{m}$ mit einer Standardabweichung $\sigma=176 \mu\text{m}$. Abschließend erfolgte sowohl die statistische Analyse der elektrischen Ausfallzeiten als auch eine optische Inspektion der Kammstrukturen. Bild 32 zeigt die gewählte Versuchsstrategie.

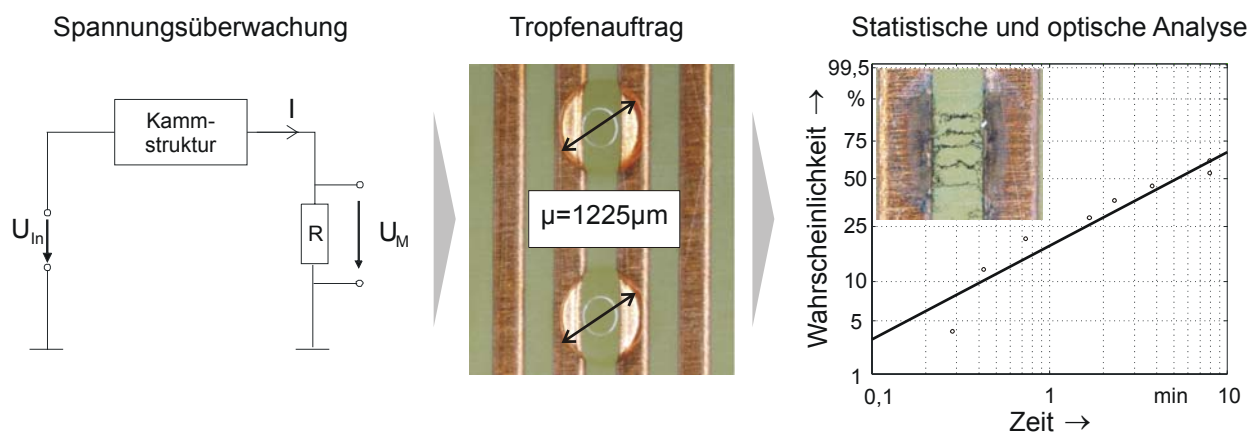


Bild 32: Versuchsstrategie zur Bewertung unterschiedlicher Signalformen auf das Migrationsverhalten bei Betauung

Um eine statistische Bewertung der Versuche zu gewährleisten, wurden je Signalform sequenziell 10 Wassertropfen aufgebracht und die Zeit bis zum Anstieg des Stromes über 1,5 mA dokumentiert. Hierbei hat sich gezeigt, dass bei einem Gleichsignal die Zeit bis zum Ausfall durch ECM am geringsten ist. Wie in Bild 33 dargestellt ist, sind bei dieser Signalform nach etwa 50 s metallische Dendriten von der Kathode zur Anode gewachsen. Sowohl bei der Rechteckspannung als auch bei der Dreieckspannung mit einer Periodendauer von 100 ms zeigt sich zwar ein ähnliches Ausfallverhalten, jedoch ist die Zeitdauer bis zum Kurzschluss länger. Hierbei sind nach 50 s etwa 75 % der Ausfälle erreicht. Eine Betrachtung der Maximalströme verdeutlicht zudem, dass die Stromtragfähigkeit der gewachsenen Dendriten bei einem Gleichsignal höher ist als bei den anderen beiden Signalformen.

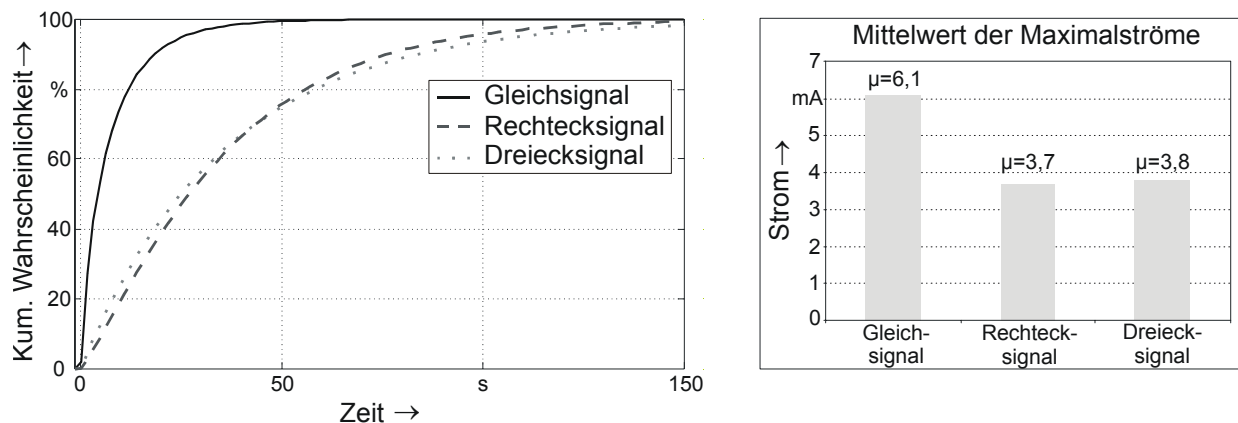


Bild 33: Einfluss der Signalform auf das Ausfallverhalten durch ECM

Um das unterschiedliche Ausfallverhalten bei den untersuchten Signalen zu erklären, gilt es verschiedene Aspekte zu prüfen. Zunächst wird die durch den Elektrolyten transportierte Energie betrachtet. Diese steht für die Elektrolyse und den Materialtransport zwischen den Elektroden zur Verfügung und wird maßgeblich durch die Leitfähigkeit des Elektrolyten bestimmt. Mathematisch ergibt sich diese Energie entsprechend der Gleichung 54 aus dem Spannungsabfall über dem Elektrolyten (U_{EL}) und dem durch den Elektrolyten fließenden Strom (I_{EL}).

$$E_{el} = \int_{t_1}^{t_2} u_{EL}(t) \cdot i_{EL}(t) \cdot dt. \quad (\text{Gl. 54})$$

Die Gleichung 54 lässt sich unter Anwendung des ohmschen Gesetzes auch durch den Widerstand des Elektrolyten (R_{EL}) und die Spannung beziehungsweise den Strom entsprechend der Gleichung 55 beschreiben.

$$E_{el} = \frac{1}{R_{EL}} \cdot \int_{t_1}^{t_2} u_{EL}^2(t) \cdot dt = R_{EL} \cdot \int_{t_1}^{t_2} i_{EL}^2(t) \cdot dt. \quad (\text{Gl. 55})$$

Somit ist bei einer konstanten Leitfähigkeit des Elektrolyten die Energie proportional dem Integral über eine quadrierte Zeitfunktion. Da aber bei gleicher Periodendauer und Amplitude der Energieinhalt des Rechtecksignals doppelt so groß ist wie der des Dreiecksignals, scheint der übertragene Energieinhalt nicht die allein verantwortliche Ursache für das beobachtete Ausfallverhalten zu sein. Ansonsten hätten bei dem Rechtecksignal frühere Ausfälle als bei dem Dreiecksignal auftreten müssen. Eine detaillierte Begründung wird nachfolgend anhand der Betrachtung des Einflusses unterschiedlicher Frequenzen unipolarer und bipolarer Rechtecksignale auf das Ausfallverhalten bei einer Betaung geliefert.

Da sowohl für das Auslesen verschiedenster Sensoren als auch für die Ansteuerung diverser Aktoren vermehrt frequenzmodulierte Signale verarbeitet werden, wurde in einem nächsten Schritt der Einfluss der Signalfrequenz auf das Ausfallverhalten durch ECM untersucht. Analog der in der Bild 32 dargestellten Versuchstrategie, wurde an die Kupferkammstruktur einerseits ein Rechteck- und andererseits ein Dreiecksignal mit einer Amplitude von 10 V und unterschiedlichen Frequenzen angelegt, und die Zeit vom Tropfenauftrag bis zum elektrischen Kurzschluss durch ECM verglichen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass mit höheren Frequenzen die Zeit bis zum elektrischen Kurzschluss für beide Signalformen zunimmt. Anhand von Bild 34 wird dieser Sachverhalt am Beispiel des Rechtecksignals bei unterschiedlichen Frequenzen dargestellt. Trägt man die Zeitpunkte, an denen die Maxima der Ausfalldichten liegen, über die Frequenz auf, so kann man ein logarithmisches Ausfallverhalten über das betrachtete Frequenzband erkennen.

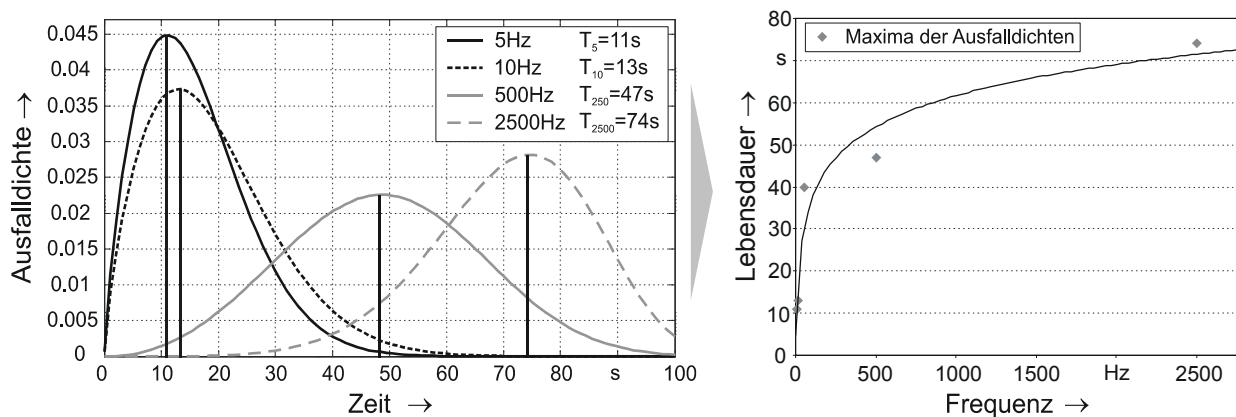


Bild 34: Dichtefunktion und frequenzabhängige Lebensdauer bei rechteckförmigen Signalen unterschiedlicher Frequenz

Weiterhin konnte bei dem Versuch festgestellt werden, dass sich mit höherer Frequenz das optische Erscheinungsbild der gewachsenen metallischen Brücken verändert. Es findet eine ausgeprägte Strukturbildung der Dendriten statt und eine Verästelung ist verstärkt zu erkennen. Bild 35 zeigt dies anhand der Frequenzen von 1 Hz, 50 Hz und 2500 Hz bei einer Amplitude von 10 V.

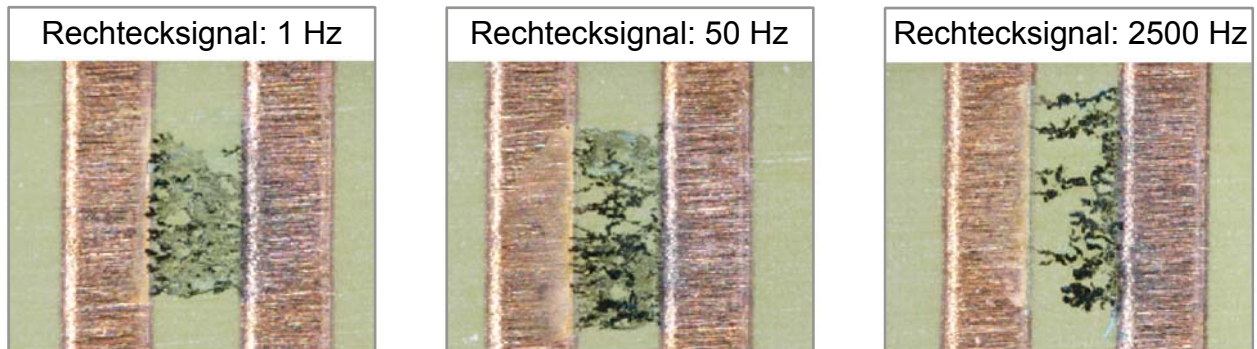


Bild 35: Veränderung des optischen Erscheinungsbildes metallischer Dendriten mit steigender Signalfrequenz

Um die mit steigender Signalfrequenz verlängerte Lebensdauer zu interpretieren, hilft eine Betrachtung des elektrischen Ersatzschaltbildes und der entsprechenden elektrotechnischen Gesetzmäßigkeiten. Hierzu zeigt Bild 36 zum einen das vereinfachte elektrische Ersatzschaltbild zweier benachbarter Leiterstrukturen bei niedrigen Signalfrequenzen und zum anderen das vereinfachte elektrische Ersatzschaltbild einer elektrolytischen Zelle. Letzteres setzt sich durch die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Helmholtz-Doppelschicht und dem Widerstand des Elektrolyten zusammen [7][12][70][74].

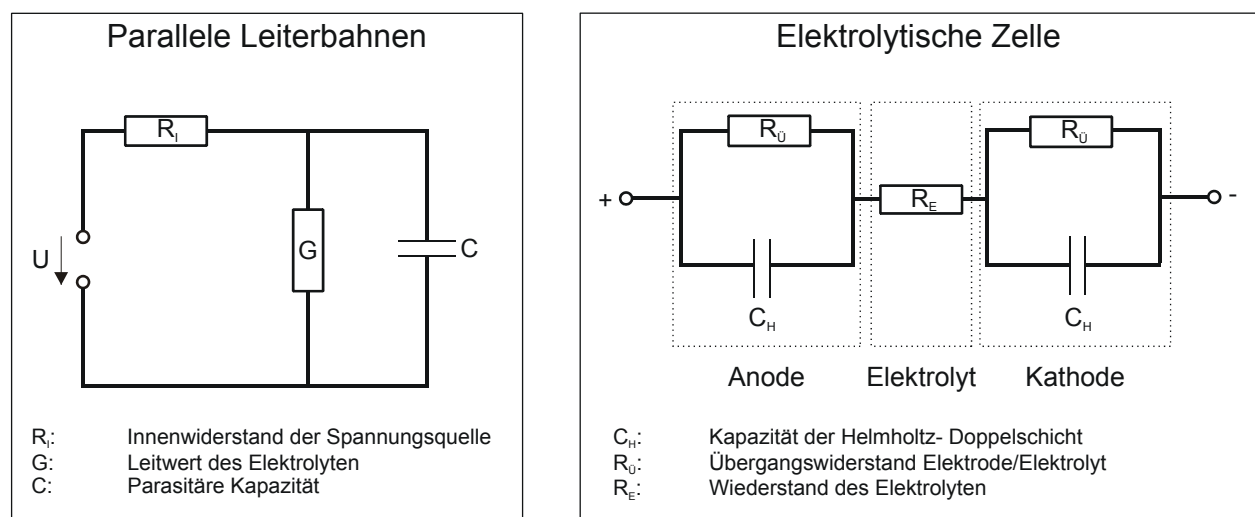


Bild 36: Vereinfachtes Ersatzschaltbild benachbarter potentialgetrennter Leiterbahnen sowie einer elektrolytischen Zelle

Aufgrund der geringen Dielektrizitätskonstante von Wasser ϵ_r kann nach Gleichung 56 der kapazitive Einfluss im Ersatzschaltbild für parallele Leiter vernachlässigt werden.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot \pi \cdot \frac{A}{d} \quad (\text{Gl. 56})$$

Dabei stellt ϵ_0 die elektrische Feldkonstante, A die Elektrodenfläche und d den Elektrodenabstand dar. Dadurch lässt sich der Einfluss der Frequenz nicht erklären, und es müsste aufgrund des gleichbleibenden Energieinhaltes zu gleichen oder ähnlichen Ausfallzeiten kommen. Eine ähnliche Schlussfolgerung kann getroffen werden, wenn man das elektrische Ersatzschaltbild einer elektrolytischen Zelle betrachtet. Da mit steigender Frequenz f der kapazitive Widerstand Z der Helmholtz-Doppelschicht mit der Kapazität C_H gemäß der Gleichung 57 sinkt, vereinfacht sich das Ersatzschaltbild und der Gesamtwiderstand wird maßgeblich durch den Elektrolyten bestimmt.

$$Z = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_H} \quad (\text{Gl. 57})$$

Damit müsste bei höheren Frequenzen die Stromdichte durch die Grenzschicht und den Elektrolyten zunehmen und aufgrund des Faradayschen Gesetzes nach Gleichung 58 der Materialabtrag an der Anode sowie die Materialabscheidung an der Kathode zunehmen [57].

$$m = \frac{M}{z \cdot F} \cdot I \cdot t, \quad (\text{Gl. 58})$$

Mit F=Faraday-Konstante ($9,648 \cdot 10^4$ As/mol), I=Elektrischer Strom, M=Molmasse, T=Zeit und z=Wertigkeit.

Erklären lässt sich dieser Effekt dadurch, dass die Stoffmenge, die an einer Elektrode während der Elektrolyse abgeschieden wird, proportional zur elektrischen Ladung ist, die durch den Elektrolyten geschickt wird. Da bei der Elektrolyse an der Kathode die Reduktion, und damit die Abscheidung eines Metalls, welches an der Anode in Lösung geht, stattfindet, müssen die beiden Mengen wegen der Bilanz der elektrischen Ladungen gleich sein.

Aus den experimentellen Untersuchungen mit unterschiedlichen Signalformen und identischen Signalparametern sowie aus den Versuchen mit identischer Signalform und unterschiedlichen Frequenzen lässt sich ableiten, dass der Effekt der Migration bei konstanter Signalamplitude primär durch die Periodendauer und nicht durch den Energieinhalt des Signals bestimmt wird. Nach dieser These werden die gelösten Ionen mit jedem Puls um eine spezifische Streckeneinheit in Richtung der Kathode bewegt. Mit sinkender Periodendauer nimmt die je Puls zurückgelegte Strecke ab. Zudem nimmt der relative Energiebedarf für eine

Anschubbewegung aufgrund der Kinetik der Moleküle sowie des Widerstandes im Elektrolyten zu.

Diese aufgestellte Theorie lässt sich durch die Analyse des Migrationsverhaltens bei Wechselspannung unterstützen. Dazu wurde anstelle des unipolaren Rechtecksignals ein bipolares Signal gleicher Form mit identischer Amplitude angelegt und mit der gleichen Versuchsstrategie bewertet. Hierbei hat sich gezeigt, dass im niederfrequenten Bereich bis etwa 3 Hz ein Dendritenwachstum zu beobachten war. Bei höheren Frequenzen kam es zwar zu einer Metallauflösung an beiden Elektroden, jedoch wurden die Kupferionen an der entsprechenden Elektrode anschließend sofort wieder reduziert, ohne dass eine Migration zur Gegenelektrode stattfand. Bild 37 zeigt die Ausfallwahrscheinlichkeit bei Frequenzen von 1 Hz, 3 Hz und 5 Hz, wobei bei 5 Hz bereits keine elektrischen und visuellen Kurzschlüsse mehr detektiert wurden. Wird die Leitfähigkeit des Elektrolyten durch Zugabe von geringen Mengen an Kochsalz oder Essigessenz erhöht, so kann eine Dendritenbildung auch bei Frequenzen über 3 Hz beobachtet werden.

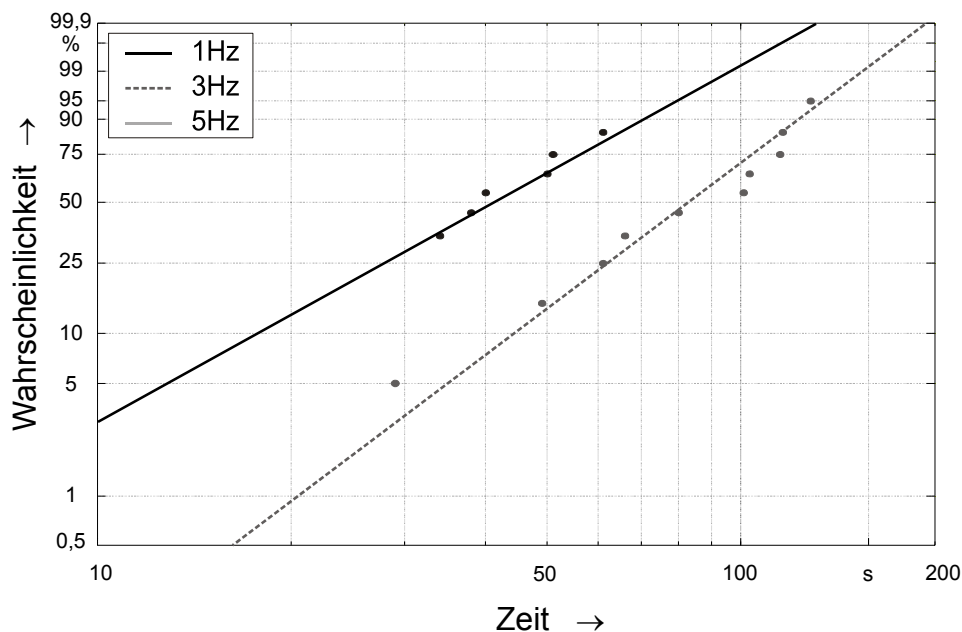


Bild 37: Ausfallwahrscheinlichkeit durch ECM bei bipolaren Rechtecksignalen unterschiedlicher Frequenz

Weiterhin wurde festgestellt, dass mit zunehmender Frequenz der angelegten Wechselspannung eine feinere Schichtbildung an den Elektroden stattfand. Hierzu zeigt Bild 38 die Ergebnisse der optischen Analyse der Kammstrukturen bei unterschiedlichen Frequenzen des angelegten Rechtecksignals.

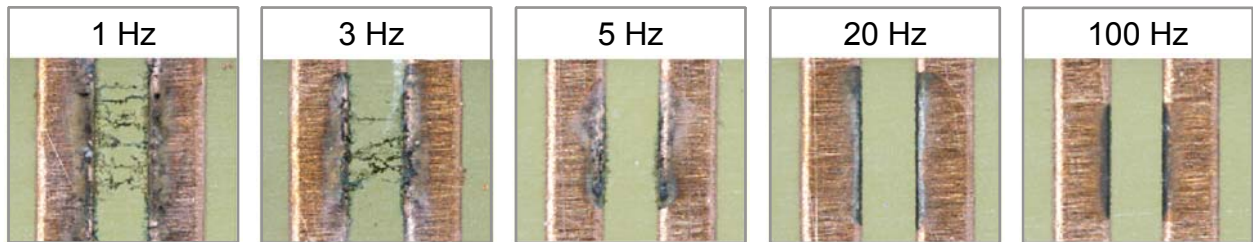


Bild 38: Vermeidung von ECM und Effekt der feineren Schichtbildung an den Elektroden mit höheren Frequenzen bei bipolaren Signalen

In Anbetracht der Tatsache, dass der Effekt der ECM unterschiedliche Fehlerbilder bei komplexen elektronischen Systemen auslösen kann, ist die Kenntnis über maximal mögliche Ströme, welche Dendriten zu tragen vermögen, von essenzieller Bedeutung. Daher wurde nach analogem Vorgehen der Versuch mit einem niederohmigen Widerstand von 100Ω und einer Gleichspannung von 14 V , was der Bordnetzspannung im Automobil entspricht, wiederholt. Hierbei hat sich gezeigt, dass ein Maximalstrom von 28 mA erreicht werden konnten. Bei einer Stichprobe von 12 Einzelmessungen ergab sich ein arithmetischer Mittelwert von $\mu=15,3 \text{ mA}$ mit einer Standardabweichung von $\sigma=5,3 \text{ mA}$.

Fasst man die Erkenntnisse dieser Versuchsreihen zusammen, so lässt sich sagen, dass durch die Verwendung hochfrequenter unipolarer Signale die Robustheit elektronischer Schaltungen bei einer möglichen Betauung gesteigert werden kann. Werden prozess- und herstellungsbedingte Verunreinigungen vermieden, so kann bei dem Einsatz von Wechselspannungen über 5 Hz der Effekt der ECM nahezu ausgeschlossen werden.

5.2 Zuverlässigkeitsbewertung von Lotpastensystemen

Die Umsetzung der Richtlinie 2002/95/EG mit dem Titel **Restriction of the use of certain Hazardous Substances in electrical and electronic equipment (RoHS)**, welche zum 01.07.2006 in Kraft getreten ist, wird nach derzeitigem Stand ab dem 01.01.2016 auch alle elektronischen Baugruppen im Automobil betreffen. Aufgrund der Verwendung von aggressiveren Flussmitteln und mehr Aktivatoren beim bleifreien Lötprozess gilt es in diesem Zusammenhang die Zuverlässigkeit alternativer Lotpastensysteme im Hinblick auf deren Betauungsrobustheit eingehend zu untersuchen und zu bewerten. Bisher wird die Beständigkeit eines Pastensystems gegen die Einwirkung hoher Luftfeuchtigkeit mittels standardisierter Kammstrukturen bei einer konstanten Temperatur und Luftfeuchtigkeit sichergestellt. Dabei wird ein Kupferkamm mit der zu qualifizierenden Lotpaste bedruckt und anschließend für eine definierte Zeitdauer einer statischen Temperatur-Feuchte-Prüfung ausgesetzt, wobei der Oberflächenisolationswiderstand in definierten Abständen kontrolliert wird. Die Testparameter schwanken

hier bezüglich Testdauer, Belastungsparameter und Bewertungskriterium. Als einschlägige Normen und Standards für die SIR-Qualifikation von Lotpastensystemen können hier IPC-TM-650 2.6.3.3B, Bellcore GR78-CORE, JIS Z 3197, JIS Z 3284 oder DIN 32513 aufgeführt werden [103][105][115][117][124][125]. Diese Prüfnormen nutzen ausschließlich statische Temperatur-Feuchte-Prüfungen, um die Zuverlässigkeit eines Lotpastensystems gegen Kriechströme und metallisches Dendritenwachstum abzusichern. Ein weiteres Defizit ist die niederfrequente Abtastung des Oberflächenisolationswiderstandes. Messintervalle von mehreren Minuten reichen nicht aus, um temporäre Kurzschlüsse durch ECM zu detektieren.

Zwar werden in den Datenblättern der Lotpastenhersteller neben den physikalischen Größen wie Legierungszusammensetzung, Dichte oder Schmelzpunkt auch die Eigenschaften der Rückstände in Form der Flussmittelaktivität oder des Oberflächenisolationswiderstandes angegeben, aber wie sich dieses Pastensystem bei einer Feuchteadsorption verhält, ist nicht spezifiziert. Hierbei stellt sich die Frage, ob Unterschiede hinsichtlich der Ausbildung metallischer Dendriten bei einer Betauung an verschiedenen, aber gleich oder ähnlich spezifizierten Lotpastensystemen zu erkennen sind. Um diese Fragestellung zu beantworten, erfolgte in einem ersten Schritt die Auswahl geeigneter Lotpastensysteme. Als Auswahlkriterien für die bleifreien Pastensysteme dienten die Legierungszusammensetzung, die Partikelgröße, die Spezifikation des Flussmittelsystems und die bestandene Prüfanforderung hinsichtlich der Eigenschaften des Oberflächenisolationswiderstandes. Die Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Eigenschaften der ausgewählten Lotpastensysteme.

Eigenschaften	Lotpaste A	Lotpaste B	Lotpaste C
Legierung	Sn96.5/Ag3/Cu0.5	Sn96.5/Ag3/Cu0.5	Sn96.5/Ag3/Cu0.5
Partikelgröße	25-45 µm	20-45µm	25-36 µm
Flussmittel	ROL0	ROL0	ROL0
SIR Testmethode	IPC TM-650 2.6.3.3B	JIS Z 3197	JIS Z 3284
SIR Anforderungen	85 °C/85 % >10 ⁸ Ohm	85 °C/85 % >10 ⁹ Ohm	40 °C/90 % >10 ¹² Ohm

Tabelle 5: Eigenschaften der ausgewählten Lotpastensysteme

Alle genannten Flussmittelsysteme weisen gemäß Herstellerangabe eine geringe Flussmittelaktivität entsprechend der Norm DIN EN 61190-1-1-Einstufung auf

[113]. Die verschiedenen Prüfanforderungen werden bei allen Lotpastensystemen bestanden.

Um die Zuverlässigkeit der gewählten Lotpasten unter Betauungseinfluss zu bewerten, wurde ein analoges Prüfkonzept wie in Abschnitt 5.1 gewählt. Dazu wurde ein Testlayout erstellt, bei dem auf einer Leiterplatte neben einer Kammstruktur mit 300 µm Leiterbahnbreite und -abstand auch reale Bauelemente in Form von SOL20-Bauelementen mit einem Rastermaß von 1,27 mm platziert wurden. Durch eine spezifische Layoutauslegung konnte bei den gehäuseten Bauelementen erreicht werden, dass benachbarte Anschlüsse ein, der Versorgung von 10 VDC entsprechendes, unterschiedliches Potential aufwiesen. Das Layout bei den SOL20- Bauelementen wird in Bild 39 gezeigt.

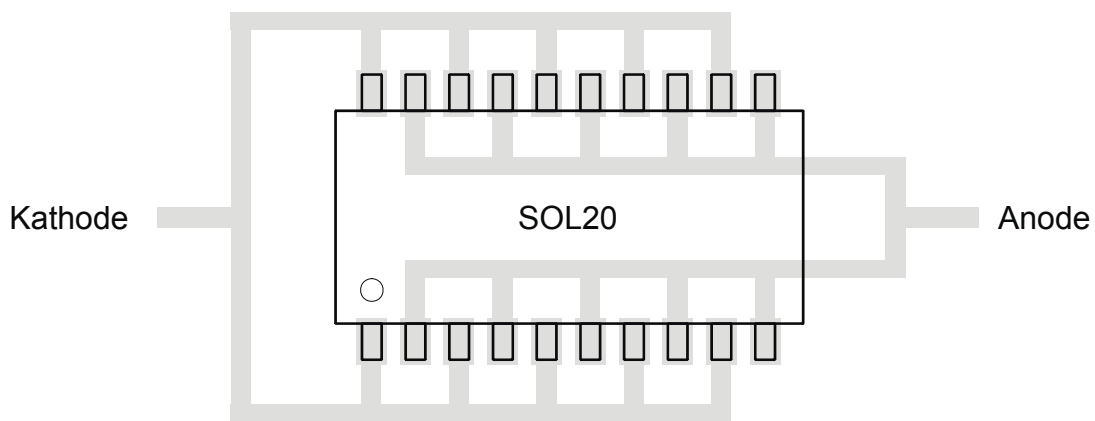


Bild 39: Layoutgestaltung bei den SOL20-Bauelementen

Im Gegensatz zu den standardisierten Prüflingen wurde hier ein FR4 Substrat mit Lötstopplack zwischen den Leiterbahnen und den Anschlussmetallisierungen verwendet. Der Aufbau der Prüflinge erfolgte in einem SMD-Prozess, bei dem nach dem Lotpastenauftrag im Schablonendruck die Bauelemente maschinell bestückt und anschließend im Reflowlötprozess gelötet wurden. Das Lötprofil wurde entsprechend der Herstellervorgaben für die verschiedenen Lotpastensysteme angepasst. Eine nachträgliche Reinigung der Baugruppen fand nicht statt. Die mittels Pipette und Dosiernadel aufgetragene Wassermenge wurde bei den SOL20-Bauelementen an das Rastermaß dahingehend angepasst, dass ein durchgängiger Film zwischen der lokalen Kathode und Anode der Bauelemente realisiert werden konnte. Durch die kontinuierliche Strommessung über einem zur Kammstruktur beziehungsweise dem Bauelement in Reihe geschalteten 1 kΩ Widerstand war eine detaillierte Auskunft über den genauen Ausfallzeitpunkt, bei dem es zu einem sprunghaften Anstieg des Stromes durch ECM kommt, gewährleistet. Neben der elektrischen Messung wurden die Prüflinge vor und nach der Prüfung visuell inspiziert. Versuche, bei denen bis zum vollständigen

Verdampfen des Wassertropfens kein Brückenwachstum durch ECM zu beobachten war, wurden als rechtszensierte Daten behandelt.

Eine Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass deutliche Zuverlässigkeitsunterschiede bei den getesteten Lotpastensystemen vorliegen. Während bei der Lotpaste C bei keinem der Versuche weder elektrisch noch visuell ECM detektiert werden konnte, zeigten die beiden anderen Lotpastensysteme ein unterschiedliches zeitliches Ausfallverhalten. Obwohl die Lotpaste A und die Lotpaste B nach ähnlichen Qualifikationsprüfungen spezifiziert sind, traten bei der Lotpaste A bei dem Tröpfchentest die frühesten Ausfälle auf. Auch wurden bei diesem Pastensystem die meisten Ausfälle identifiziert, wohingegen bei der Lotpaste B einige rechtszensierte Daten vorlagen. Dies war sowohl bei den Kammstrukturen als auch bei den Bauelementen zu beobachten. Analog der Theorie über die Beschleunigung des Fehlermechanismus der ECM durch die Feldstärke, kam es bei den Bauelementen aufgrund des größeren Anschlussabstandes zu späteren Ausfällen. Prinzipiell waren aber die Verhaltensunterschiede zwischen den Lotpastensystemen identisch. In Bild 40 werden die Ausfallwahrscheinlichkeiten der geprüften Lotpasten sowie deren optisches Erscheinungsbild am Beispiel der Kammstruktur dargestellt

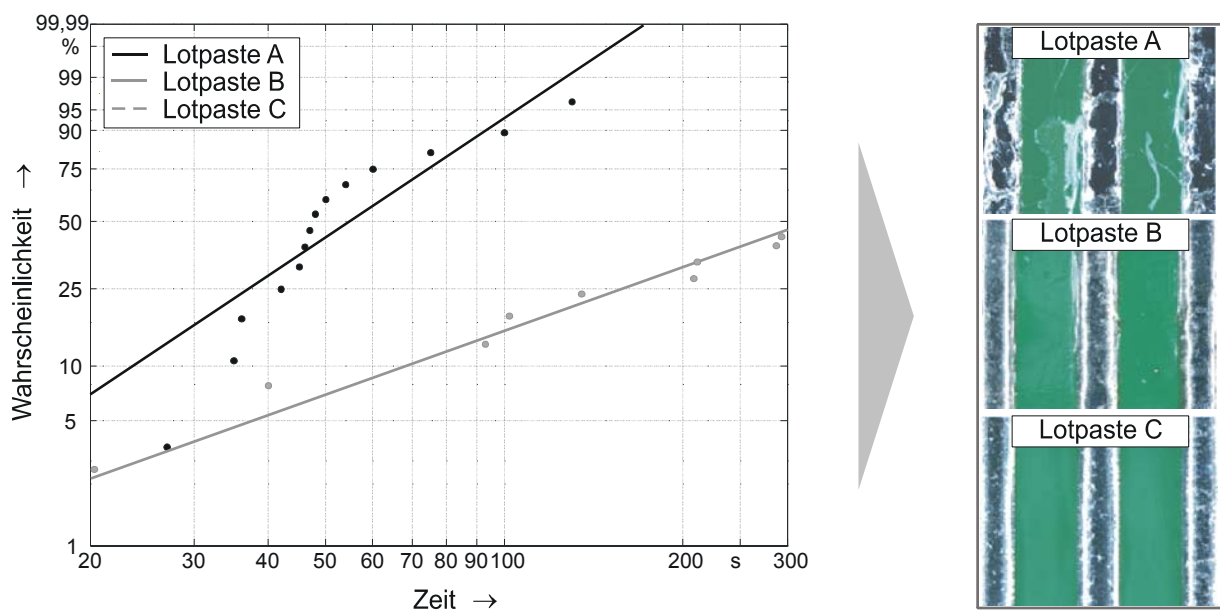


Bild 40: Ausfallwahrscheinlichkeit und Druckbild der Kammstrukturen mit unterschiedlichen Lotpastensystemen

Anhand der optischen Inspektion der Kammstrukturen konnte das elektrische Verhalten der jeweiligen Lotpastensysteme erklärt werden. Hier waren lokale Mikrorisse in der passivierenden Harzschicht zu erkennen, welche dazu dient, Flussmittelreste, welche während des Lötprozesses nicht vollständig verflüchtigt sind, einzuschließen. Dies bewirkt eine Zugänglichkeit des Elektrolyten zu Anode

und Kathode und damit eine Metallauflösung, eine Migration sowie eine Reduktion der Ionen an der Kathode. Angesichts der Tatsache, dass bei der Lotpaste C in keinem der Versuche Ausfälle aufgetreten sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Harzschuttschicht bei diesem Lotpastensystem äußerst kompakt und durchgängig ausgebildet ist. Dies deckt sich auch mit dem optischen Erscheinungsbild der Lotstellen bei den mikroskopischen Analysen.

Da häufig lokale Flussmittelreste das Ausfallverhalten elektronischer Baugruppen begünstigen, erfolgte ein chemischer Schnelltest, welcher mittels einer Farbreaktion carbonsäurebasierende Flussmittelreste visualisiert. Statt einer zu erwartenden Färbung bei den verschiedenen Lotpastensystemen konnten bei keiner der Leiterplatten auffällige Flussmittelreste nachgewiesen werden. Bild 41 zeigt am Beispiel der Lotstellen der Bauelemente deutlich, dass keine Verfärbung zu erkennen ist. Damit kann das unterschiedliche Verhalten nicht auf lokale Verunreinigungen zurückgeführt werden und die Ursachen können, wie eben beschrieben, in der Beschaffenheit der Harzschicht vermutet werden.

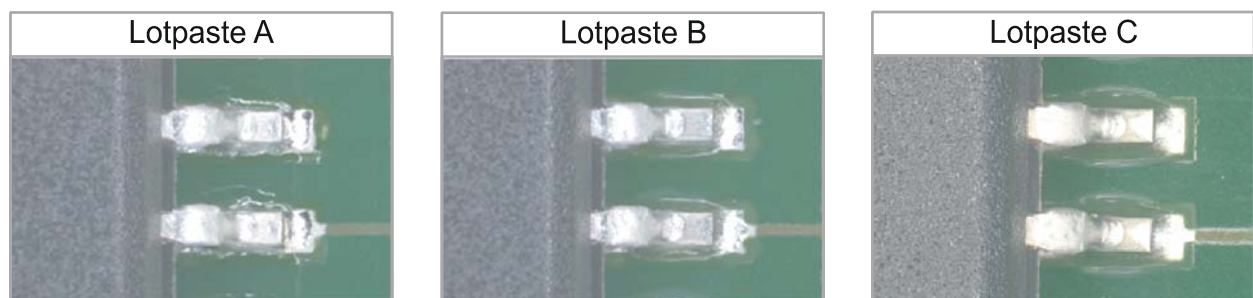


Bild 41: Prüfung auf Flussmittelreste an den SOL-Bauelementen

Ausgehend von den durchgeführten Versuchen kann als wesentliche Erkenntnis festgehalten werden, dass eine nach gängigen Standards spezifizierte Lotpaste unter geänderten Klimabelastungen ein deutlich anderes Verhalten aufweisen kann. Hier kann vor allem bei der Auswahl und der Qualifizierung alternativer Lotpastensysteme für einen Serienprozess der ergänzende Einsatz individueller Betauungsprüfungen empfohlen werden. Das vorgestellte Prüf- und Bewertungsvorgehen hat sich hierzu als aussagekräftig und effizient erwiesen.

5.3 Prüflingsüberwachung bei Feuchte-/Betauungsprüfungen

Die Umweltsimulation zur beschleunigten Lebensdauernachbildung stellt ein industriell etabliertes Verfahren dar. Hierbei werden die verschiedenen Prüfungen sowohl in der Entwicklung neuer Technologien und Materialien als auch zur Zuverlässigkeitsabsicherung marktreifer Produkte herangezogen. Grundlegend für die Analyse und Bewertung verschiedener Materialien, Prozesse und Technologien sowie für die Beurteilung der Wirksamkeit unterschiedlicher

Belastungen ist die kontinuierliche Überwachung der Prüflinge während der Versuche. Nur dadurch lassen sich temporäre Effekte oder belastungsspezifische Fehler identifizieren und deren Auftreten einem konkreten Zeitpunkt und einer definierten Belastung zuordnen. Für Prüfungen bei hoher Luftfeuchtigkeit stellt die in Abschnitt 3.2.3 bereits erwähnte SIR-Messung ein gängiges Verfahren zur Bewertung der Migrationsneigung alternativer Materialien und Technologien dar. Das wesentliche Defizit dieser Methode sind die geringen Messintervalle. Durch eine Abtastrate von einem Messwert je 20 Minuten kann ein Großteil der Informationen während der Prüfung verloren gehen. So können kurzzeitige Kurzschlüsse durch ECM nicht erfasst werden, sofern diese nicht zufällig in den Messzeitraum hineinfallen. Um diese Problemstellung für die nachfolgenden Untersuchungen zu lösen, wurde eine geeignete Messkette konzipiert. Hierbei wird jede Teststruktur beziehungsweise jedes Bauelement bei den Klimaprüfungen durch eine indirekte Strommessung kontinuierlich überwacht. Die Messsignale werden vor der Messdatenerfassung aufbereitet, mittels Analog-Digital-Wandler-Modulen der Firma National Instruments aufgezeichnet und abschließend vollautomatisiert mit einem individuell programmierten Softwaretool ausgewertet. Die konzipierte Messkette ist in Bild 42 dargestellt.

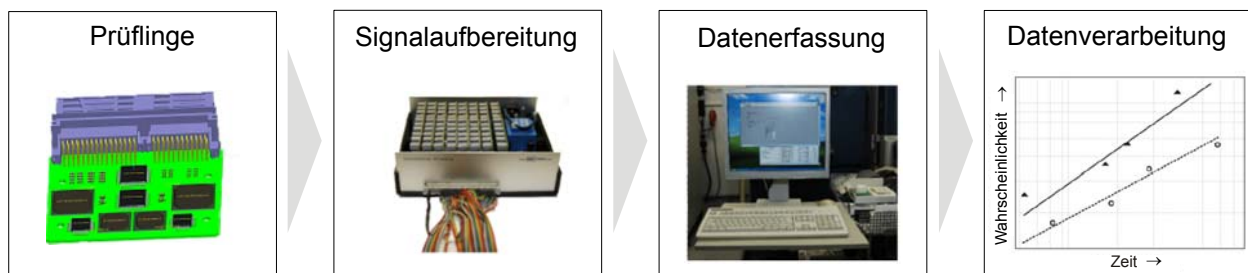


Bild 42: Messkette zur kontinuierlichen Überwachung der Prüflinge

Da die Fehlerbilder durch ECM und elektrolytische Kriechströme stets mit einer Abnahme des Oberflächenisolationswiderstandes und damit einem elektrischen Leckstrom verbunden sind, kann durch eine Strommessung der Zustand der Prüflinge überwacht werden. Dies geschieht über die Spannungsüberwachung an einem Präzisionswiderstand, wodurch nach dem ohmschen Gesetz der Strom rechnerisch ermittelt werden kann. Um eine thermische Überhitzung der metallischen Brücken bei einem Kurzschluss zu vermeiden, ist jeder Messkanal mit einem Widerstand R_1 von $1\text{ M}\Omega$ versehen. Bei einer Testspannung von 10 VDC ist damit der maximale Strom, der über einen Dendriten fließen kann, auf $10\text{ }\mu\text{A}$ limitiert. Der Spannungsabfall am nachfolgenden Messwiderstand R_2 wird über eine Operationsverstärkerschaltung verstärkt und anschließend mittels eines Filters mit Sallen-Key-Topologie von hochfrequenten Störeinflüssen aus

peripheren Geräten wie Klimakompressor oder Lüftern befreit. Bild 43 zeigt den Schaltplan für einen von insgesamt 80 Messkanälen.

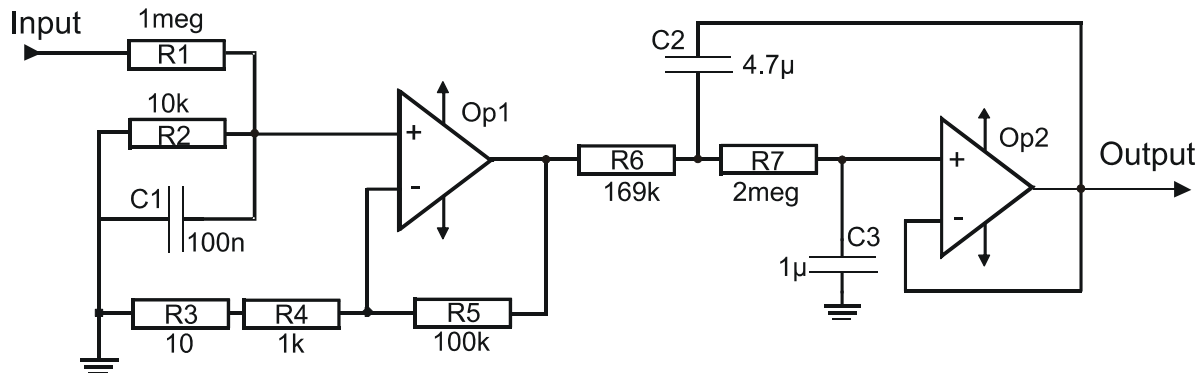


Bild 43: Schaltplan zur Signalaufbereitung

Neben der Signalerfassung enthält das Messmodul zudem eine stabilisierte 10 V Gleichspannungsquelle für die Versorgung der Prüflinge in der Kammer, wodurch eine externe Stromversorgung für die Experimente nicht mehr benötigt wird. Nachdem die Messsignale der Prüflinge verstärkt und gefiltert sind, werden diese analogen Signale von dem Messmodul NI USB 6225 der Firma National Instruments digitalisiert und die Daten auf dem Messrechner abgespeichert. Da für die geplanten Untersuchungen eine teilweise sehr lange Versuchsdauer berücksichtigt wurde, musste eine Methode entwickelt werden, mit der einerseits die Messdaten mit geringem Speicherbedarf gesichert werden und andererseits die Messdaten zwischengespeichert werden, um bei Störungen eine Datensicherheit zu gewährleisten. Mittels der Software LabView von National Instruments wurde ein Tool entwickelt, welches die erfassten Signale in binäre Datensätze definierter Größe sequentiell abspeichert. Eine grafische Benutzeroberfläche erlaubt eine einfache Konfiguration hinsichtlich der Anzahl der in einem Datensatz abzuspeichernden Messwerte, der Abtastrate und der Anzahl der zu speichernden Datensätze. Anschließend werden die einzelnen Daten weiterverarbeitet. Hierzu wurde ein Programm mit der Software MATLAB der Firma The Mathworks erstellt, mit dem die Messdaten eingelesen und verarbeitet werden können. Das Programm, welches über eine grafische Benutzeroberfläche bedient werden kann, erlaubt dem Benutzer neben der Visualisierung der Messdaten zudem das Anlegen und Laden von Versuchskonfigurationen, die Speicherung der Messdaten mit reduziertem Speicherbedarf, die Auswertung der Messdaten mit individuell angepassten Ausfallkriterien sowie die statistische Analyse der Messdaten. Durch einen dynamischen Datenreduktionsalgorithmus, welcher ausgehend von den Tendenzen des Signalverlaufs die Datengenauigkeit anpasst, wird eine Datenkomprimierung von 99,5 % erreicht, ohne wichtige Detailinformationen im Signal zu verlieren. Hierzu wird durch den Algorithmus sukzessive die

Steigung des Signalverlaufs analysiert. Wird ein definierter Grenzwert der Steigung überschritten, so erfolgt eine Datenaufzeichnung der Originalwerte ohne Datenreduktion. Befindet sich die Steigung unterhalb des Grenzwertes, kann die Aufzeichnungsgenauigkeit benutzerspezifisch herabgesetzt werden. Um die Funktion der konzipierten Messkette zu überprüfen, wurde eine einfache Kammstruktur mit 200 μm Leiterbahndicke und -abstand für 72 Stunden einer individuellen zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung mit einem Temperaturgradienten von 0,75 K/min und einer konstanten Luftfeuchtigkeit von 93 % ausgesetzt. In Bild 44 ist der Stromverlauf über den gesamten Versuchszeitraum und der detaillierte Zeitabschnitt bei Ausbildung eines metallischen Dendriten, welcher auch optisch nachweisbar war, dargestellt. Zudem ist in der Detailansicht schematisch der Temperaturverlauf eingezeichnet, um dem Ausfallzeitpunkt und die Ausfalldauer einer definierten Belastung zuordnen zu können.

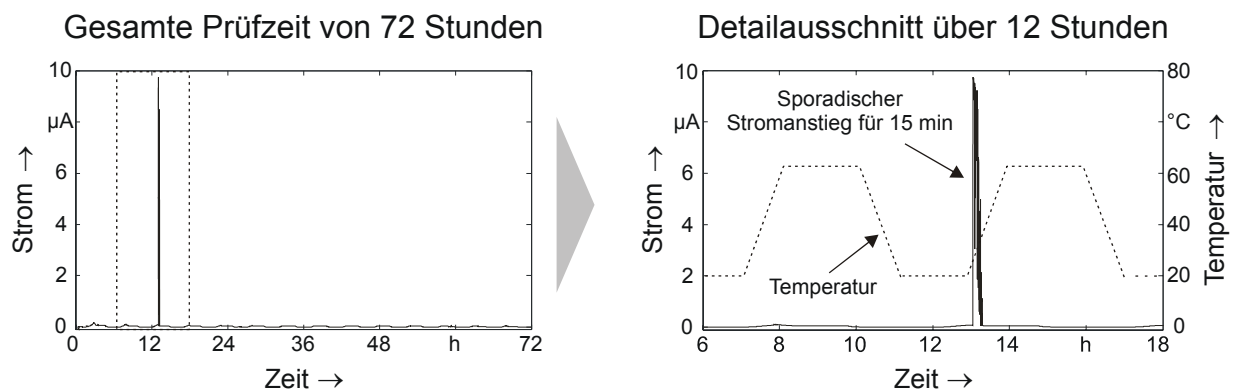


Bild 44: Verifikation der konzipierten Messkette am Beispiel eines sporadischen Ausfalls bei einer zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung

Mit Hilfe der entwickelten Messkette zur kontinuierlichen Überwachung von Prüflingen im Rahmen der Umweltsimulation ist ein ganzheitliches Werkzeug zur Verfügung gestellt, welches nicht nur für Feuchte- und Betauungsprüfungen, sondern für jede Art von Prüfungen eingesetzt werden kann, bei dem ein Spannungssignal bis maximal 10 VDC als Ausgangsgröße gegeben ist. Damit wurde eine Grundlage geschaffen, um sowohl Belastungsarten als auch Technologien, Materialien oder sonstige Einflussparameter im Rahmen von zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen quantitativ und qualitativ vergleichen und bewerten zu können. Eine optische Analyse der Prüflinge hinsichtlich der Bildung metallischer Dendriten nach jeder Versuchsreihe ergänzt die elektrischen Messreihen [81].

5.4 Migrationsneigung bleifreier Oberflächenpassivierungen

Die Elektronikproduktion von heute wird, wie nahezu alle wirtschaftlichen Bereiche unserer Gesellschaft, getrieben von den Anforderungen nach hoher Qualität zu geringen Kosten und möglichst kurzen Prozesszeiten. In diesem Zusammenhang und im Zuge der Umstellung auf umweltfreundliche Produkttechnologien werden bei der Leiterplattenherstellung verschiedene Oberflächenbeschichtungen angeboten. Aufgabe dieser Schichten ist im Wesentlichen der Korrosionsschutz der Kupferleiterzüge und -pads sowohl für die Erfüllung der Lötbarkeitsanforderungen als auch zur Zuverlässigkeitssteigerung der Leiterplatten am Einsatzort. Diese Passivierungsschichten werden von den Baugruppenherstellern unter den Aspekten Kosten, Koplanarität, Optik, mechanische Festigkeit oder Verarbeitbarkeit ausgewählt. Da aber diese metallischen und organischen Schichten ebenso den einwirkenden Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, und etwa an Testpunkten freiliegend ohne Lotstopplack vorzufinden sind, stellt sich die Frage nach deren Robustheit unter Betauungseinfluss. Aus diesem Grund wurde bei den Oberflächenbeschichtungen Nickel/Gold (NiAu), chemisch Zinn (Sn), chemisch Silber (Ag) und der organischen Passivierung OSP (Organic Solderability Preservative) die Migrationsneigung dieser häufig verwendeten Beschichtungen bei unterschiedlichen klimatischen Belastungen untersucht.

Da sich sowohl aus den Voruntersuchungen als auch aus der industriell etablierten Vorgehensweise bei den SIR-Tests die Verwendung von ineinandergreifenden Kammstrukturen mit unterschiedlichem Abstand als geeignet erwiesen hat, wurde in einem ersten Schritt ein Prüflayout festgelegt. Dabei wurden auf einer FR4 Leiterplatte mit den Abmessungen 100 mm x 160 mm jeweils zwei Kammstrukturen mit 200 µm, 300 µm und 400 µm Leiterbahnbreite und -abstand platziert. Daraus ergeben sich bei einer Testspannung von 10 VDC Feldstärken von 55 kV/m, 33 kV/m und 25 kV/m. Ein Lötstopplack wurde nicht eingesetzt. Um die Messsignale abzugreifen, wurde ein oberflächenmontierter 15-poliger Stecker am Rand der Leiterplatte positioniert. Zwischen jeder Messleitung dient eine zusätzliche Leiterbahn als Schirmleitung. Die 35 µm starken Kupferleiterzüge waren mit den bereits genannten Oberflächenschichten passiviert. Eine Reinigung der Leiterplatten ist nicht durchgeführt worden. Als Prüfverfahren wurden zwei zyklische Temperatur-Feuchte-Prüfungen ausgewählt, welche sich einerseits in den Temperaturgradienten und andererseits auch abschnittsweise in den Temperaturbereichen unterscheiden. Bei dem Prüfprofil A handelt es sich um ein nach der Norm DIN EN 60068-2-38 standardisiertes Prüfverfahren, bei dem innerhalb von 24 Stunden zwei Temperaturanstiege von 25 °C auf 65 °C und ein Temperaturanstieg von -10 °C auf 25 °C bei konstanter Luftfeuchtigkeit von 93 °C stattfindet. Unterhalb von 10 °C findet keine Regelung der relativen Luftfeuchtig-

keit statt [109]. Das Prüfprofil B wurde individuell konzipiert. Es unterscheidet sich im Wesentlichen durch einen höheren Temperaturgradienten von 0,75 K/min von 20 °C auf 65 °C bei einer konstanten Luftfeuchtigkeit von 93 %. In Bild 45 sind die Testplatine sowie die beiden Prüfprofile für den Vergleich der Klimabeständigkeit der verschiedenen Oberflächenmetallisierungen dargestellt. Die kontinuierliche Überwachung der einzelnen Kammstrukturen erfolgte mit der in Abschnitt 5.3 vorgestellten Messkette. Als Ausfallkriterium wurde ein Stromanstieg über 1 μA definiert. Relevant bei der Auswertung war stets nur der erste Ausfall.

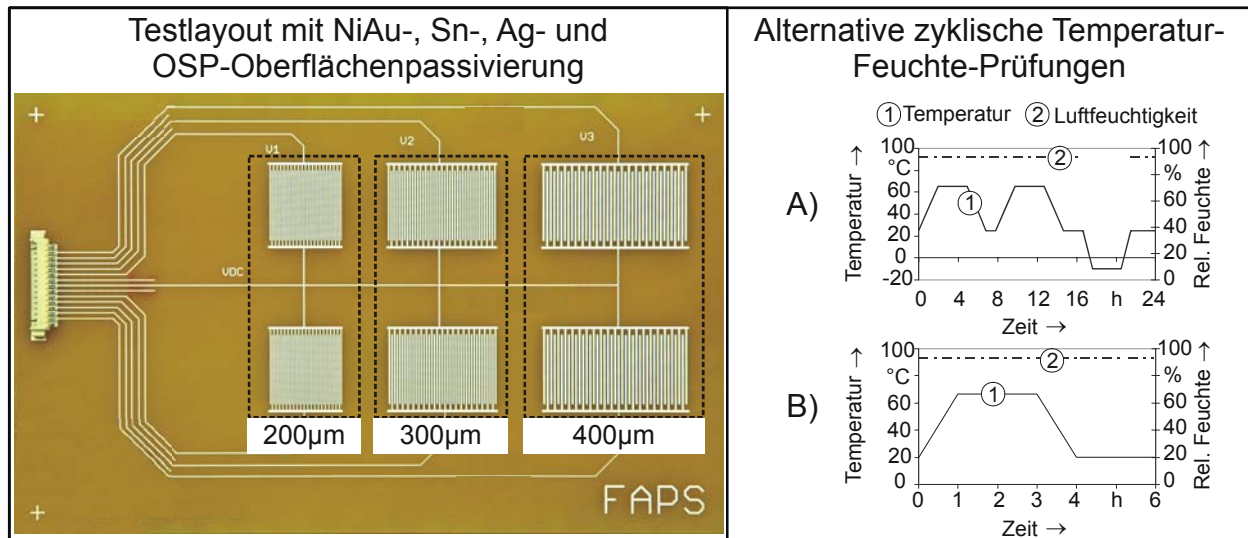


Bild 45: Testplatine und Klimakammerprofile für die Robustheitsbewertung unterschiedlicher Oberflächenmetallisierungen

Bei der Inspektion der Versuchsergebnisse mit dem Prüfprofil A hat sich gezeigt, dass eine Reihe von Ausfällen während einer Testdauer von 240 Stunden aufgetreten sind. Besonders auffällig bei diesem Versuchsdurchgang war, dass keiner der Prüflinge mit der OSP Passivierung im Test elektrische Auffälligkeiten zeigte. Dies bestätigten auch die optischen Analysen. Bei einer detaillierten Betrachtung der Ausfallzeitpunkte aller getesteten Kammstrukturen konnte festgestellt werden, dass über 50 % aller Ausfälle innerhalb der ersten 24 Stunden aufgetreten sind, wobei bei über der Hälfte davon Leckströme bei dem Temperaturanstieg von -10 °C auf 25 °C identifiziert wurden. Da sich bei niedriger Temperatur und gleicher relativer Luftfeuchtigkeit absolut gesehen weniger Wassermasse in der Klimakammer befindet, muss der Grund für die vermehrten Ausfälle in dem steileren Temperaturgradienten liegen. Dadurch kondensiert mehr Wasser an der Oberfläche der Leiterplatte, wodurch das Dendritenwachstum durch ECM begünstigt wird. Bereits nach 48 Stunden waren 70 % aller detektierten Ausfälle eingetreten.

Analysiert man die elektrischen Auffälligkeiten aus 300 Stunden zyklischer Temperatur-Feuchte-Belastung mit dem Prüfprofil B, so zeigt sich, dass auch bei diesem Test innerhalb der ersten 24 Stunden 55 % aller Ausfälle aufgetreten sind. Signifikant bei diesem Testdurchlauf war, dass die Testplatinen mit der organischen Metallisierung bei allen Leiterbahnabständen besonders häufig und frühzeitig durch elektrische Kurzschlüsse auffällig waren. Weiterführende Analysen nach Abschluss der Messreihen und der mikroskopischen Untersuchungen haben gezeigt, dass hierbei das unter der Passivierung liegende Kupfer von der Kathode zur Anode migrierte. Aufgrund der Tatsache, dass bei dem individuellen Prüfprofil der steilste Temperaturgradient vorlag, kann davon ausgegangen werden, dass eine materialspezifische kritische Kondensatmenge vorlag, wodurch das Brückenwachstum des Kupfers unter der Passivierung initiiert wurde.

Im Gegensatz zu der organischen Oberflächenpassivierung zeigten die anderen Metallisierungen bei beiden Prüfprofilen Auffälligkeiten. Vergleicht man die Ausfallzeitpunkte einer Oberfläche bei unterschiedlichen Feldstärken beziehungsweise die verschiedenen Metallisierungen bei gleicher Feldstärke, so lässt sich bei keiner der applizierten Prüfbelastungen eine eindeutige Aussage über die Robustheit der betrachteten Versuchsvarianten treffen. Obwohl aus theoretischer Sicht bei höheren Feldstärken frühere Ausfälle erwartet wurden, konnte dies nur bei der Silbermetallisierung im Prüfprofil A nachgewiesen werden. Um diese Tatsache zu verdeutlichen, ist in Bild 46 die mittels Weibullanalyse ermittelte charakteristische Lebensdauer der einzelnen Oberflächen bei den jeweiligen Leiterbahnabständen dargestellt. Hierbei wurde für die Auswertung jeder positive Temperaturgradient als ein Zyklus betrachtet. Weiterhin ist der Abbildung zu entnehmen, dass kein Passivierungsmaterial eine eindeutig nachweisbare erhöhte Robustheit im Vergleich zu den anderen getesteten Beschichtungen aufweist. Ausgenommen ist die organische Beschichtung, welche bis zu den Belastungen in Prüfprofil A eine Brückenbildung durch elektrochemische Migration verhindert hat. Deutlich erkennbar ist allerdings, dass das Prüfprofil B die höhere Belastung darstellt, da abgesehen von der Zinn- und Nickel/Gold-Metallisierung mit einem Leiterbahnabstand von 200 µm, hier Ausfälle früher auftreten als bei dem Prüfprofil A.

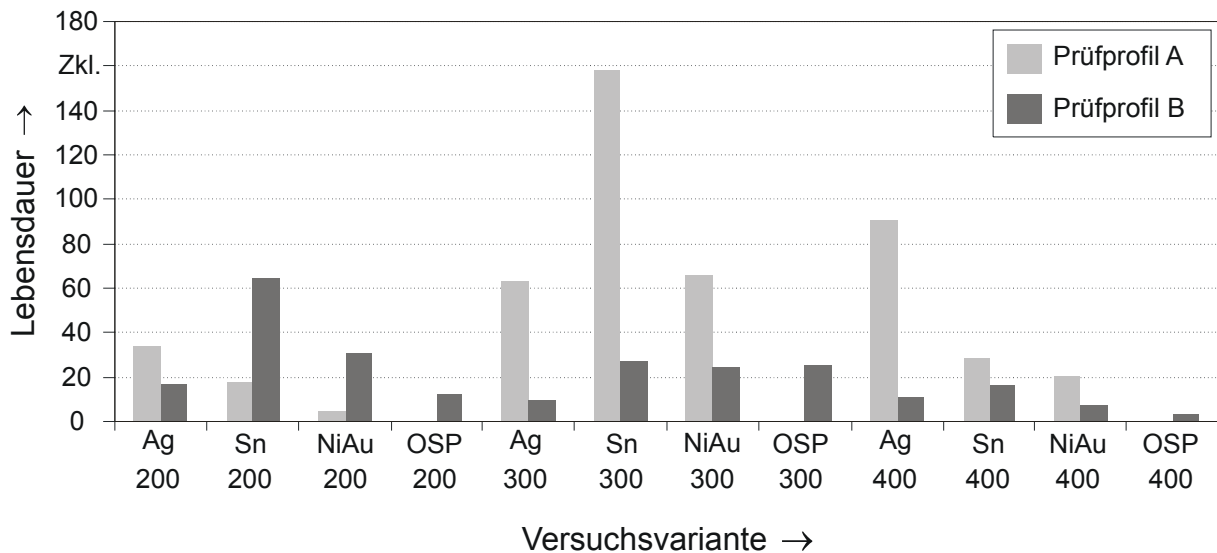


Bild 46: Charakteristische Lebensdauer der Oberflächenpassivierungen bei Prüfprofil A und Prüfprofil B

In einem nächsten Schritt fand der Abgleich der elektrischen Messungen und der optischen Untersuchungen statt. Dabei konnten verschiedene Fehlerarten nachgewiesen werden, wobei diese unabhängig von der Oberflächenpassivierung und der Belastungsart ermittelt wurden. Neben einem einzelnen kurzzeitigen Ausfall und zyklisch wiederkehrenden sporadischen Ausfällen mit optischem Dendritennachweis konnten darüber hinaus temporäre Stromerhöhungen ohne optischen Nachweis sowie statische Stromerhöhungen mit optischem Nachweis festgestellt werden. Die verschiedenen elektrischen Fehlerarten mit und ohne optischen Nachweis sind in Bild 47 dargestellt. Auch wenn diese Fehlerarten im Allgemeinen keinen spezifischen Materialien und Belastungen zugeordnet werden können, so konnte festgestellt werden, dass bei der Silberpassivierung die meisten statischen Stromerhöhungen aufgetreten sind. Da keine der durchgeführten Prüfungen bei einzelnen Ausfällen unterbrochen wurde, um die Fehlerart zu überprüfen, kann keine Aussage darüber getroffen werden, ob nicht etwa eine reine Feuchteadsorption ohne Dendritenbildung für den ersten Ausfall verantwortlich war. Allerdings haben die Versuche gezeigt, dass der Effekt der ECM primär in den Temperaturanstiegsphasen der Prüfungen stattfindet. Es wurden keine Stromerhöhungen in den Haltezeiten bei konstanter Temperatur detektiert. Anhand der eruierten Fehlerarten kann abgeleitet werden, dass eine reine Wasseranlagerung auf elektronischen Steuergeräten ohne Ausbildung metallischer Dendriten durchaus eine Funktionsstörung verursachen kann, ohne dass ein optischer Nachweis des ursächlichen Fehlermechanismus erbracht werden kann. Dies kann allerdings nur bei Schaltungsbereichen erwartet werden, bei denen Leckströme von wenigen Mikroampere eine Störung bewirken.

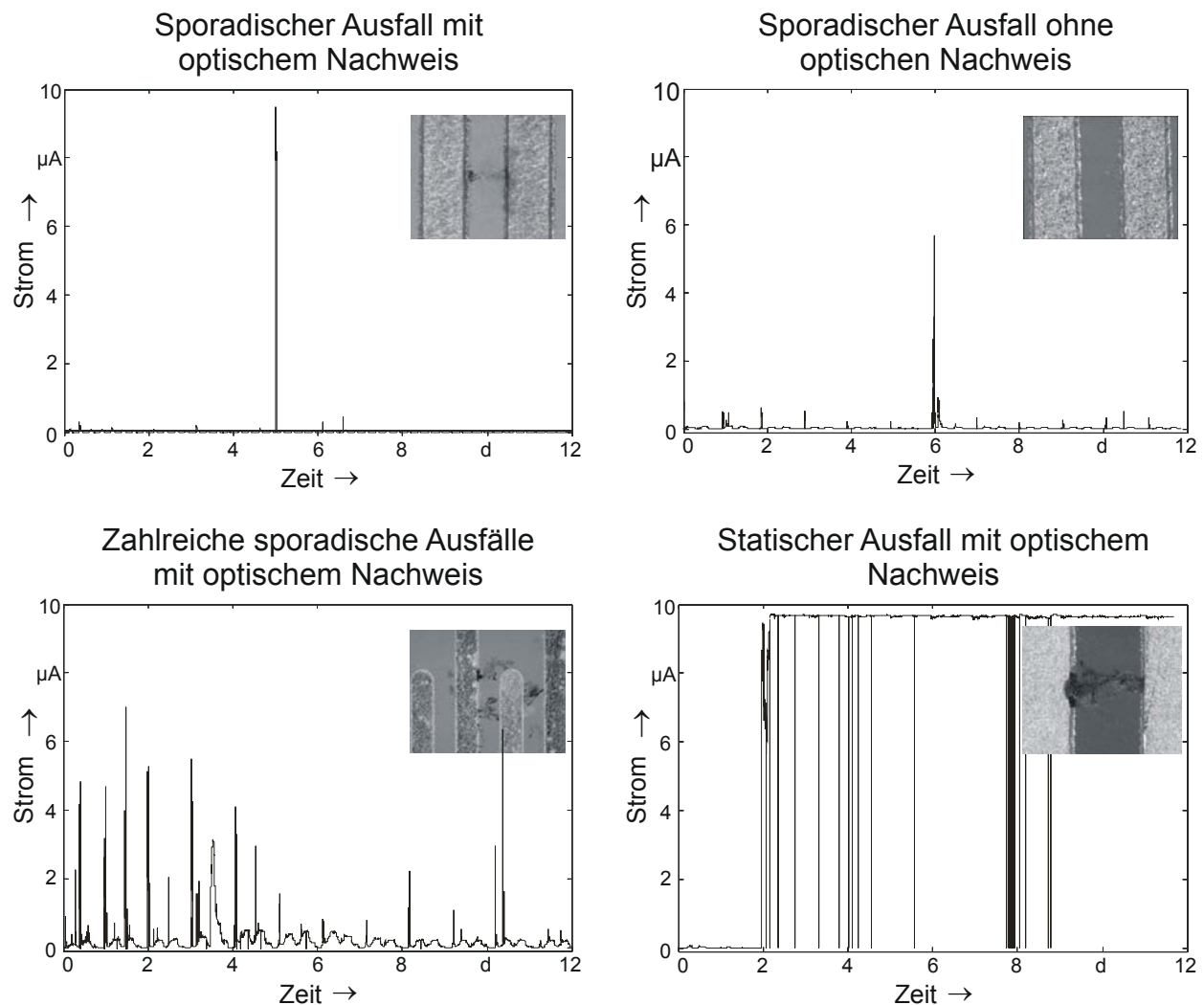


Bild 47: Ausfallarten bei zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen

Um weitere Aussagen über den Einfluss des Bewertungskriteriums zu treffen, wurde zum Abschluss der Versuche eine Variation des Ausfallkriteriums durchgeführt. Hierzu wurden je Prüfprofil die Anzahl der ausgefallenen Kammstrukturen bei unterschiedlichen Ausfallkriterien erfasst und bewertet. Es fand keine Separation nach Oberflächenbeschichtung statt, sondern es wurden alle 72 Kammstrukturen je Versuchsdurchlauf für die Auswertung herangezogen. Dabei konnte festgestellt werden, dass eine Erhöhung der ausfallrelevanten Stromschwelle bei beiden Prüfprofilen zu einer Abnahme der insgesamt detektierten Ausfälle geführt hat. So reduzierte sich beispielsweise bei dem Prüfprofil B die Anzahl ausgefallener Kammstrukturen bei einem Ausfallkriterium von $1 \mu\text{A}$ von 61 auf 27 bei einem Ausfallkriterium von $9 \mu\text{A}$. Ergänzend zu den Erkenntnissen aus der Lebensdauerbetrachtung der verschiedenen Oberflächenbeschichtungen zeigt sich aus dem Vergleich der ausgefallenen Kammstrukturen der beiden Prüfprofile bei gleichen Bewertungskriterien, dass das Prüfprofil B

mehr Ausfälle bewirkt und damit eine höhere Belastung darstellt [82]. Bild 48 verdeutlicht dies anschaulich.

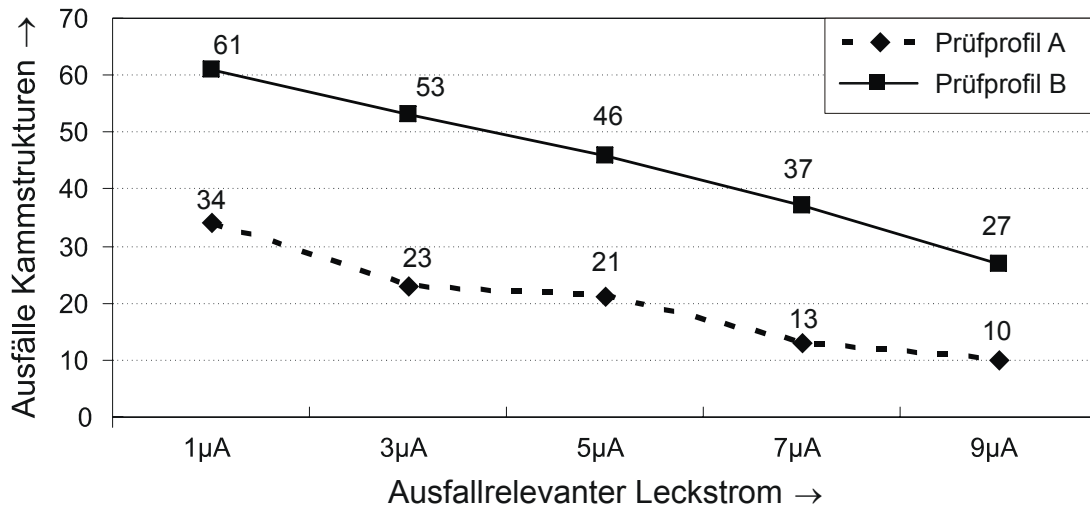


Bild 48: Variation des Ausfallkriteriums und die sich daraus ergebende Anzahl ausgefallener Kammstrukturen

Zusammenfassend kann aus der Untersuchung abgeleitet werden, dass der Einfluss der Oberflächenpassivierung als sekundär bei der Zuverlässigkeitssteigerung elektronischer Baugruppen bei einer Betauungseinwirkung betrachtet werden kann. Abgesehen von der organischen Beschichtung, welche bis zu einer spezifischen Belastungsgrenze keine Fehler zeigte, konnte keine Passivierung identifiziert werden, welche unter beiden Prüfbelastungen eine erhöhte Robustheit aufweist. Weiterhin konnte nachgewiesen werden, wie relevant der Stellenwert des Ausfallkriteriums bei zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen ist. Daher empfiehlt es sich, sowohl den Schärfegrad der Belastung als auch das Ausfallkriterium bei der Materialauswahl an die Anforderungen der vorgesehenen Anwendung anzupassen. Eine für die Praxis äußerst relevante Information stellt die Erkenntnis hinsichtlich möglicher Fehlerarten dar. So konnte in den Versuchen gezeigt werden, dass neben sporadischen und statischen Fehlern mit optischem Nachweis auch Fehler ohne visuell sichtbare Rückstände auftreten können. Insbesondere bei der Fehleranalyse von elektronischen Systemen aus dem Kundenumfeld können die gewonnenen Erkenntnisse Aufschluss über mögliche Fehlerursachen geben.

5.5 Bauelementabhängige Betauungsrobustheit

Komplexe elektronische Systeme sowohl im Automobil als auch in anderen Anwendungsgebieten enthalten ein vielseitiges Bauelementspektrum zur Realisierung spezifischer Funktionalitäten. Dazu zählen unter anderem integrierte Schaltkreise in verschiedenen Gehäusevarianten, unterschiedliche Steckverbindertechnologien sowie passive Bauelemente wie Widerstände, Spulen und Kondensatoren. Gerade die zuletzt genannten Kondensatoren, welche heutzutage vorwiegend als Vielschicht-Chipkondensatoren (MLCC- Multi Layer Chip Capacitors) unterschiedlicher Bauform auf elektronischen Baugruppen zu finden sind, zeigen im Rahmen der Umweltsimulation häufig Spuren metallischer Dendriten. Gerade bei funktionsrelevanten Kondensatoren werden dadurch Störungen oder Ausfälle verursacht. Da bei einigen Prüfungen teilweise nur einzelne Kondensatoren auffallen, obwohl baugleiche Typen gleicher oder anderer Hersteller auf identischem Potential in unmittelbarer Umgebung platziert sind, die keine Migration zeigen, stellt sich die Frage nach möglichen Ursachen für dieses Phänomen.

Um die Fragestellung bezüglich einer hersteller- und baugrößenabhängigen Betauungsrobustheit von Keramikkondensatoren zu beantworten, wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem baugrößen- und kapazitätsgleiche Kondensatoren von drei verschiedenen Herstellern einer Betauungsprüfung ausgesetzt und deren Ausfallverhalten bewertet wurde. Hierzu wurden von drei Herstellern Kondensatoren der Klasse 2 vom Typ X7R mit den internationalen Baugrößencodierungen 0402 (1,0 mm x 0,5 mm), 0603 (1,6 mm x 0,8 mm), 0805 (2,0 mm x 1,2 mm) und 1206 (3,2 mm x 1,6 mm) verwendet. Gemäß Herstellerangaben besitzen alle Bauelemente die gleiche Keramik. Um bei diesen Kondensatoren auf kleinstem Bauraum hohe Kapazitätswerte zu erzielen, werden diese aus ferroelektrischen Materialien wie Bariumtitanat (BaTiO_3) sowie geeigneten Zusatzstoffen wie Aluminium-Silikate, Magnesium-Silikate und Aluminiumoxide hergestellt. Die Dielektrizitätskonstanten betragen hier zwischen 700 und 10000. Sie weisen keine Alterungseffekte und genau definierte Temperaturkoeffizienten auf [56][72][88][160].

Analog den vorangegangenen Untersuchungen erfolgte zunächst die Gestaltung und Auslegung einer geeigneten Testbaugruppe, die einerseits für die Anwendung des Tröpfchentests gemäß Abschnitt 5.1 als auch für eine zyklische Temperatur-Feuchte-Prüfung in einer Klimakammer geeignet sind. Unter Berücksichtigung dieser Randbedingungen wurde ein Testlayout entworfen, bei dem Bestückungspads für die Baugrößen 0402, 0603, 0805 und 1206 vorgesehen waren. Die Leiterzüge wurden so gestaltet, dass je Baugröße ein Block mit zehn und ein Block mit acht parallel geschalteten Kondensatoren auf der Platine vorzufinden ist. Für jeden Block wurde ein Messsignal ausgegeben. Durch diese

Anordnung ist es einerseits möglich, die Ausfallwahrscheinlichkeit einer Baugröße für die Klimakammerversuche zu erhöhen und andererseits durch sequentielles Entfernen eines getesteten Kondensators im Tröpfchenversuch die Testplatten für beide Versuchsmethoden zu verwenden. Nach der Layoutgestaltung und der Leiterplattenherstellung wurden je Hersteller 10 Muster mit den entsprechenden Kondensatoren bestückt und in einem bleifreien Reflowlötprozess verlötet. Es wurde bei allen Baugruppen ein Lötstopplack verwendet. Bei den Versuchen wurde eine Testspannung von 10 V eingesetzt. Durch die in Reihe geschalteten Messwiderstände ergab sich eine kapazitätsabhängige Ladezeit für die parallel verschalteten Keramikkondensatoren. Da nach Erreichen dieser Ladezeit über den Bauelementanschlüssen die Versorgungsspannung anliegt, stellt der Kapazitätswert der Kondensatoren eine zu vernachlässigende Größe dar. Für die anschließenden Versuchsreihen wurde ein Stromanstieg von über einem 1 μA als Ausfallkriterium definiert. Im Rahmen der anschließenden statistischen Auswertungen wurden nur die Bauelementgrößen 0402 und 0603 herangezogen, da ausschließlich für diese Baugrößen eine ausreichende Anzahl an Ausfällen für alle Hersteller aus den beiden Versuchen vorlag.

Entsprechend dem Vorgehen aus Abschnitt 5.1 und 5.2 erfolgte auch bei diesen Testobjekten der sequentielle Tröpfchenauftrag mittels Pipette und Dosiernadel auf die Oberseite jeweils eines Kondensators. Die Wassermenge wurde an die entsprechenden Baugrößen der Kondensatoren angepasst, wobei stets darauf geachtet wurde, dass kein Wasser neben oder unter die Bauelemente gelangte. Dadurch wurden parasitäre Effekte durch Flussmittelreste aus dem Lötprozess, welche das Ausfallverhalten und damit die Ergebnisbewertung beeinflussen können, vermieden. Anschließend wurde die Zeit bis zum sprunghaften Anstieg des Stromes gemessen. Ein Testende war dann erreicht, wenn elektrische Leckströme aufgetreten sind oder wenn nach etwa 300 s die aufgetragene Wassermenge verdunstet war. Eine Analyse der Ausfallzeiten des Tröpfchentests hat einerseits ergeben, dass es deutliche Zuverlässigkeitsunterschiede zwischen den Herstellern gibt, und dass andererseits die Feldstärke bei den Kapazitäten nicht der ausschließlich dominierende Einflussfaktor ist. Wie in Bild 49 erkennbar ist, waren die Kondensatoren des Herstellers C sowohl bei der Baugröße 0402 als auch der Baugröße 0603 am stärksten von ECM betroffen. Hierbei sind die frühesten Ausfälle innerhalb der Testzeit aufgetreten und es liegt demnach die höchste Ausfallwahrscheinlichkeit vor. Hersteller A und Hersteller B weisen für beide Baugrößen eine geringere Ausfallwahrscheinlichkeit auf, wobei mit den Kondensatoren von Hersteller A bei den Baugrößen 0402 bessere Ergebnisse erzielt werden konnten als mit denen von Hersteller B. Dieser Effekt kehrte sich bei der Baugröße 0603 um. Der nahezu parallele Verlauf der Geraden in der Weibulldarstellung in Bild 49 weist auf einen identischen Fehlermechanismus bei den Kondensatoren der verschiedenen Hersteller hin.

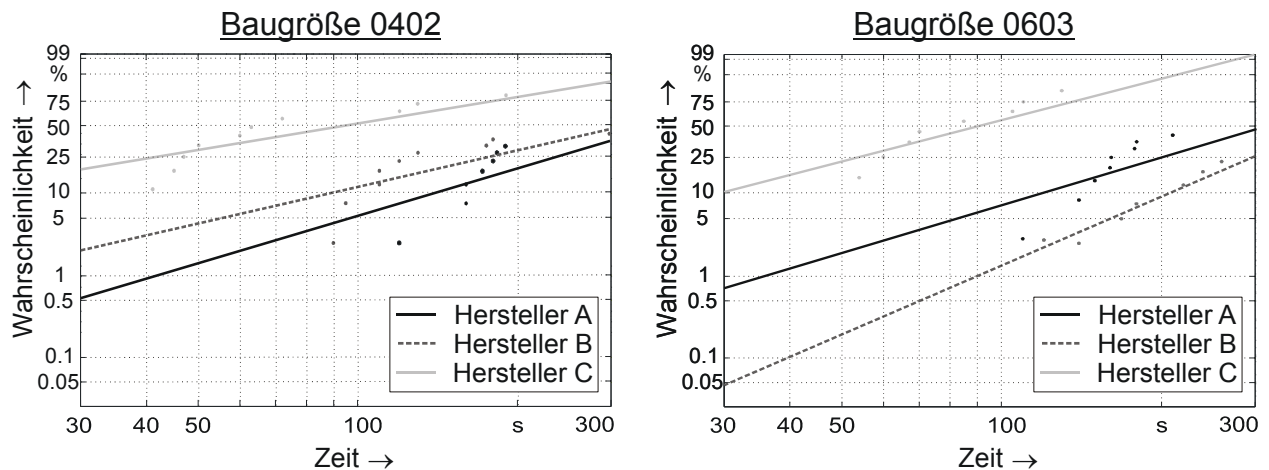


Bild 49: Ausfallverhalten der Baugrößen 0402 und 0603 im Tröpfchentest

Diese unterschiedliche Zuverlässigkeit wird darauf zurückgeführt, dass der minimale Abstand der Anschlusskappen der Kondensatoren von Hersteller B bei der Baugröße 0603 im Durchschnitt um etwa 150 μm größer ist als bei denen des Herstellers A, wodurch der Einflussfaktor der Feldstärke bei dem Effekt der ECM stärker zum Tragen kommt. Bei den Baugrößen 0402 beträgt der Abstandsunterschied circa 50 μm . Hierzu zeigt Bild 50 eine exemplarische Einzelmessung bei den 0402 Bauelementen sowie die Mediane und die entsprechenden 25% / 75%-Quartile aus jeweils 10 Einzelmessungen der Bauelementkappenabstände.

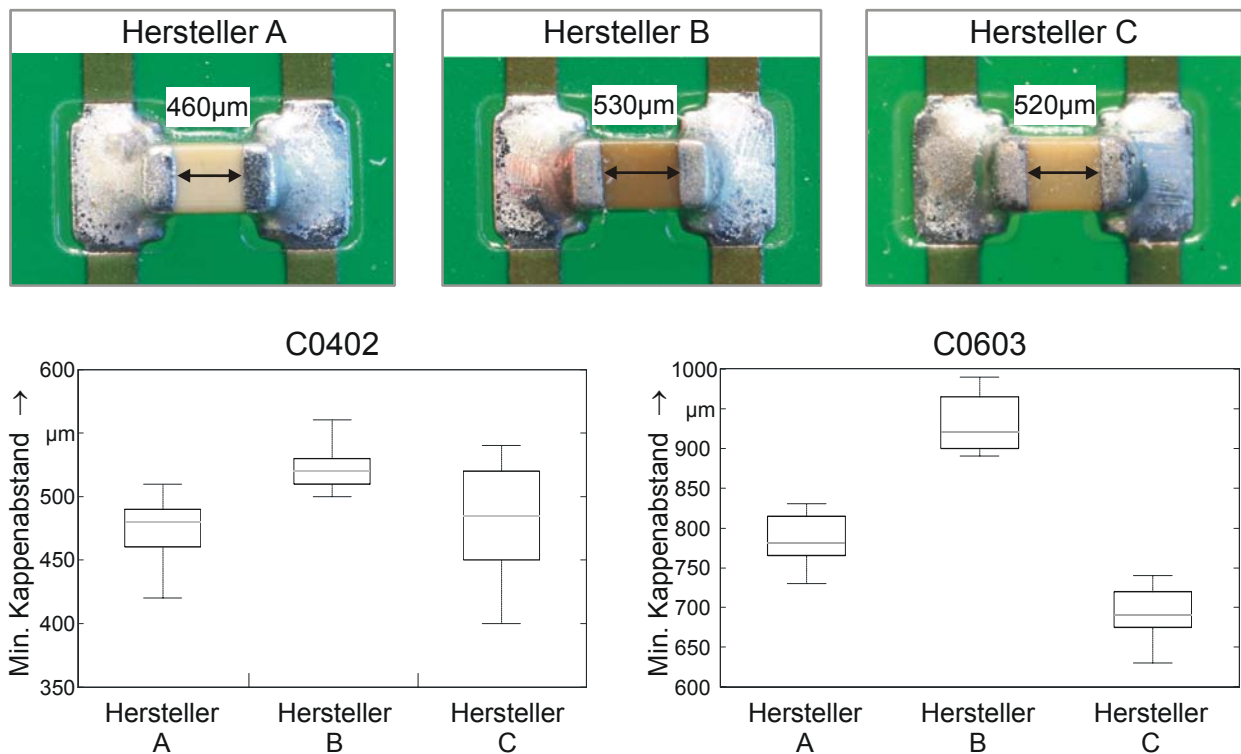


Bild 50: Exemplarische Einzelmessung an den 0402 Bauelementen und daraus ermittelte Mediane der minimalen Kappenabstände

Dass die Feldstärke nicht der allein dominierende Faktor ist, wird dadurch deutlich, dass die Kondensatoren des Herstellers C am frühesten ausfielen, obwohl diese bei der Baugröße 0402 nicht den geringsten Kappenabstand ausweisen.

Weitere Einflussgrößen, welche eine Dendritenbildung auf den Keramikkondensatoren beeinflussen können, sind die Oberflächenrauigkeit, die Reinheit der Keramikoberfläche, die maßgeblich durch die Fertigungsprozesse beim Bauelementhersteller bestimmt wird, und die Phasenübergangsqualität von Anschlussmetallisierung und Keramikmaterial. Das migrierende Material ist vorwiegend Zinn, welches für die Metallisierung der Bauteilanschlüsse verwendet wird, wobei vereinzelt auch Bestandteile der Lotlegierung in den Migrationsprodukten vorhanden sind.

Ergänzend zu den Versuchen mit der Tröpfchenmethode wurden identische Prüflinge einer zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung gemäß der Norm DIN EN 60068-2-38 ausgesetzt und analog der bereits vorgestellten Messmethode überwacht. Abweichend zum Standardvorgehen bei der Prüfung wurde in jedem Zyklus eine Frostphase durchgeführt. Wie bereits angedeutet, wurde durch die parallele Anordnung mehrerer Kondensatoren bei einem Messkanal die Ausfallwahrscheinlichkeit erhöht. Je Hersteller wurden vier Testleiterplatten zentral im Klimaschrank platziert. Diese waren in einem Kunststoffträger untereinander angeordnet und über geschirmte Messleitungen mit der Messeinrichtung verbunden. Analog den vorangegangenen Untersuchungen war der Ausfall einer Baugrößengruppe durch einen Stromanstieg über $1 \mu\text{A}$ definiert. Der jeweils erste Stromanstieg über die definierte Schwelle bestimmte den Ausfallzeitpunkt einer Kondensatorgruppe. Waren Kondensatoren während einer Prüfzeit von 11 Tagen nicht ausgefallen, so wurden diese Daten als rechtszensierte Daten für die statistische Bewertung betrachtet.

Ähnlich dem Tröpfchentest zeigten auch die Klimakammerversuche, dass eine herstellerabhängige Zuverlässigkeit bei den verschiedenen Kondensatoren vorliegt. Dies ist in Bild 51 dargestellt. Identisch zu dem Ausfallverhalten bei dem Tröpfchentest wurde bei den Baugrößen 0402 eine abnehmende Lebensdauer der Bauelemente von Hersteller A über Hersteller B zu Hersteller C beobachtet. Im Gegensatz zu den Ergebnissen bei dem Tröpfchentest haben sich bei der Baugröße 0603 die Kondensatoren des Herstellers A am zuverlässigsten verhalten. In diesem Fall haben entweder die Art der Belastung oder zurückgebliebene Flussmittelreste unter den Kondensatoren einen Einfluss auf das Ausfallverhalten. Die Bauelemente des Herstellers C wiesen auch bei diesem Experiment die frühesten Ausfälle auf. Nahezu parallele Weibullkurven bestätigten auch in der zyklischen Temperatur-Feuchte Prüfung einen identischen Ausfallmechanismus.

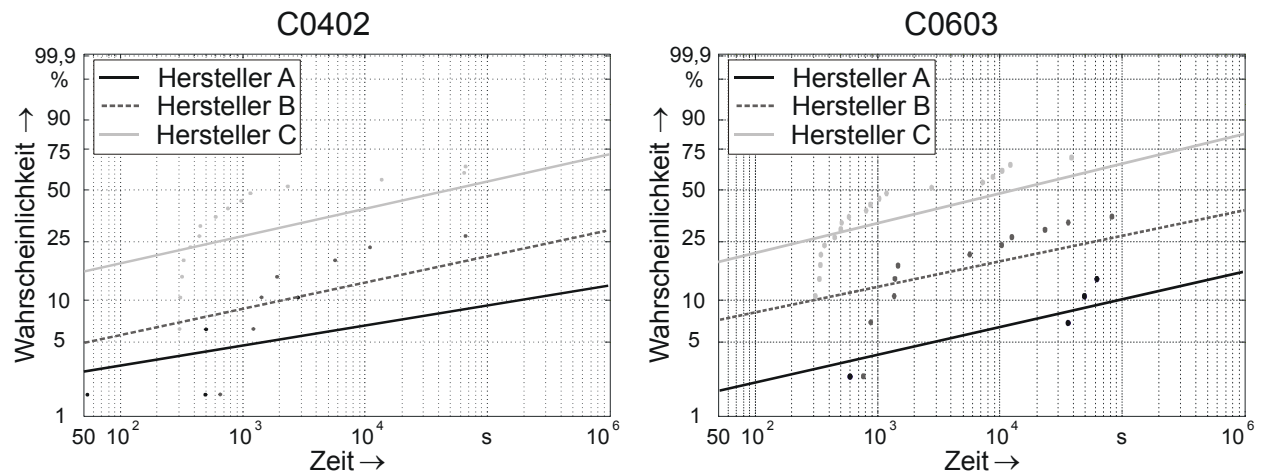


Bild 51: Vergleich der Ausfallverteilungen der geprüften Kondensatoren in der zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung gemäß DIN EN 60068-2-38

Wie die Experimente gezeigt haben, kann die Wahl einzelner Bauelemente die Zuverlässigkeit gesamter Baugruppen unter einer Betauungseinwirkung stark beeinträchtigen. Daher müssen relevante Bauteile hinsichtlich ihrer Betauungszuverlässigkeit gesondert betrachtet werden. Die aufgezeigte Vorgehensweise bietet eine fundierte und effiziente Vorgehensweise, um auf Bauteilebene die Lieferqualität einzelner Kondensatoren vor deren Einsatz auf einer Baugruppe hinsichtlich ihrer Betauungsrobustheit zu bewerten. Werden eindeutige Qualitätskriterien, wie beispielsweise eine definierte Lebensdauer im Tröpfchentest festgelegt, so kann dieses Verfahren zudem zur Prozesskontrolle beim Bauteilhersteller oder als Eingangsprüfung beim Systemhersteller eingesetzt werden.

5.6 Einfluss schädlicher Gase

Natürliche sowie industriell erzeugte atmosphärische Gase wirken sowohl auf Menschen als auch auf alle technischen Produkte ein. Gerade Schadgase wie Schwefeldioxid, Schwefelwasserstoff, Stickstoffoxide oder Kohlendioxid, die in unterschiedlichen Konzentrationen auf der Erde auftreten, können nicht nur die Gesundheit der Menschen gefährden, sondern auch die Zuverlässigkeit elektronischer Systeme beeinflussen. Relevante Erzeuger von Schadgasen sind die Verbrennung fossiler Brennstoffe in Form von Treibstoffen oder Kohle und die Metallverhüttung. Besonders hohe Konzentrationen von Luftverschmutzung liegen in Asien, Lateinamerika und Afrika vor, wobei dort vor allem Großstädte hervorgehoben werden müssen. Neben den regional vorliegenden Schadgaskonzentrationen in der Luft kann es an unterschiedlichen Einbauorten von technischen Produkten aufgrund von materialspezifischen Ausgasungen, wie beispielsweise aus schwefelvulkanisierten Gummidichtungen, zu lokal höheren Stoffkonzentrationen kommen [34][60][156].

Da im Rahmen der Arbeit die Zuverlässigkeit elektronischer Systeme unter Betauungseinfluss behandelt wird, stellt sich die Frage, ob Schadgase eine Einflussgröße für die Klimarobustheit elektronischer Systeme darstellen. Hierbei können adsorbierte oder absorbierte Verunreinigungen sowohl eine Feuchteadsorption an der Oberfläche als auch eine Dendritenbildung durch erhöhte Metallauflösung an der Anode beschleunigen.

Ausgehend von den theoretischen Grundlagen und den Erkenntnissen vorangegangener Versuche wurde zunächst ein für die Versuche geeignetes Testkonzept erstellt. Analog dem in Abschnitt 5.4 vorgestellten Leiterplattenlayout wurden auch für diese Experimente ineinandergreifende Kammstrukturen mit unterschiedlichen Abständen verwendet. Diese wurden auf einem FR4-Substrat mit 35 µm Kupfer und zusätzlicher Zinnpassivierung realisiert. Mit den Leiterbahnabständen von 200 µm, 300 µm und 400 µm lässt sich der Einfluss der Lagerzeit in einer Schadgasatmosphäre auf die Klimarobustheit bei unterschiedlichen Leiterbahnabständen bewerten. Bei den 400 µm Kammstrukturen wurde jeweils einer der beiden Käme mit einer bleifreien Zinn-Silber-Kupfer Lotpaste bedruckt, um die Wirkung der Schadgasatmosphäre auf verzinnte Leiterbahnen und auf Lotstellen getrennt betrachten zu können. Durch eine Versorgungsspannung von 10 VDC werden Feldstärken von 50 kV/m, 33 kV/m und 25 kV/m an den verschiedenen Leiterbahnabständen realisiert. Ein Teil der Prüflinge wurde gemäß IPC TM-650 2.6.3.3B mit deionisiertem Wasser und Isopropanol gereinigt. Daraus können Aussagen über den Einfluss des Reinheitsgrades vor der Schadgaslagerung auf die Betauungsrobustheit abgeleitet werden. Anschließend wurden die Testobjekte im spannungslosen Zustand einer Mischgasprüfung gemäß DIN EN 60068-2-60 Methode 4 unterzogen. Diese Prüfung wird eingesetzt, um den korrosiven Einfluss von Lager- und Betriebsbedingungen auf elektronische Produkte, Bauteile, Werkstoffe und Verbindungen als Einzelteil, Bestandteil einer Baugruppe oder als ganzes Gerät zu bestimmen. Die in der Prüfung verwendeten Schadgase sind Schwefelwasserstoff (H₂S), Stickstoffdioxid (NO₂), Chlor (Cl₂) und Schwefeldioxid (SO₂) [110][117]. Während ein Teil der Prüflinge über eine Dauer von 21 Tagen belastet wurde, erfolgte für eine definierte Anzahl an gereinigten und ungereinigten Prüflingen die Entnahme nach 4 und 10 Tagen. Abschließend wurden die Testobjekte einer individuell konzipierten zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung, wie diese auch für die Bewertung der Oberflächenbeschichtungen in Abschnitt 5.4 verwendet wurde, ausgesetzt. Diese enthält einen Temperaturgradienten von 0,75 K/min von 20 °C auf 65 °C bei einer konstanten relativen Luftfeuchtigkeit von 93 %, wobei in den Temperaturanstiegsphasen eine Betauung auf der Baugruppenoberfläche ermöglicht wird. In Bild 52 werden das Testlayout, die Schadgasparameter sowie das Profil der Klimaprüfung dargestellt. Mit der in Kapitel 5.3 vorgestellten

Messmethode wurde jede Kammstruktur während der Versuche kontinuierlich überwacht. Ein Stromfluss über 5 μA wurde als Ausfallkriterium definiert.

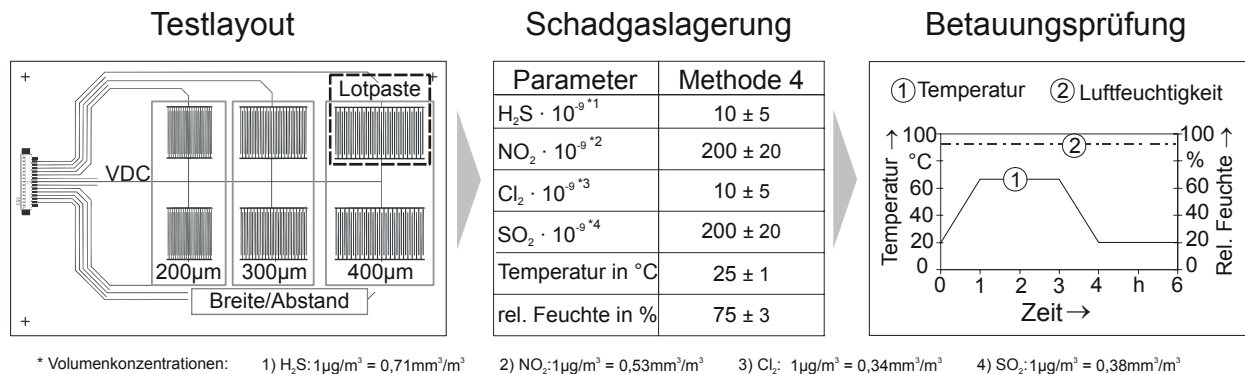


Bild 52: Versuchsstrategie zur Bewertung des Einflusses schädlicher Gase auf die Klimarobustheit elektronischer Baugruppen

Bereits nach der Schadgasprüfung waren Veränderungen in der Oberflächenbeschaffenheit der Testobjekte zu erkennen. Hierbei haben die optischen Analysen gezeigt, dass trotz einer Zinnpassivierung die darunterliegende Kupfermetallisierung durch Korrosion angegriffen wird. Dabei lässt sich eine klare Korrelation mit der Lagerzeit nachweisen. Mit steigender Belastungsdauer durch Schadgas wird eine deutliche Zunahme der Korrosionsprodukte auf den Leiterzügen verzeichnet. Bild 53 verdeutlicht dies anhand der Kammstrukturen mit 300 μm Leiterbahnabstand.

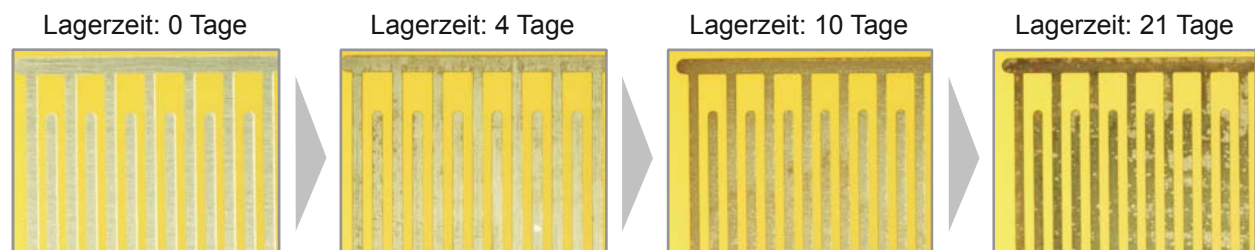


Bild 53: Steigender Korrosionsgrad der 300 μm -Kammstrukturen mit zunehmender Lagerzeit in einer Schadgasatmosphäre

Bei der Analyse der elektrischen Messungen während der Klimakammerprüfung hat sich gezeigt, dass es bei den gereinigten Kammstrukturen mit 200 μm und 300 μm Leiterbahnabstand zu einer deutlichen Lebensdauerverkürzung bei einer Lagerzeit von 21 Tagen gekommen ist. Wie Bild 54 am Beispiel der 200 μm Leiterbahnen zeigt, bewirkt eine Lagerzeit von 4 und 10 Tagen bereits eine Lebensdauerverkürzung um etwa 45 %, wohingegen eine Lagerzeit von 21 Tagen eine Reduzierung der Lebensdauer im Test um etwa 65 % verursacht.

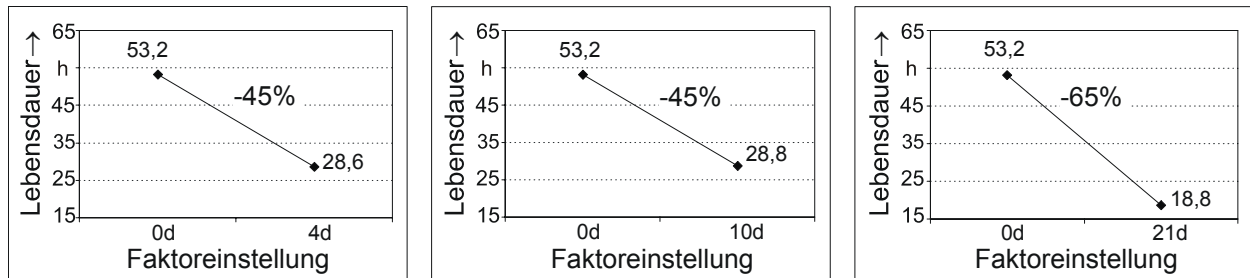


Bild 54: Einfluss der Schadgaslagerzeit auf die Lebensdauer der gereinigten 200 µm Leiterbahnen in der Klimaprüfung

Bei einer genaueren Betrachtung der Ausfallzeiten der Kammstrukturen mit 400 µm Leiterbahnabstand konnte festgestellt werden, dass der Reinheitsgrad der Leiterplattenoberfläche vor der Schadgaslagerung einen deutlich größeren Einfluss auf die Klimabeständigkeit hat als die Schadgasbelastung. Dadurch, dass im Rahmen der Versuche auch Kammstrukturen, die mit Lotpaste bedruckt waren, untersucht wurden, konnten Erkenntnisse über die Bedeutung von Prozessverunreinigungen durch Flussmittelreste gewonnen werden. Hierbei zeigte sich bei den mit Lotpaste bedruckten Kammstrukturen, dass trotz einer Reinigung mit Isopropanol und deionisiertem Wasser eine klar erkennbare Lebensdauerreduzierung in der zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung aufgetreten ist. Daher wird vermutet, dass trotz einer Reinigung hygroskopisch wirkende Verunreinigungen auf den Leiterplatten zurückbleiben können, welche die Klimabeständigkeit signifikant beeinflussen. Die Lebensdauer der unterschiedlichen Versuchsvarianten der 400 µm Kammstrukturen nach Lagerzeiten von 4, 10 und 21 Tagen wird in Bild 55 dargestellt.

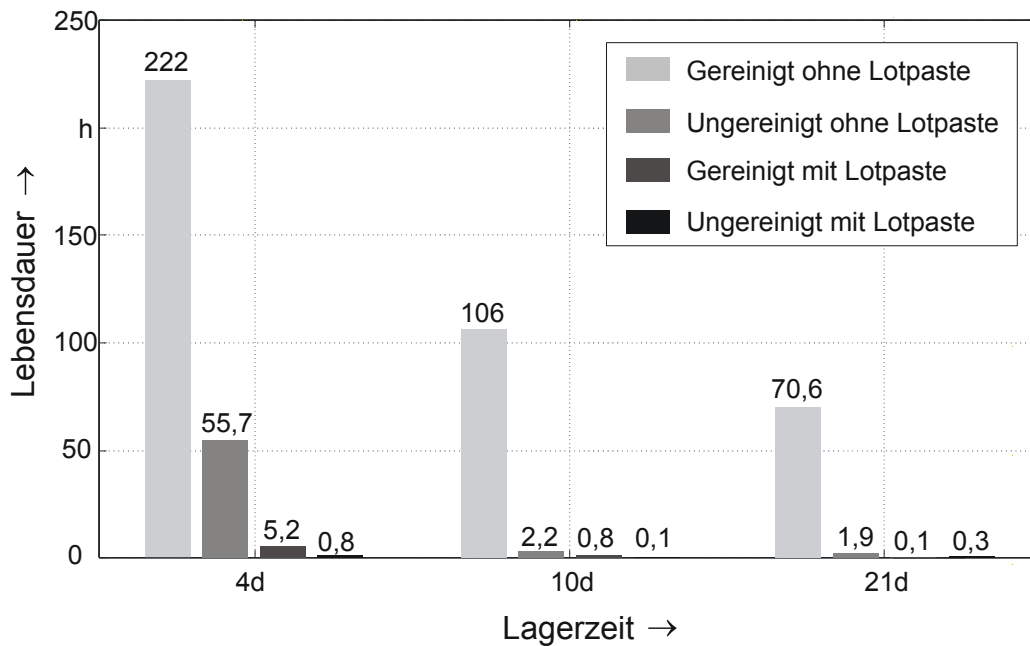


Bild 55: Einfluss der Schadgaslagerung auf unterschiedliche Prüflingsvarianten bei den 400 µm Kammstrukturen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass hygroskopisch wirkende Prozessverunreinigungen einen bedeutenderen Einfluss auf die Klimabeständigkeit elektronischer Baugruppen haben als schädliche Gase. Dies wird durch die Betrachtung der Ausfallzeitpunkte der Kammstrukturen mit und ohne Lotpaste im gereinigten und ungereinigten Zustand verdeutlicht. Trotz allem gilt es in Anbetracht der stetig fortschreitenden Miniaturisierung, der zunehmenden Signalempfindlichkeit und der Tatsache, dass schädliche Gase aus der Umgebung oder aus schwefelvulkanisierten Dichtungen auf die Baugruppen einwirken können, dies bei der Prüfkonzepptausageung beziehungsweise bei der Produktqualifizierung zu berücksichtigen. Eine Schadgasprüfung mit anschließender Betauungsprüfung hat sich im Rahmen der Experimente hierbei als wirkungsvolle Prüfsequenz erwiesen. Da gerade bei miniaturisierten Anschlussstrukturen und Leiterbahnen eine verringerte Lebensdauer unter Betauungseinfluss nach Schadgaseinwirkung nachgewiesen wurde, müssen die Einsatzbedingungen elektronischer Systeme hinsichtlich auftretender Schadgasbelastungen intensiv geprüft werden, um einen unnötigen Prüfaufwand und eine überdimensionierte Robustheitsauslegung zu vermeiden [83].

6 Klimazuverlässigkeit durch Schutzlacke

Die kontinuierlich zunehmende Erweiterung der Fahrzeugmodellpalette der Automobilhersteller bei gleichzeitig kürzeren Entwicklungszeiten kann nur durch effiziente Vorgehensweisen in den verschiedenen Produktentstehungsphasen ermöglicht werden. Dieser Sachverhalt ist insbesondere im Bereich der Elektrik und Elektronik zu beobachten. Da die Qualifikation und Freigabe für den Produktionsprozess elektronischer Baugruppen den Abschluss der Entwicklungsphase darstellt, ist der Handlungsspielraum für Konzept- und Designänderungen durch terminliche und finanzielle Restriktionen stark eingeschränkt. Aufgrund dieser Tatsache gewinnt der Einsatz von Schutzlackierungen zur reaktiven Fehlerabstellung bei Auffälligkeiten in den Feuchte- und Betauungsprüfungen immer mehr an Bedeutung, wobei sich in der Praxis gezeigt hat, dass ein Lackauftrag, unabhängig von der Lackart, nicht zwangsläufig die geforderte Klimabeständigkeit bewirkt. Vielmehr werden verschiedene Lacksysteme solange sequentiell an der entsprechenden Applikation erprobt, bis das gewünschte Ergebnis erzielt wird. Daraus resultierend besteht der Bedarf an der Identifikation zuverlässigkeitsrelevanter Bewertungskriterien, kritischer Bauteiltechnologien und geeigneter Prüfstrategien zur Bewertung der Schutzwirkung unterschiedlicher Lacksysteme.

6.1 Schutzlackarten und -auftragsverfahren

Die physikalisch-chemischen Eigenschaften spezifischer Schutzlacksysteme werden in den Produktdatenblättern der Hersteller angegeben und sind abhängig von der Lackzusammensetzung. Üblicherweise besteht ein Schutzlacksystem aus Bindemittel, Dispersionsmittel, Füllstoffen, Pigmenten und Additiven. Grundlegend stehen die Dünnschicht- und die Dickschichtbeschichtung zur Verfügung, um die verschiedenen Anforderungen zu erfüllen. Die Beschichtungsart ist dabei abhängig von der Auftragsmenge, wobei nach der Dicke der ausgehärteten Lackschicht unterschieden wird. Zu den Dickschichtbeschichtungen ($>300\ \mu\text{m}$) zählt ebenso der Verguss, der meist bei extremen Anforderungen, wie zum Beispiel in der Raumfahrt oder bei aggressiven Industrielatmosphären, angewendet wird [154]. Speziell für elektronische Baugruppen ist die Dicke der Schutzlackierungen bis $200\ \mu\text{m}$ definiert [121]. Schutzlacke können im Allgemeinen nach verschiedenen Aspekten unterteilt werden. In der Praxis hat sich die Unterscheidung nach der Bindemittelchemie basierend auf der US-Militärnorm MIL-I-46058 durchgesetzt [126]. Gemäß dieser Norm wird unterschieden nach der in der Tabelle 6 aufgeführten Polymergrundstrukturen.

Deutsche Bezeichnung	Abkürzung	Englischer Begriff
(Poly-)Acrylat(-harz)	AR	Acrylic Resin
(Poly-)Urethan(-harz)	UR	Urethan Resin
Epoxid(-harz)	ER	Epoxy Resin
Silikon(-harz)	SR	Silicone Resin

Tabelle 6: Definition unterschiedlicher Lacksysteme nach MIL-I-46058C

(Poly-)Acrylate sind Polymere der Acrylsäureester und bilden eine Untergruppe der Acryle, weshalb häufig von Acryllacken gesprochen wird. Diese Klassen können weiter unterteilt werden in das Dispersionsmittel, die Polymerchemie und den Polymerisationsprozess. Ein Lacksystem kann zum Beispiel als ein physikalisch härtender Einkomponenten-Acryllack auf Lösemittelbasis bezeichnet werden. Bild 56 gibt einen Überblick über die mögliche Zusammensetzung der gängigen Lacksysteme [122].

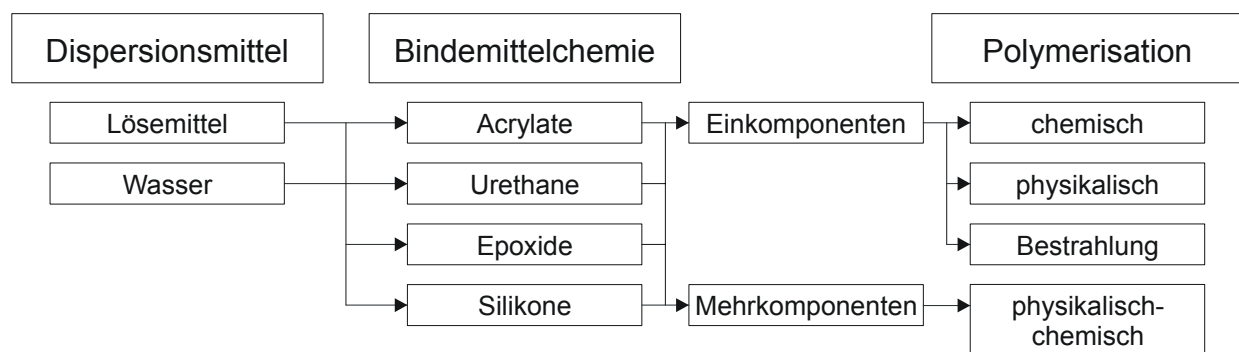


Bild 56: Einteilung gängiger Lacksysteme unter Angabe von Dispersionsmittel, Bindemittelchemie und Polymerisationsart

Eine Polymerisation der Lacke erfolgt entweder physikalisch, chemisch, durch Bestrahlung oder durch eine physikalisch-chemische Kombination. Physikalisch trocknende Systeme enthalten vorpolymerisierte Bindemittel, gelöst in Verdünner oder Wasser, die nach Verdunsten des Dispersionsmittels eine feste Lackschicht bilden. Hohe Temperaturen beschleunigen den Prozess. Zu den chemisch härtenden Systemen gehören oxidativ trocknende und chemisch vernetzende Systeme. Einkomponentenlacke vernetzen unter erhöhter Temperatur durch Polyaddition. Zweikomponentenlacke reagieren mit dem Luftsauerstoff beziehungsweise der Mischkomponente oder der Luftfeuchtigkeit zu einem vernetzten Lackfilm, der nicht durch sein ursprüngliches Dispersionsmittel gelöst werden kann. Die Filmbildung erfolgt meist durch physikalische Trocknung bei gleichzeitiger chemischer Reaktion. Auch hier begünstigt eine erhöhte

Temperatur die Reaktionsgeschwindigkeit. Lacksysteme, die Photoinitiatoren enthalten, sind strahlenpolymerisierbare Beschichtungsstoffe. Durch energiereiche Bestrahlung zerfallen die Photoinitiatoren unter Bildung freier Radikale, welche eine emissionsfreie Vernetzung in Gang setzen. Der Härtingsprozess erfolgt binnen weniger Sekunden und erfordert weniger Energie als die thermische Härtung. Der sehr geringe Dispersionsmittelanteil und das Auftreten von Schatteneffekten erschweren jedoch die Verarbeitung. Eine Kombination aus Polymerisationsverfahren kann entweder bei der Verwendung von Mehrkomponentensystemen mit unterschiedlichen Vernetzungsmechanismen oder durch spezielle Verfahren zum Einsatz kommen, wie diese im Fall der Beschichtung mit Parylene angewendet werden. Prinzipiell werden die chemischen und physikalischen Reaktionen bei der Vernetzung der Lacksysteme als Härtung bezeichnet [9][154].

Unabhängig vom Aushärteverfahren stehen unterschiedliche Beschichtungsverfahren zu Verfügung, um ein Schutzlacksystem zu applizieren. Die manuellen und maschinellen Verfahren zum Auftrag von Lacksystemen sind in Bild 57 dargestellt. Dabei können sowohl einzelne Schaltungsteile selektiv als auch die ganze Baugruppe beschichtet werden.



Bild 57: Manuelle und maschinelle Verfahren zum Lackauftrag

6.2 Versuchs- und Bewertungsstrategie

Die Wahl des Lacksystems und des Auftragsverfahrens gestaltet sich insofern kompliziert, als dass zum einen die Einflussparameter für eine effektive Schutzwirkung unzureichend bekannt sind, und zum anderen eine geringe Anzahl an Standards und Richtlinien zur Qualifizierung von Schutzlackierungen existiert [155]. Das bekannteste Regelwerk hierzu ist die Richtlinie IPC-CC-830B (Qualification and Performance of Electrical Insulating Compound for Printed Wiring Assemblies) und in Bezug auf die Prüfung der Feuchtebeständigkeit die dazugehörige Normreihe IPC-TM-650-2.6.3 (Environmental Test Methods-Moisture and Insulation Resistance, Printed Boards). Die in der Forschung und Entwicklung gebräuchlichsten Muster zur Überprüfung der Klimabeständigkeit und zur Qualifizierung von Schutzlacksystemen sind ineinandergreifende Kammstrukturen unterschiedlicher Abstände, wie diese in den genannten IPC-Richtlinien definiert sind. Mit diesem Layout können aufgrund der heutigen Material-, Bauelemente- und Anschlussvielfalt jedoch keine Aussagen über die Übertragbarkeit des Lacksystems auf reale Elektronikbaugruppen und deren Langzeitverlässlichkeit gemacht werden. Dass gerade die Qualifizierung der Lacksysteme die realen Baugruppenanforderungen nur unter stark vereinfachten Bedingungen nachstellt, wird in Bild 58 verdeutlicht.

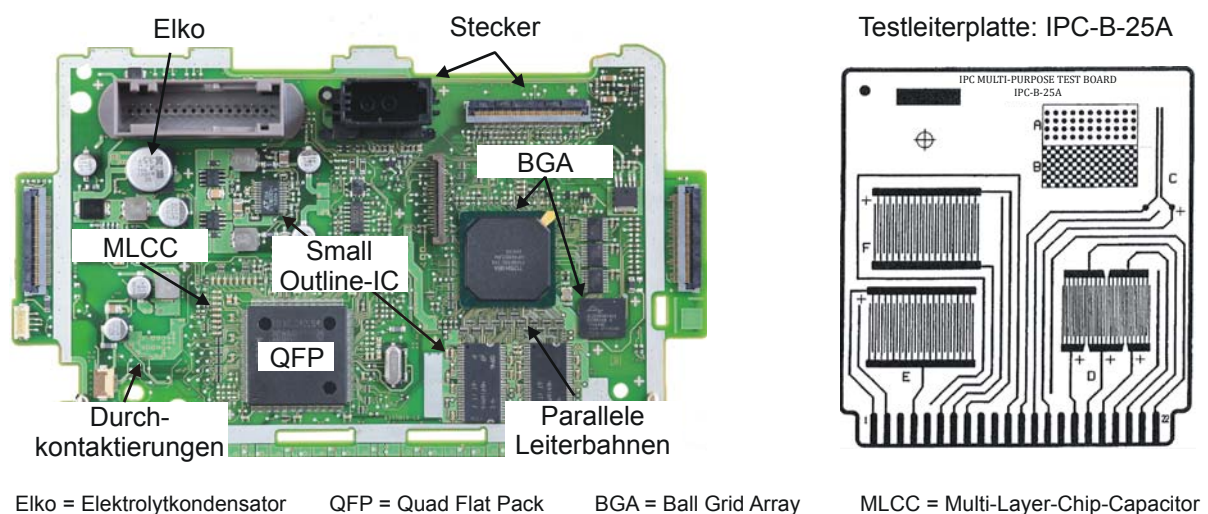


Bild 58: Reale Baugruppe mit exemplarischen Technologieanforderungen und Qualifizierungslayout für Schutzlackssysteme gemäß IPC-B-25A

Aus diesem Grund werden angepasste Prüfobjekte unter Anwendung realitätsnaher Testlayouts mit unterschiedlichen Designparametern benötigt, welche zuverlässigkeitsrelevante Einflussgrößen und Wechselwirkungen bei komplexen Steuergeräten abbilden. Damit lassen sich sowohl kritische Bauelementtechnologien und eine empfindliche Layoutgestaltung als auch

relevante Material- oder Prozessparameter für die Lackapplikation identifizieren. Um dieser Aufgabenstellung gerecht zu werden, wurde eine Testbaugruppe konzipiert und aufgebaut, welche die technologischen Anforderungen hinsichtlich Bauelementspektrum und Lackauftragsrestriktionen heutiger elektronischer Baugruppen simuliert. Hierzu zählen insbesondere die Verwendung unterschiedlicher aktiver und passiver Bauelemente sowie verschiedener Kontaktierungsverfahren auf elektronischen Baugruppen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden sogenannte Daisy-Chain-Bauelemente eingesetzt, welche über keine interne Logikfunktionalität verfügen, sondern isolierte beziehungsweise intern verbundene Anschlussstrukturen aufweisen. Mit diesem internen Aufbau der Bauelemente wird durch eine angepasste Verlegung der Leiterzüge eine der Versorgungsspannung entsprechende Potentialtrennung benachbarter Anschlüsse erreicht. Bild 59 zeigt die konzipierte Testleiterplatte, die dabei verwendeten Bauteile sowie weiß umrandet den definierten Lackierbereich. Die Nomenklatur der QFP- und BGA-Bauelemente richtet sich nach Typ, Anschlussanzahl und Kontaktierungsabstand. Im Gegensatz zu den standardisierten Testmustern fand die Herstellung der Baugruppen unter Serienbedingungen unter Verwendung eines Lötstopplackes und einer Nickel/Gold-Oberflächenmetallisierung statt.

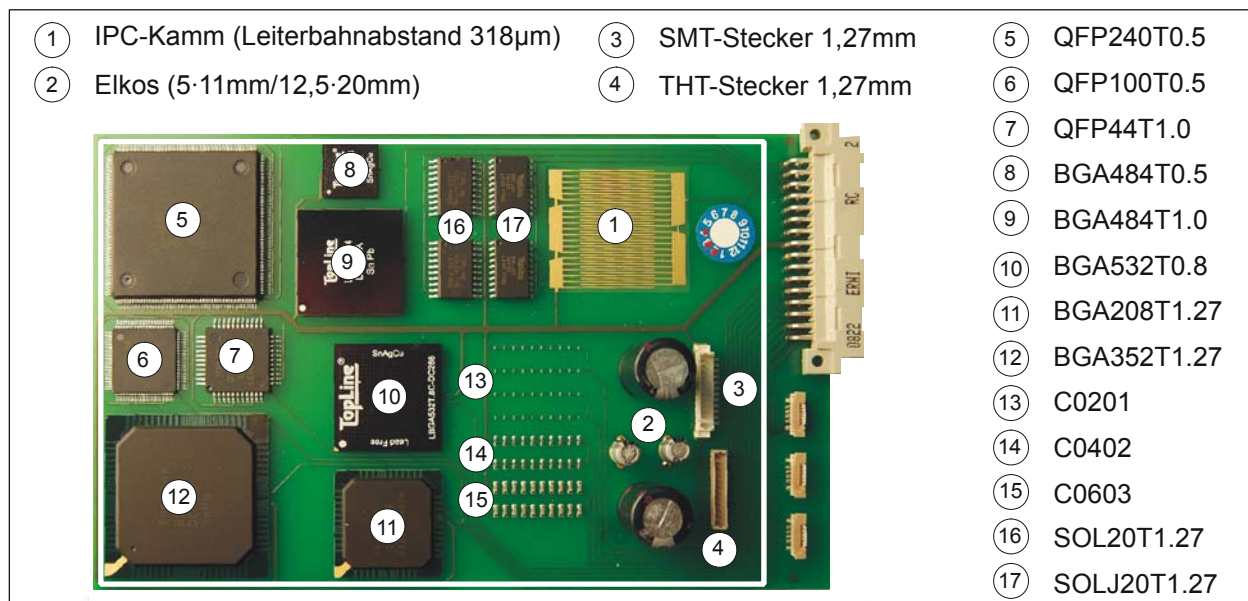


Bild 59: Testleiterplatte zur Bewertung verschiedener Schutzlacksysteme

Mittels dieses Bauelementspektrums ist eine quantitative und qualitative Bewertung der Schutzlackierung und der entsprechenden Zuverlässigkeit bei einer klimatischen Belastung durch hohe Luftfeuchtigkeit und Betauung sowohl im lackierten als auch im unlackierten Zustand gewährleistet. Durch eine Variation der Anschlussstrukturen, der Anschlussabstände und der Bauelementgröße

können unterschiedliche Einflussfaktoren verglichen und Aussagen über zuverlässigkeitsrelevante Parameter abgeleitet werden. Gerade QFP- und BGA-Bauelemente mit vielen Anschlusskontaktierungen, welche in heutigen Steuergeräten aufgrund höherer Funktionalität und geringerer Baugröße vermehrt zum Einsatz kommen, sollen hinsichtlich ihrer Zuverlässigkeit unter Feuchte- und Betauungseinwirkung bewertet werden. Darüber hinaus können diese Bauelementtechnologien bei gleichen Kontaktierungsabständen miteinander verglichen werden. Die Bauelemente in den Small Outline-Gehäusevarianten (SOL) differieren in ihren Anschlussformen und sollen der Bewertung der Schutzwirkung bei der jeweiligen Kontaktierungsform dienen. Im Gegensatz zu den vorwiegend verwendeten Gull Wing-Anschlussstrukturen (16) werden hierzu alternativ J-Lead-Kontakte (17) gegenüber gestellt. Die geometrisch kleinsten Bauelemente auf dem Testschaltungsträger sind keramische Vielschicht-Chipkondensatoren mit Längen-/Breitenabmessungen von 0,5 mm x 0,3 mm (13), 1,0 mm x 0,5 mm (14) und 1,6 mm x 0,8 mm (15). Mit Hilfe der unterschiedlichen Elektrolytkondensatoren, wie diese in Steuergeräten häufig als Eingangskapazitäten vorzufinden sind, soll die Führung des Lackierwerkzeuges und das Fließverhalten des Lackes beurteilt werden. Hierbei ist nur das Volumen beziehungsweise die Höhe der Bauelemente und deren Abstand zueinander ein Untersuchungskriterium, weshalb diese nicht elektrisch kontaktiert wurden. Dasselbe gilt für die drei oberflächenmontierten Steckverbindungen am rechten unteren Rand des Schaltungsträgers unterhalb des Signalsteckverbinders. Durch die Steckervarianten in Surface Mount Technology (SMT) und Through Hole Technology (THT), welche außerhalb des Lackierbereichs liegen, kann ein Vergleich der Kontaktierungsform in Bezug auf deren Klimarobustheit im unlackierten Zustand gezogen werden. Besondere Relevanz hat dabei das Lötverfahren. Die freiliegende Kammstruktur mit NiAu-Oberflächenmetallisierung soll mögliche Unterschiede zwischen dem konzipierten Layout und der standardisierten Teststruktur verdeutlichen.

Für den Vergleich der Schutzwirkung unterschiedlicher Lacksysteme wurden im Rahmen der Versuche ein Urethan-, ein Acryl-, und ein Silikonlacksystem der Firma Lackwerke Peters GmbH und Co KG verwendet. Die Tabelle 7 gibt einen Überblick über die in den Versuchen eingesetzten Schutzlacksysteme und deren Eigenschaften.

Bezeichnung	SL 1301 ECO FLZ	SL 1307 FLZ	DSL 1706 FLZ
Lackart	Einkomponenten-Polyurethanharzlack	Einkomponenten-Acryllack	Einkomponenten-Silikonlack
Erscheinungsbild	farblos (fluoreszierend)	farblos (fluoreszierend)	farblos (fluoreszierend)
Aushärtung	chemisch härtend bei 80 °C in 6 h	physikalisch härtend bei Raumtemperatur in 6 h	kondensations- vernetzend bei Raumtemperatur in 24 h
Durchgangswiderstand	$1,0 \times 10^{15} \Omega \text{cm}$	$1,5 \times 10^{15} \Omega \text{cm}$	$6,3 \times 10^{15} \Omega \text{cm}$
Einsatztemperatur	140 °C	125 °C	180 °C

Tabelle 7: Evaluierte Schutzlackssysteme und deren Eigenschaften

Zusätzlich zu den applizierten Beschichtungen wurden die BGA484T1.0-Bauelemente teilweise mit einem Kapillar-Underfiller der Firma Emerson & Cuming versehen. Der Einkomponenten-Epoxidlack auf Lösemittelbasis wird bei Bauelementen mit sehr kleinen Kontaktabständen verwendet und zeichnet sich durch einen geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten, einer Einsatztemperatur bis 125 °C und einem Durchgangswiderstand von $1,0 \times 10^{15} \Omega \text{cm}$ aus. Alle Lackssysteme wurden durch das selektive Sprühverfahren Stream-Coat® der Firma KC-Produkte GmbH aufgebracht. Hierbei wird im Dispensverfahren durch eine Luftdüse der Materialauftrag steuerbar verströmt. Abhängig von der Lackmenge und der Intensität des Luftstrahls entsteht ein gleichmäßiger Lackfilm auf der Leiterplatte [99].

Zur Bewertung der Schutzwirkung der jeweiligen Lackssysteme wurde das Prüfverfahren gemäß DIN EN 60068-2-38 herangezogen. Ziel der im Prüfverfahren enthaltenen Frostphase ist es, das in Spaltmaßen kondensierte Wasser in den festen Aggregatzustand zu versetzen und durch entsprechende Volumenzunahme Risse, Brüche oder Kratzer beschleunigt aufzuzeigen. Zwar legt die Norm fest, dass die Frostphase fünf mal innerhalb der ersten neun Zyklen durchzuführen ist, wohingegen im Rahmen der Experimente diese in jedem der Zyklen erfolgte. Damit sollte eine Verschärfung der Prüfbedingungen erreicht werden. Mittels der in Abschnitt 5.3 erläuterten Messkette wurden die aufgeführten Bauelemente während der Versuchsreihen kontinuierlich überwacht. Bei den Keramikkondensatoren wurden je Baugröße 20 Kapazitäten über einen Kanal überwacht. Für die Kapazitäten der Baugröße 0,5 mm x 0,3 mm (13) wurden zwei Reihen mit jeweils 20 Chips messtechnisch kontrolliert. Aufgrund eines Defizits im

Layout sowie einer fehlerhaften Bauteillieferung konnte bei den BGA-Bauelementen nur der BGA484T1.0 elektrisch ausgewertet werden. Für die elektrischen Messungen wurde als Ausfallkriterium der erste Stromanstieg über $2 \mu\text{A}$ definiert. Alle Baugruppen waren der Prüfbelastung für acht Tage ausgesetzt. Dies entspricht einer Anzahl von acht Testzyklen mit 16 Temperaturzyklen von $25 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $65 \text{ }^\circ\text{C}$ und acht Temperaturzyklen von $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ auf $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Um weitere Aussagen über die Zuverlässigkeit der Lacksysteme zu erhalten, wurden einige der Baugruppen vor der Klimaprüfung mit 300 Temperaturschockzyklen vorbelastet. Die Temperaturschockzyklen wurden mit einer oberen Temperatur von $125 \text{ }^\circ\text{C}$ und einer unteren Temperatur von $-40 \text{ }^\circ\text{C}$ durchgeführt, Aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten kann es dabei zu Delaminationen der Lackschicht kommen, welche die Klimazuverlässigkeit negativ beeinträchtigen können. Darüber hinaus wurde ein definierter Anteil der Prüflinge gereinigt, um einerseits Erkenntnisse über die Robustheitssteigerung elektronischer Baugruppen durch eine Reinigung zu gewinnen und andererseits die Einflüsse auf die Schutzwirkung der einzelnen Lacksysteme durch eine Beseitigung der Verunreinigungen unter der Lackschicht zu bewerten. Die Reinigung der Baugruppen erfolgte bei der Firma Zestron mit dem industriellen Reinigungsautomaten Miele IR 6002. Hierbei wird das wasserbasierende Medium Vigon® A 201 bei einer Temperatur von $50 \text{ }^\circ\text{C}$ bis $60 \text{ }^\circ\text{C}$ eingesetzt, um Rückstände zu beseitigen. Im Anschluss an den Reinigungsprozess wurden die Proben bei $110 \text{ }^\circ\text{C}$ im Umluftverfahren getrocknet. Zusammenfassend zeigt Bild 60 die zur Verfügung stehenden Versuchsvarianten.

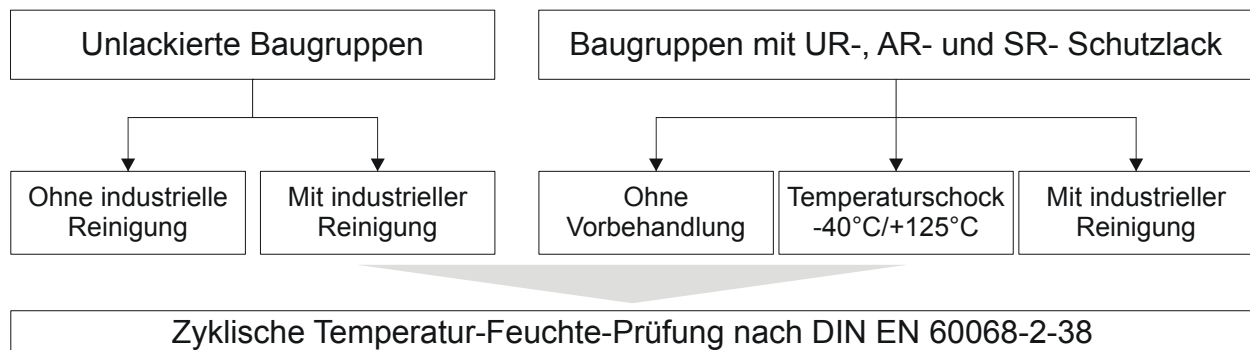


Bild 60: Versuchsstrategie zur Bewertung der Schutzwirkung verschiedener Lackarten und dabei relevanten Einflussgrößen

6.3 Optische Inspektion der Versuchsmuster

Da alle Lacksysteme fluoreszierend sind, kann mittels ultravioletten Lichtes (UV-Licht) die Qualität des Lackauftrages bewertet werden. Eine visuelle Begutachtung der aufgetragenen Lacksysteme zeigte, dass alle drei Lackarten eine

geschlossene und lückenlose Schicht, auf den Metallisierungen, dem Lötstopplack und auf den Bauelementen bilden. Scheinbare Schichtinhomogenitäten waren unter UV-Licht außer bei dem Acryl- und Urethanlack im Bereich der Stecker und Elektrolytkondensatoren nicht zu erkennen. Diese Fehlstellen sind darauf zurückzuführen, dass der Lack über die Kapillarwirkung der Steckeranschlüsse auf die Steckerpins gezogen wurde. Der Silikonlack zeigte dieses Verhalten nicht. Oberflächlich waren alle Bauelemente vollständig mit dem jeweiligen Lack bedeckt, wenn auch bei detaillierter Betrachtung der QFP-Bauelemente eine deutlich geringere Schichtdicke im Bereich der Bauelementkanten sowie in den Bereichen zwischen den Anschlussbeinchen festgestellt werden konnte. Wie auch in Bild 61 zu erkennen ist, zeigte sich sowohl bei dem Urethan- als auch bei dem Silikonlack eine deutlich feinere Kantenführung als bei dem Acryllack.

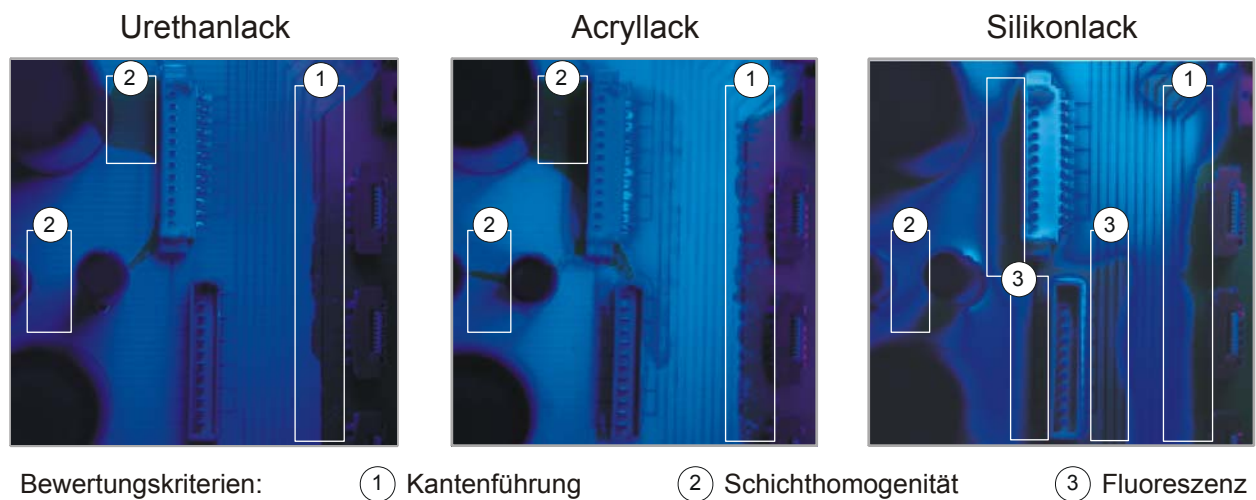


Bild 61: Optische Inspektion der Lacksysteme mittels UV-Licht

Die beim Silikonlack unter UV-Licht vermeintlich erkennbaren Fehlstellen sind auf eine Verarmung des fluoreszierenden Mediums in diesen Bereichen zurückzuführen. Eine durchgängige Lackschicht ist in diesen Bereichen jedoch gegeben. Weiterhin konnte durch die optische Inspektion erkannt werden, dass der Abstand der Anschlussstrukturen an den QFP-Bauelementen das Fließverhalten der Lacke beeinflusste. Bei den Bauelementen mit kleineren Anschlussabständen floss der Urethan- und Silikonlack schlechter zwischen die Kontakte als der Acryllack, was darin resultiert, dass ein Lackmangel am Ausgang der Anschlussbeinchen aus den Bauelementgehäusen vorzufinden ist. Bild 62 zeigt dies am Beispiel des Silikonlacksystems. Weitere Effekte konnten bei der Inspektion der Baugruppen nach der Temperaturschockprüfung festgestellt werden. Hierbei wurde beobachtet, dass bei allen Lacksystemen eine Delamination der Lackschicht an den Bauelementkanten stattfand. Besonders auffällig bei der

Inspektion war der Urethanschutzlack, bei dem sich an den SMT-Steckverbindern und den SOL-Bauelementen Aufquelleffekte nach der Temperaturschockprüfung zeigten. Obwohl die Polymerisationsparameter für alle Lacksysteme eingehalten wurden, wird dieser Effekt auf eine unzureichende Härtung des Lacksystems zurückgeführt. Dadurch dehnt sich der Schutzlack unter den Bauelementen bei hohen Temperaturen aus und quillt an unterschiedlichen Stellen neben den Bauelementen auf.

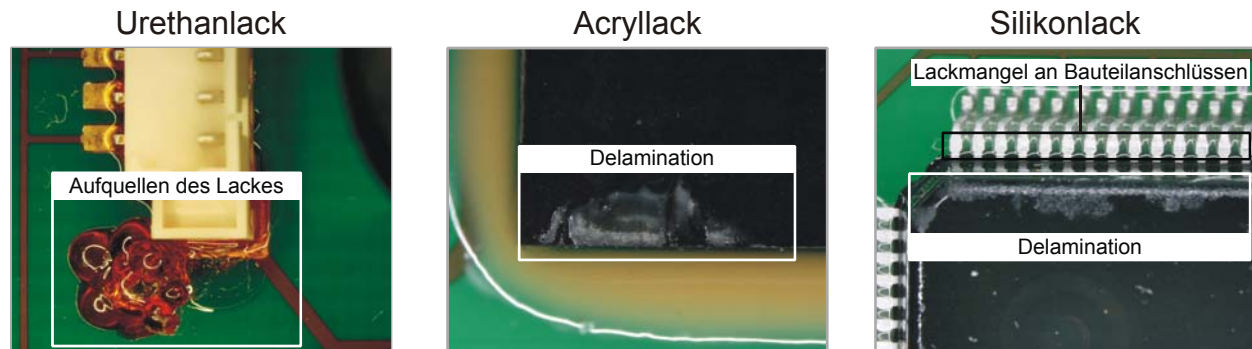


Bild 62: Auffälligkeiten an den unterschiedlichen Lacksystemen nach einer Temperaturschockprüfung

Inwieweit diese optischen Auffälligkeiten die Klimazuverlässigkeit der Baugruppen mit den unterschiedlichen Lacksysteme beeinflussen, wird nachfolgend erörtert.

6.4 Zuverlässigkeit der unlackierten Baugruppe

Zwar ermöglicht eine optische Bewertung der Beschichtung eine qualitative Aussage über den Lackierprozess, jedoch können daraus keine Aussagen über die Zuverlässigkeit der lackierten Baugruppen bei einer klimatischen Beanspruchung gewonnen werden. Um eine quantitative Bewertung und einen Vergleich der Schutzwirkung der beschriebenen Lacksysteme zu ermöglichen, muss zunächst die Zuverlässigkeit der verwendeten Bauelemente auf der konzipierten Testleiterplatte im Ausgangszustand bestimmt werden. Daher wurden in einem ersten Versuch die Leiterplatten ohne zusätzliche Vorbehandlung und ohne Schutzlack dem bereits beschriebenen Prüfverfahren ausgesetzt. Bei der Auswertung konnte festgestellt werden, dass außer den oberflächenmontierten Steckern, den BGA484T1.0-Bauelementen, den QFP44T1.0-Bauelementen und den SOL20T1.27-Bauelementen alle anderen überwachten Bauelementtypen elektrische Auffälligkeiten während des Versuchs zeigten. Insbesondere der Bauelementtyp QFP240T0.5, der THT-Steckverbinder und die Keramikkondensatoren der Bauform 0201 zeigten in nahezu jedem Zyklus sporadische Stromerhöhungen. Diesbezüglich wurde ersichtlich, dass bei den QFP-Bauelementen Ausfälle sowohl in den Temperaturanstiegsphasen von 25 °C auf 65 °C als auch in den Temperaturanstiegsphasen aus dem negativen Temperaturbereich

aufgetreten sind. Im Gegensatz dazu wurden bei den oberflächenmontierten Steckverbindern und den anderen Kondensatoren nur in den Temperaturanstiegen von -10 °C auf 25 °C sporadische Leckströme detektiert. Anhand von Bild 63 wird der beschriebene Sachverhalt anhand von jeweils zwei der vier aufgezeichneten Stromverläufe bei den QFP240T0.5-Bauelementen und den Kondensatoren der Bauform 0201 (C0201) verdeutlicht. Hierzu sind nur die ersten 24 Stunden der achttägigen Prüfung dargestellt.

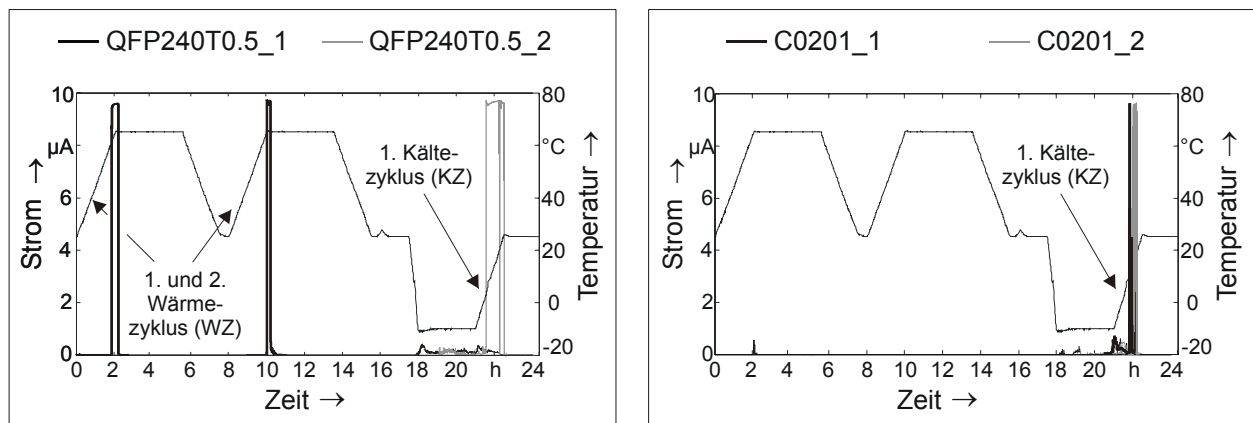


Bild 63: Exemplarischer Stromverlauf der QFP-240T0.5- und C0201-Bauelemente im Ausgangszustand der Leiterplatte

Diese Verhalten lässt sich einerseits damit begründen, dass aufgrund des höheren Temperaturgradienten im Kältezyklus mehr Wasser an der Leiterplattenoberfläche kondensiert und andererseits während der Abkühlphase adsorbiertes und gefrorenes Wasser bei Überschreiten von Null Grad Celsius einen flüssigen Film bildet. Der physikalische Effekt ist hierbei ein anderer als bei der Kondensation, bei der aus singulären Tropfen ein durchgängiger Wasserfilm entsteht. Bei der optischen Analyse konnte an allen elektrisch auffälligen Bauelementen ECM nachgewiesen werden. Diesbezüglich waren Migrationsspuren bei den Kondensatoren vorwiegend unter dem Bauelement und bei den QFP-Bauelementen primär an den Anschlussausgängen aus dem Bauelementgehäuse vorzufinden. Weiterhin konnte beobachtet werden, dass Ausfälle vorwiegend im oberen Drittel der Temperaturrampe aufgetreten sind. Hieraus lässt sich ableiten, dass dabei entweder die maximale Betauung aufgetreten ist, oder der Ausfallmechanismus zu einem gewissen Anteil thermisch aktiviert ist. Die geringste Anzahl an Fehlern zeigten die Keramik Kondensatoren der Baugröße 0603 (15). Weiterhin auffällig war die extrem hohe Anzahl an Stromerhöhungen bei den THT-Steckverbindern. Diese sind auf den hohen Anteil an Flussmittelrückständen aus dem Wellenlötprozess zurückzuführen, welche, wie in Kapitel 3.2.3 erläutert, das Dendritenwachstum maßgeblich beeinflussen.

6.5 Bewertung der Schutzwirkung verschiedener Lacksysteme

Wird eine Baugruppe beziehungsweise ein Bereich einer Baugruppe mit einem Schutzlack versehen, so wird in der Regel erwartet, dass bisherige Fehler dadurch eliminiert werden. In diesem Zusammenhang konnte nachgewiesen werden, dass keiner der applizierten Lacksysteme einen hundertprozentigen Schutz über das gesamte Bauteilspektrum liefern kann. Zwar waren deutliche Qualitätsunterschiede bei einzelnen Bauelementtechnologien zu verzeichnen, aber gerade bei den QFP240T0.5-Bauelementen wurden bei jedem Lacksystem elektrische Leckströme detektiert. Da sich ein quantitativer Vergleich mittels einer Lebensdauerbetrachtung nach Weibull durch die teilweise frühen oder auch ausgebliebenen Ausfallzeitpunkte als ungeeignet erwies, wurde die Gesamtanzahl der elektrischen Auffälligkeiten bei den einzelnen Bauelementen während der gesamten Prüfdauer als Bewertungskriterium herangezogen, und mit dem Ausgangszustand verglichen. Diese Methode kann dahingehend als sinnvoll betrachtet werden, als dass nahezu alle Auffälligkeiten während der durchgeführten Prüfungen sporadischer Natur waren und die Leckströme nach Ende der Btauungsphasen wieder verschwanden. Besonders auffällig bei der Analyse der elektrischen Ergebnisse war die Tatsache, dass sowohl beim Urethan- als auch beim Silikon Schutzlack Bauelemente durch elektrische Leckströme ausfielen, die im Ausgangszustand fehlerfrei den Test überstanden hatten. Dies traf einerseits bei den QFP44T1.0-Bauelementen und andererseits bei den SOL20T1.27-Bauelementen mit Gull-Wing Anschlüssen zu. Bild 64 zeigt das elektrische Verhalten und die jeweiligen Ausfallzeitpunkte am Beispiel der QFP-Gehäusevariante.

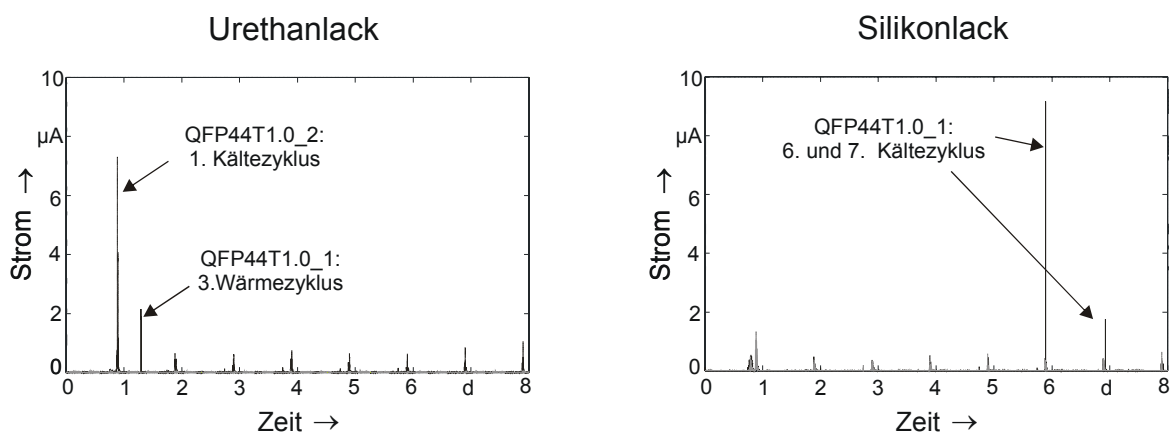


Bild 64: Negative Beeinträchtigung der Klimabeständigkeit durch eine Schutzlackierung am Beispiel der QFP44T1.0-Bauelemente

Neben den beiden genannten Gehäusevarianten war auch das BGA484T1.0-Bauelement mit der Silikon Schutzlackierung von diesem Effekt betroffen.

Begründet werden kann diese negative Beeinträchtigung der Zuverlässigkeit dadurch, dass die unter den Bauelementen und in den Anschlusszwischenräumen angesammelte dampfförmige und flüssige Wassermenge aufgrund der unzureichenden Verkapselung durch den Schutzlack länger und stärker als Belastung einwirkt. Diese Begründung wird auch dadurch bestätigt, dass bei den SOL-Bauelementen mit J-Lead-Kontakten, welche aufgrund der Geometrie der Anschlussbeinchen einen größeren Abstand zur Leiterplattenoberfläche aufweisen, keine Leckströme beobachtet wurden. Hier kann die eingelagerte Feuchtigkeit leichter und schneller entweichen.

Die besten Ergebnisse in den Versuchen konnten mit dem Acryllacksystem erzielt werden. Bis auf die QFP-Bauelemente mit einem Anschlussraster von 0,5 mm und den Kammstrukturen waren keine weiteren Bauelemente auffällig. Insbesondere bei den Kondensatoren wurden sehr gute Ergebnisse mit dem Acryllack erreicht. In Bild 65 werden zusammenfassend die Anzahl der elektrischen Auffälligkeiten bei den unterschiedlichen Lackarten an den jeweiligen Bauelementen dargestellt.

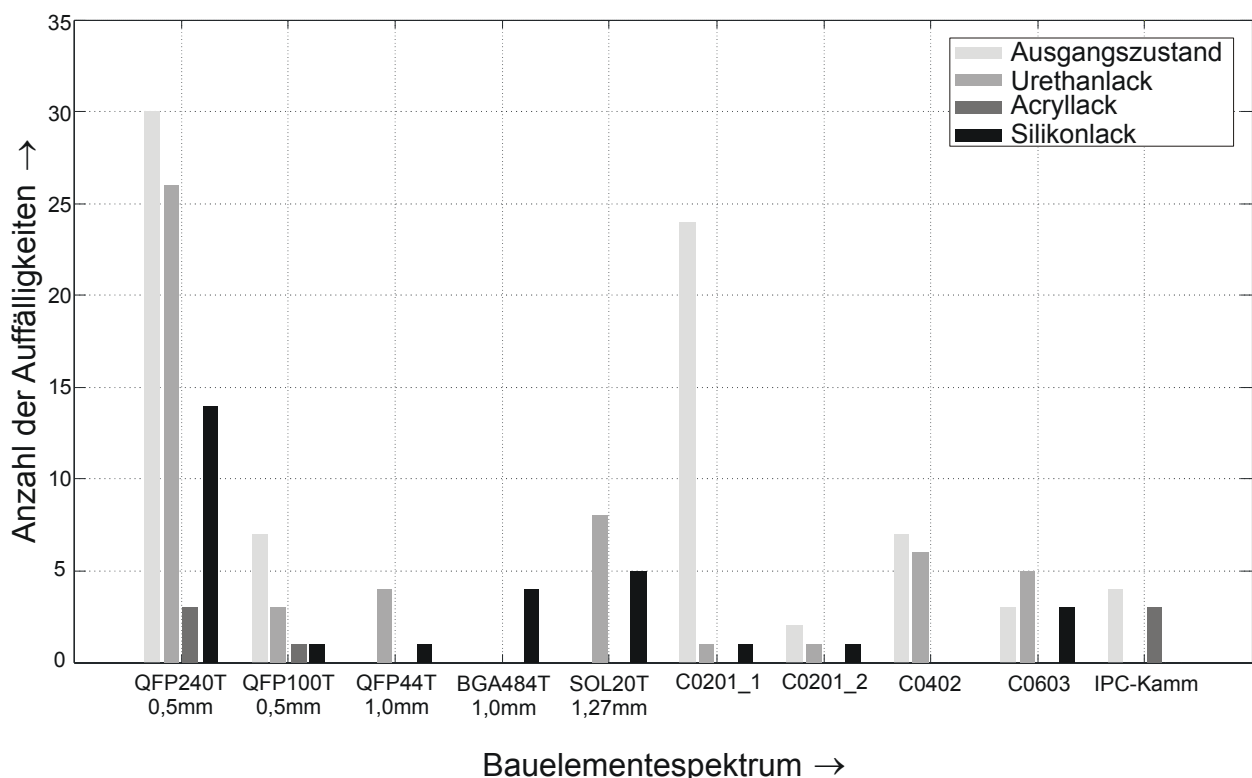


Bild 65: Anzahl der elektrischen Auffälligkeiten bei den unterschiedlichen Lacksystemen im Vergleich zum Ausgangszustand

Betrachtet man die Verteilung der elektrischen Auffälligkeiten aus der Prüfung im Ausgangszustand und den Tests mit den drei unterschiedlichen Lacksystemen, so hat sich gezeigt, dass 75 % aller Ausfälle in den Temperaturanstiegen von -10 °C

auf 25 °C aufgetreten sind. Von den restlichen 25 % der Auffälligkeiten in den Wärmezyklen (WZ) waren über 60 % der Ausfälle bei den THT-Steckverbindern und den QFP240T0.5-Bauelementen aufgetreten. Bei der optischen Analyse der lokalen Ausfallstellen war ersichtlich, dass metallische Dendriten bei den QFP-Bauelementen nicht an den Lötstellen aufgetreten sind, sondern an den Austrittskanten der Bauelementanschlüsse aus dem Gehäuse. Der erläuterte Sachverhalt wird in Bild 66 grafisch dargestellt. Daraus lässt sich ableiten, dass der Kältezyklus (KZ) aufgrund des höheren Temperaturgradienten eine höhere Belastung für die Baugruppen darstellt und dass die genannten Steckverbinder und QFP-Bauelemente als die kritischsten Bauelemente im Rahmen der Versuche angesehen werden können.

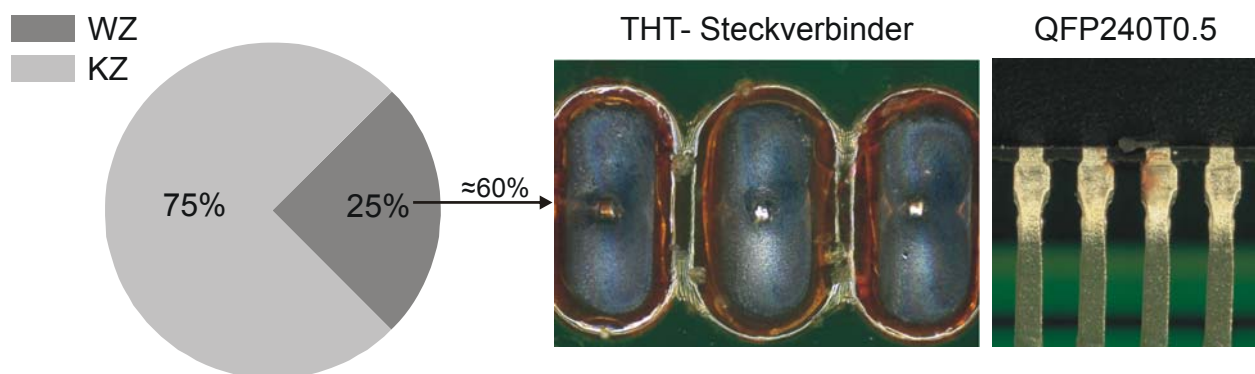


Bild 66: Belastungsabhängige Ausfallverteilung und primär betroffene Bauelemente in den Wärmezyklen

Wie eingangs erwähnt, wurde ein Teil der Prüflinge vor dem Lackauftrag einer Temperaturschockprüfung ausgesetzt. Entgegen der Annahme, dass durch Delamination oder Mikrorisse im Lacksystem dessen Schutzwirkung negativ beeinträchtigt wird, konnte bei allen Lacksystemen nachgewiesen werden, dass nach der Temperaturschockprüfung eine deutliche Reduzierung der elektrischen Auffälligkeiten erreicht wurde. Der Grund hierfür ist die Tatsache, dass sich bei höheren Temperaturen Verunreinigungen auf der Leiterplatte verflüchtigen. Somit verschwinden hygroskopisch wirkende und leitfähigkeitsbeeinflussende Rückstände von der Leiterplattenoberfläche, wodurch die Klimabeständigkeit verbessert wird. Am Beispiel der Urethanlackierung konnte mittels einer vorgelagerten Reinigung der Baugruppen ein ähnliches elektrisches Verhalten der Baugruppen im Test nachgewiesen werden. So zeigte sowohl eine zuvor durchgeführte Reinigung als auch eine antizipierte Temperaturschockprüfung beim Urethanschutzlacksystem eine Reduzierung der Auffälligkeiten um etwa 40 %. Bild 67 verdeutlicht den beschriebenen Sachverhalt.

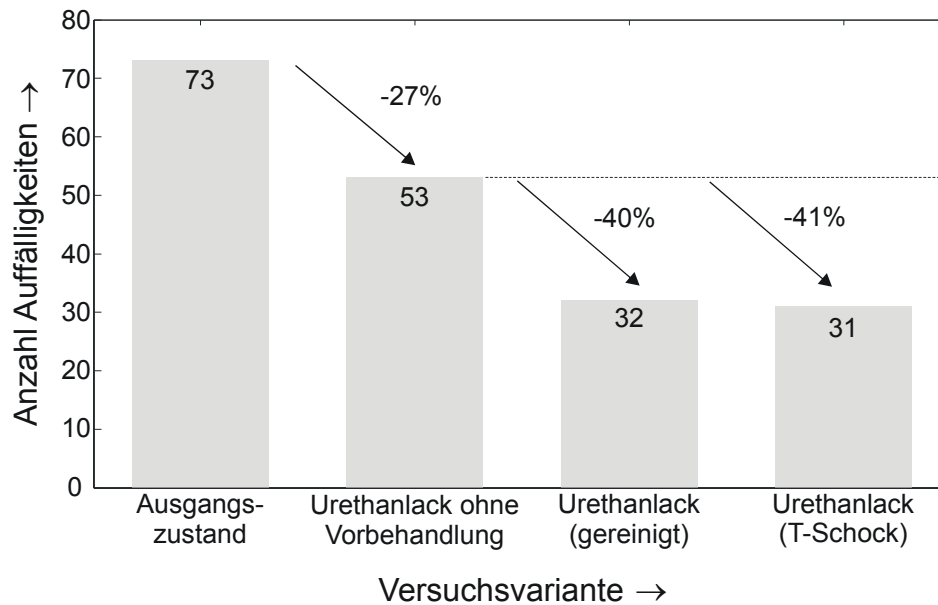


Bild 67: Einfluss einer vorgelagerten Reinigung und Temperaturschockprüfung auf die Klimabeständigkeit am Beispiel des UR-Lackes

Bis auf eine sporadische Auffälligkeit des QFP100T0.5-Bauelementes bei der gereinigten Variante waren hierbei nur die QFP240T0.5-Bauelemente für die Ausfälle verantwortlich. Alle anderen Bauelemente hatten die Prüfung fehlerfrei abgeschlossen, obwohl diese in den unbehandelten Tests mit der Urethanschutzlackierung zahlreiche Stromerhöhungen aufwiesen. Als wesentliche Erkenntnis daraus lässt sich ableiten, dass die mechanische Festigkeit einer Lackierung gesondert von der klimatischen Schutzwirkung zu betrachten ist, da durch die hohe thermische Belastung bei einer Temperaturschockprüfung Verunreinigungen eliminiert werden. Wenn auch in einem weiten Bauteilspektrum eine Verbesserung der Schutzwirkung durch einen Lackauftrag erreicht werden konnte, so hat sich doch eindeutig gezeigt, dass keiner der getesteten Schutzlacke eine vollständige und ganzheitliche Zuverlässigkeit bei Betauung gewährleisten kann. Obwohl der Urethan- und der Silikon Schutzlack an den standardisierten Kammstrukturen keine Fehler gezeigt haben, waren gerade diese beiden Lacksysteme bei den anderen Bauelementen äußerst auffällig. Dafür verantwortlich sind im Wesentlichen die geringe Schichtdicke und die unzureichende Abdeckung der Bauelementanschlüsse, welche zwingend erforderlich ist, um eine ausreichende Schutzwirkung zu erzielen. Gegensätzlich hat sich diesbezüglich der Acrylschutzlack verhalten. In diesem Zusammenhang müssen in zukünftigen Untersuchungen prozess- und fertigungsbedingte Einflussgrößen und Optimierungsmaßnahmen intensiv untersucht werden. Durch die gewonnenen Erkenntnisse wird der Handlungsbedarf nach standardisierten Prüfobjekten mit einem erweiterten Bauelementspektrum zur Qualifizierung von Schutzlackierungen verdeutlicht.

7 Automotivegerechte Prüfanforderungen

Wurden in den vorherigen Kapiteln die durch Betauung und hohe Luftfeuchtigkeit induzierten Fehlermechanismen, deren Auswirkungen sowie unterschiedliche Einflussgrößen mit standardisierten und individuellen Prüfverfahren ermittelt, so bleibt die Fragestellung nach den tatsächlich in Kraftfahrzeugen auftretenden klimatischen Belastungen noch offen. Bisherige Anforderungen der Automobilhersteller legen lediglich statische und zyklische Temperatur-Feuchte-Belastungen fest, welche mit Standardprüfverfahren für alle elektronischen Systeme einheitlich abzu prüfen sind. Ob und inwieweit die Belastungen an den Einbauorten von den normierten Anforderungen divergieren, ist bisher ungeklärt. Weiterhin fehlen Aussagen über die Relevanz feuchte- und betauungsbedingter Elektronikausfälle aus dem Kundenumfeld. Um dies zu beantworten, werden im Folgenden, nach einer einführenden Analyse von Elektronikausfällen aus dem Kundenumfeld, die klimatischen Anforderungen an verschiedenen Einbauorten in einem Fahrzeug unter verschiedenen Außenbedingungen und bei unterschiedlichen Testszenarien untersucht. Weiterhin werden die Anwendbarkeit bestehender Lebensdauermodelle für die Testzeitberechnung bei Klimaprüfungen an einem komplexen elektronischen System untersucht und daraus, in Kombination mit den realen Belastungen im Fahrzeug, Handlungsempfehlungen für die Design- und Produktqualifikation elektronischer Systeme für automobiler Anwendungen abgeleitet.

7.1 Felddatenanalyse betauungsbedingter Ausfälle

Gerade in der Automobilindustrie existiert, wie bei vielen industriellen Großunternehmen, ein strukturierter Informationsfluss entlang des Produktlebenszykluses von der Planung bis zur Herstellung und Nutzung eines Fahrzeugs. Rechnergestützte Fehlerdatenbanken helfen dabei, Produktfehler zu identifizieren und nach Ursachenanalysen die Problemfälle im Service zu beseitigen. Treten Ausfälle von Elektronikbaugruppen innerhalb des Gewährleistungszeitraums im Kundenumfeld auf, so werden die betroffenen Systeme in den Werkstätten getauscht und die fehlerhaften Baugruppen über den Automobilhersteller zu den Systemlieferanten zur Fehleranalyse transferiert. Je nach Ausfallgrund werden die Kosten vom Kunden, dem Lieferanten oder dem Automobilhersteller gedeckt. Nicht selten tritt der Fall ein, dass bei der Fehleranalyse keine Ausfallursache identifiziert werden kann, und das Gerät ordnungsgemäß funktioniert. In diesem Fall lautet das Analyseergebnis „kFf - kein Fehler feststellbar“ beziehungsweise „ntf - no trouble found“.

Um Erkenntnisse über das Auftreten feuchte- und betauungsbedingter Fehler im Feld zu gewinnen, gilt es, einerseits firmeninterne Fehlerdatenbankeinträge

hinsichtlich betauungsinduzierter Fehlermechanismen und Fehlerauswirkungen zu analysieren und andererseits aktuelle Ausfälle aus dem Feld individuell und expertenbasiert zu untersuchen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden bei der Firma Audi registrierte Felddausfälle aus dem Bereich Elektrik und Elektronik über einen Erfassungszeitraum von drei Jahren aus dem deutschen Markt über alle Fahrzeugmodelle hinsichtlich feuchte- und betauungsbedingter Fehler betrachtet. Trotz einer umfangreichen Datenmenge von über 61.000 Fehlereinträgen im genannten Betrachtungszeitraum konnten keine Einträge identifiziert werden, welche eindeutig auf eine Betauung oder dadurch bedingte Fehlermechanismen schließen lassen. Dies liegt vorwiegend darin begründet, dass das hochsporadische Fehlerverhalten bei Betauung eine Fehleranalyse erschwert und teilweise sogar unmöglich macht.

Im Rahmen kontinuierlicher Beobachtungen von Rückläufern aus dem Kundenumfeld und einzelner zielgerichteter Analysen potenzieller, durch den Effekt der Betauung verursachter Ausfallteile, konnte der Fehlermechanismus der ECM an zwei unterschiedlichen elektronischen Systemen im Fahrzeug nachgewiesen werden. Eine Identifikation der Fehlerursache ist nur darauf zurückzuführen, dass bei beiden Systemen der Fehlermechanismus aufgrund der hohen Funktionsintegration und des Vernetzungsgrades aktueller Fahrzeuge zu einer eingeschränkten Mobilität für die Kunden führte. Begünstigt wurde die Ermittlung dieser Ausfälle durch die Tatsache, dass es sich nicht um Einzelausfälle, sondern um eine Akkumulation mehrerer Ausfälle über einen Zeitraum von nur wenigen Monaten handelte. Bei den identifizierten Ausfällen handelt es sich um miniaturisierte Elektroniksysteme, welche sich im Fahrzeuginnenraum befinden und aufgrund der Einbausituation und aufgrund thermischer Anforderungen nicht in dichten Schutzgehäusen verbaut sind. Zudem konnte festgestellt werden, dass keine Ausfallabhängigkeit von einem spezifischen Fahrzeugmodell besteht, da baugleiche Systeme in verschiedenen Modellen betroffen waren. Dies deutet darauf hin, dass die klimatischen Belastungen an den entsprechenden Einbauorten in unterschiedlichen Fahrzeugen ähnlich hoch sind.

Um eine Korrelation zu klimatischen Außenbedingungen, und damit zu ausfallkritischen Jahreszeiten, herzustellen, gilt es, zu den konkreten Ausfallzeitpunkten das jeweilige Temperaturniveau im Einsatzland zu ermitteln. Bild 68 zeigt die Ausfallzeitpunkte eines der genannten Systeme und die in diesem Zeitraum vorherrschenden Tagesminimal- beziehungsweise Tagesmaximaltemperaturen. Darüber hinaus ist in der Abbildung rechts der ausfallverantwortliche Fehlermechanismus dargestellt. Hierbei führte die Ausbildung von Zinn-Blei-Dendriten auf der Unterseite eines Keramik Kondensators zu einer Funktionsstörung, wodurch ein Fahrbetrieb verhindert wurde. Alle 17 Ausfälle über den dargestellten Zeitraum wurden durch den gleichen Fehlermechanismus an der selben Stelle

verursacht. Durch Detailanalysen im Rasterelektronenmikroskop konnten das metallische Brückenwachstum sowie lokale Flussmittelreste nachgewiesen werden.

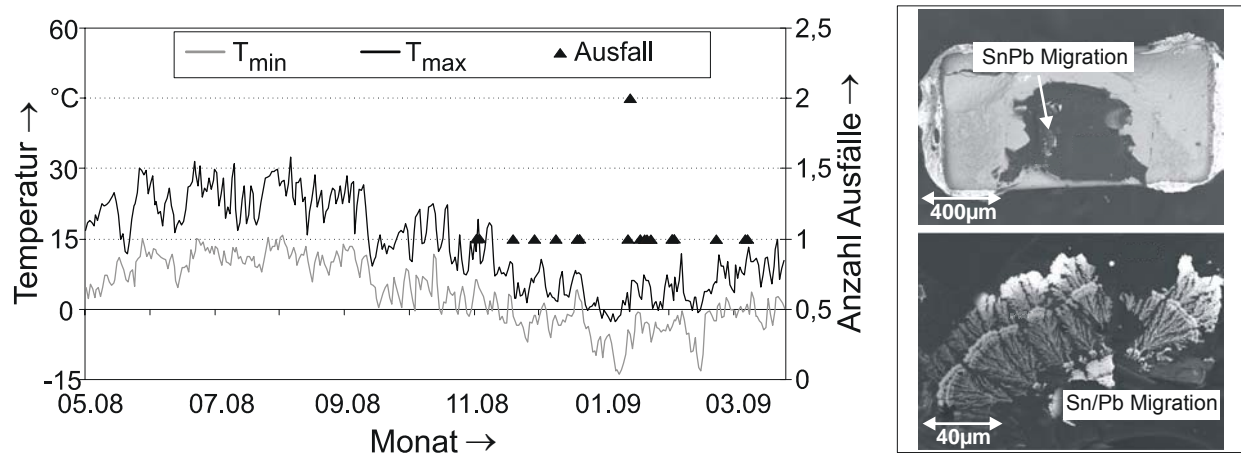


Bild 68: Ausfälle eines Systems zwischen Mai 2008 und April 2009 verursacht durch ECM auf der Unterseite eines Keramik Kondensators

Bei näherer Betrachtung der Ausfälle sowie der klimatischen Umgebungsbedingungen im Einsatzland der Fahrzeuge lässt sich feststellen, dass die Ausfälle des Systems primär bei Umgebungstemperaturen zwischen etwa -15 °C und 10 °C aufgetreten sind. Dass gerade bei tiefen Temperaturen hohe Klimabelastungen im Fahrzeug auftreten können, wird in Kapitel 7.3 noch ausführlich erläutert.

Durch eine schnelle Umlagerung aus der Klimakammer von -10 °C in Normklima, bei der eine Kondensation auf den Baugruppen auftritt, in Verbindung mit dem elektrischen Betrieb der auffälligen Systeme konnte das Fehlerbild, identisch den Ausfällen aus dem Kundenumfeld, reproduzierbar nachgestellt werden.

Mit dem Nachweis der Feldrelevanz von ECM an elektronischen Systemen im Automobil können zwei wesentliche Schlussfolgerungen abgeleitet werden: Zum einen herrschen an verschiedenen Einbauorten im Fahrzeug derartige Belastungen, um den Fehlermechanismus der ECM auszulösen und zum anderen wird die Komplexität des Fehlers sowohl in der Fehleranalyse als auch in der Fehlerauswirkung verdeutlicht. Die sehr hohe Wahrscheinlichkeit des Fehlermechanismus der ECM sporadische Funktionsstörungen zu verursachen, lässt annehmen, dass ein gewisser, jedoch nicht quantifizierbarer Anteil von Fehlern im Kundenumfeld auf betauungsbedingte Kurzschlüsse zurückzuführen ist. Um das sporadische Fehlerverhalten durch Migration zu verdeutlichen, ist deren Anteil aus den in Kapitel 5 durchgeführten Testreihen sowie ein entsprechender exemplarischer Stromverlauf in Bild 69 dargestellt. Daher können Ausfälle im Kundenumfeld durch ECM meist nur dann identifiziert werden, wenn hierbei statische Funktionsstörungen erzeugt werden, oder wenn eine

sporadische Störung zu einer systembedingten permanenten Beeinträchtigung der Funktionalität führt.

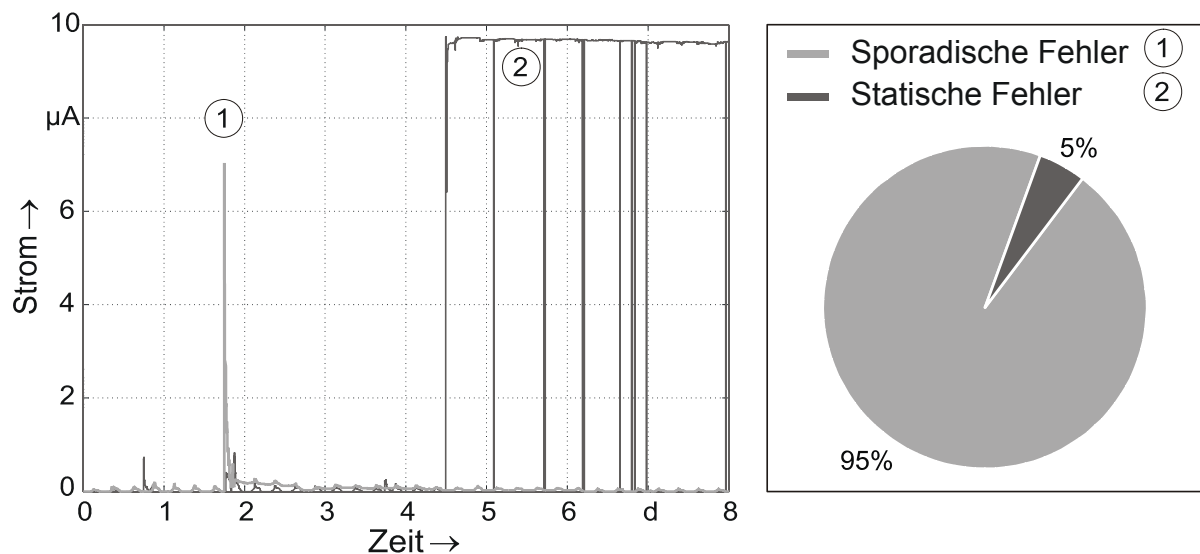


Bild 69: Darstellung sporadischer und statischer Fehler durch ECM sowie deren Verteilung auf die Untersuchungen aus Kapitel 5

7.2 Makroklimatische Anforderungen an das Gesamtfahrzeug

Damals wie auch heutige Kraftfahrzeuge werden nahezu identisch für alle Länder der Erde produziert und dorthin verkauft. Daher müssen sämtliche Komponenten und Systeme im Automobil den weltweit vorherrschenden klimatischen Einsatzbedingungen standhalten. Abhängig von den makroklimatischen Belastungen im Einsatzland eines Fahrzeugs variieren auch die mikroklimatischen Anforderungen an die elektronischen und mechatronischen Systeme. Gemäß dem in Bild 70 dargestellten Vorgehen, müssen die äußeren klimatischen Belastungen bekannt sein, bevor über deren reproduzierbare Nachbildung das einbauortspezifische Mikroklima erfasst und bewertet werden kann.

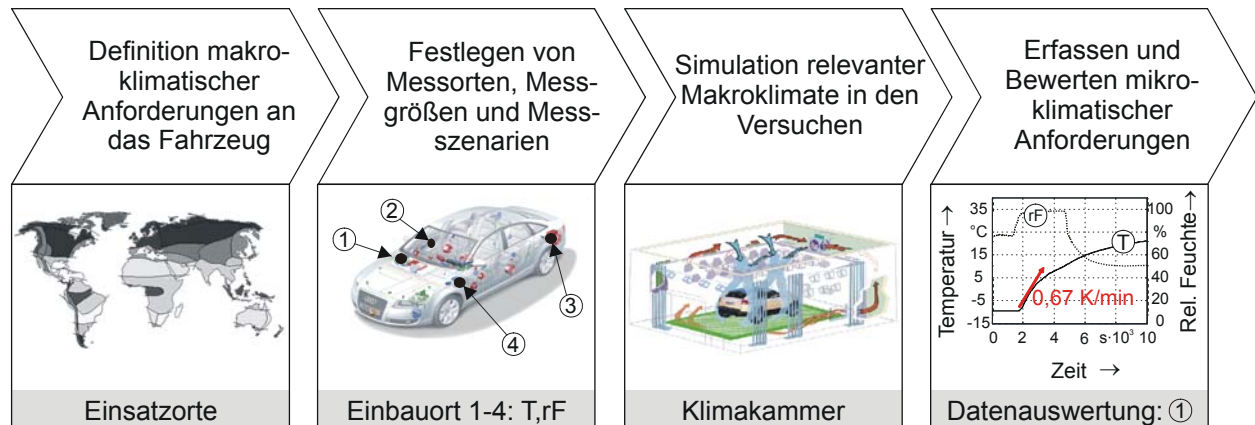


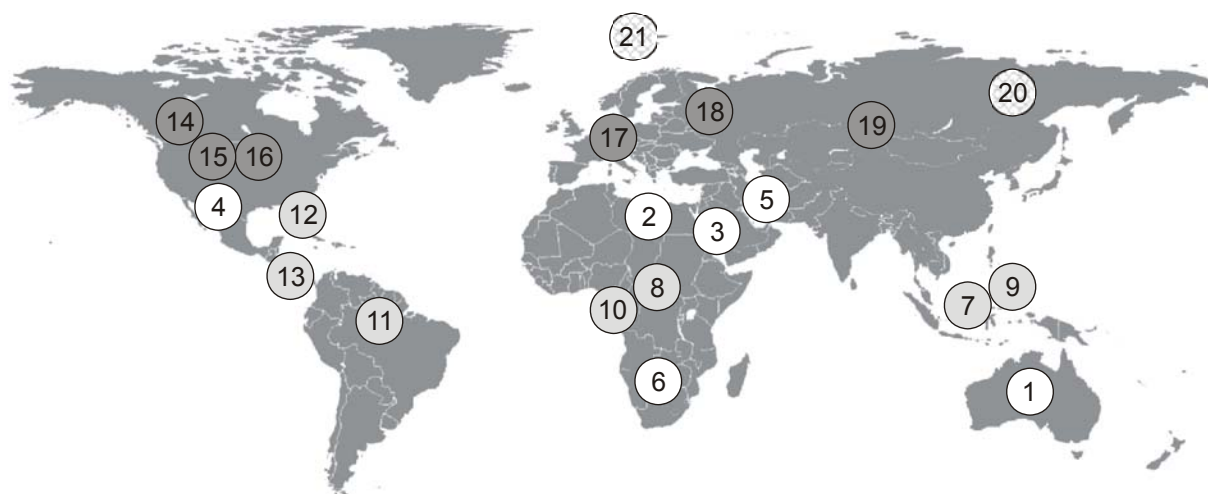
Bild 70: Vorgehen zur Bestimmung mikroklimatischer Belastungen aufgrund makroklimatischer Anforderungen an das Gesamtfahrzeug

Um makroklimatische Anforderungen wie Tagestemperaturverlauf oder maximal auftretende Temperaturgradienten sowie die dabei vorherrschende Luftfeuchtigkeit nachstellen zu können, müssen die Klimadaten relevanter globaler Einsatzorte in einem hohen Detaillierungsgrad vorliegen. Obwohl eine Reihe von Ansätzen zur Klassierung der weltweiten klimatischen Bedingungen existiert, so reicht der dabei umgesetzte Detaillierungsgrad der Informationen bei weitem nicht aus, um daraus relevante Belastungsszenarien abzuleiten. Exemplarisch können Klimamodelle nach Köppen-Geiger oder Neef genannt werden, welche das globale Klima anhand der im jeweiligen Land herrschenden Temperaturen, der dort auftretenden Niederschlagsmenge oder der Vegetation in 31 beziehungsweise 14 Klimazonen einteilen [35][132]. Anhand der Belastungsarten Temperatur, Temperaturgradienten und relativer Luftfeuchtigkeit, welche als zuverlässigkeitskritisch für elektronische Systeme betrachtet werden, wird im Weiteren eine zusätzliche Vereinfachung der Klimaklassifizierung nach Neef vorgenommen. Dazu gilt es, die 14 vordefinierten Klimazonen weiter zu aggregieren, um ein für die Versuchsdefinition einsetzbares makroklimatisches Grundmodell zu erzeugen, in dem die globalen klimatischen Anforderungen an Kraftfahrzeuge festgelegt sind. Mittels der Kriterien Extremtemperaturen, Temperaturdeltas im Tages- und Jahresverlauf sowie die entsprechenden Bereiche der relativen Luftfeuchtigkeit lassen sich drei Klimatypen identifizieren. Diese Klimatypen, deren Abkürzungen sowie die klimatischen Merkmale sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Trockenes Passatklima „Heißland“	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturen hoch, mit starken Temperaturschwankungen zwischen Sommer und Winter - ganzjährig geringe bis keine Niederschläge
Äquatorialklima „Feucht-/Warmland“	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturen ganzjährig hoch, dabei nur minimale Temperaturschwankungen zwischen Sommer und Winter - Niederschläge ganzjährig hoch, mit erhöhten Niederschlägen im Frühjahr und Herbst
Kühles Kontinentalklima „Kaltland“	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturen kühlgemäßigt, starke bis extreme Schwankungen zwischen Sommer und Winter - Niederschläge fallen ganzjährig mit Maximum im Sommer
Polarklima	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturen fast ganzjährig unter 0 °C - Niederschläge ganzjährig niedrig

Tabelle 8: Aggregierte Klimazonen und deren Merkmale

Die zusammengeführten Klimazonen bieten aufgrund der groben Klimaeinteilung eine gewisse Unschärfe, welche jedoch im Rahmen der vorgesehenen Anwendung dieses Grundmodells vernachlässigt werden kann. Ergänzend zu den aufgeführten Klimazonen werden darüber hinaus die Extrembedingungen in subpolaren und polaren Regionen berücksichtigt. Hierbei findet allerdings nur eine Betrachtung der minimalen und maximalen Temperaturgrenzen statt. Die in Bild 71 visualisierten und deklarierten Messorte wurden herangezogen, um die definierten Klimatypen mit Klimadaten zu hinterlegen.



Heißland	Feucht-/Warmland	Kaltland	Polarklima
1. Alice Springs (Australien)	7. Balikpapan (Indonesien)	14. Banff, Alberta (Kanada)	20. Ojmjakon (Russland)
2. Kufra (Libyen)	8. Bangui (Zentralafrika)	15. Bismarck (USA)	21. Svalbard (Norwegen)
3. Medina (Saudi Arabien)	9. General Santos (Philippinen)	16. Duluth (USA)	
4. Phoenix (USA)	10. Lambarene (Gabun)	17. Ingolstadt (Deutschland)	
5. Tabas (Iran)	11. Manaus (Brasilien)	18. Moskau (Russland)	
6. Tsabong (Botswana-Kalahariwüste)	12. Miami (USA)	19. Nowosibirsk (Russland)	
	13. Panama-Stadt (Panama)		

Bild 71: Übersicht ausgewählter Orte je Klimazone

Um die globalen Klimaanforderungen detailliert in Klimakammerversuchen zu reproduziert, werden hohe Anforderungen an die zeitliche Auflösung der Klimadaten gestellt. Für eine statistische Absicherung der Daten wird ein Betrachtungszeitraum von fünf Jahren untersucht. Die für das Modell benötigten Klimadaten werden von regionalen Anbietern, wie zum Beispiel dem *Deutschen Wetterdienst* oder dem *National Climatic Data Center* für einzelne Länder bereitgestellt [24][90]. Für eine ganzheitliche Datenakquise aller 21 Messstationen eignen sich diese lokalen Anbieter allerdings nicht. Diesbezüglich erweist sich die Datensammlung über das Unternehmen *Weather Underground Inc.* höchst effizient. Dieses sammelt weltweit Daten von Flughafenwetterstationen und mehr als 13.000 privaten Wetterstationen und stellt diese Daten in einer zeitlichen Auflösung zwischen vier Minuten und acht Stunden als speicherbare Datensätze zu Verfügung [171]. Für eine vollautomatisierte Auswertung der Messdaten hinsichtlich Temperaturen, Temperaturdeltas, Temperaturgradienten und den entsprechenden Luftfechtigkeiten wurde ein Softwaretool erstellt, welches die Klimadaten der in Bild 71 aufgeführten Messstationen über einen Zeitraum von fünf Jahren vollautomatisiert abrufen, verarbeitet und visualisiert. Auf diese Art und Weise ist eine effiziente Auswertung der etwa 3,6 Millionen Messwerte möglich. Im Rahmen der Messdatenverarbeitung werden Datenindizes vereinheitlicht, Messfehler außerhalb der Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsgrenzen beseitigt sowie fehlende Messwerte mittels der kubischen Interpolation und der stückweise kubischen Hermite-Interpolation geschätzt. Dadurch wird erreicht, dass bei wenig fehlenden Messwerten ein Tagesverlauf originalgetreu reproduziert und bei vielen fehlenden Messwerten keine neuen Extrema generiert werden.

Die Klimadaten werden getrennt nach Nord- und Südhalbkugel betrachtet, da zur Sommerzeit auf der Nordhalbkugel in der südlichen Hemisphäre Winter vorherrscht und dadurch eine globale Mittelwertbildung das Ergebnis verfälscht. Um einen weltweiten Vergleich dennoch zu ermöglichen, werden die Monatswerte von Orten auf der Südhalbkugel um sechs Monate rotierend verschoben. Der Jahresverlauf der Nord- und Südhalbkugel ist dadurch konform. Ein Vergleich der gesammelten Wetterdaten der einzelnen Stationen mit den Merkmalen der Klimaklassifikation nach Neef zeigte, dass die Aggregation der Klimazonen und die verwendeten Orte der Messstationen korrekt sind. Für die weiteren Untersuchungen der klimatischen Bedingungen zur Ermittlung mikroklimatischer Anforderungen an verschiedenen Einbauorten im Fahrzeug ist ein Wissen über die Belastungsverläufe während eines Tages notwendig. Ein Detaillierungsgrad auf Monatsebene, wie dieser in der Klimaklassifikation nach Neef gegeben ist, kann nicht herangezogen werden, um beispielsweise einen realen Tagesverlauf in einer der Klimazonen nachzustellen. Mit Hilfe der ermittelten globalen Klimadaten wird eine detaillierte Auswertung und Analyse der Temperaturverteilungen, der Verteilungen der relativen Luftfeuchtigkeiten oder der Verteilungen der Tagestemperaturdeltas ermöglicht. Diese sind in Bild 72 dargestellt. Gerade für eine Häufigkeitsabschätzung einzelner Belastungszenarien über Fahrzeuglebensdauer sind diese Informationen von großer Bedeutung und stellen die Basis für weitere Betrachtungen dar.

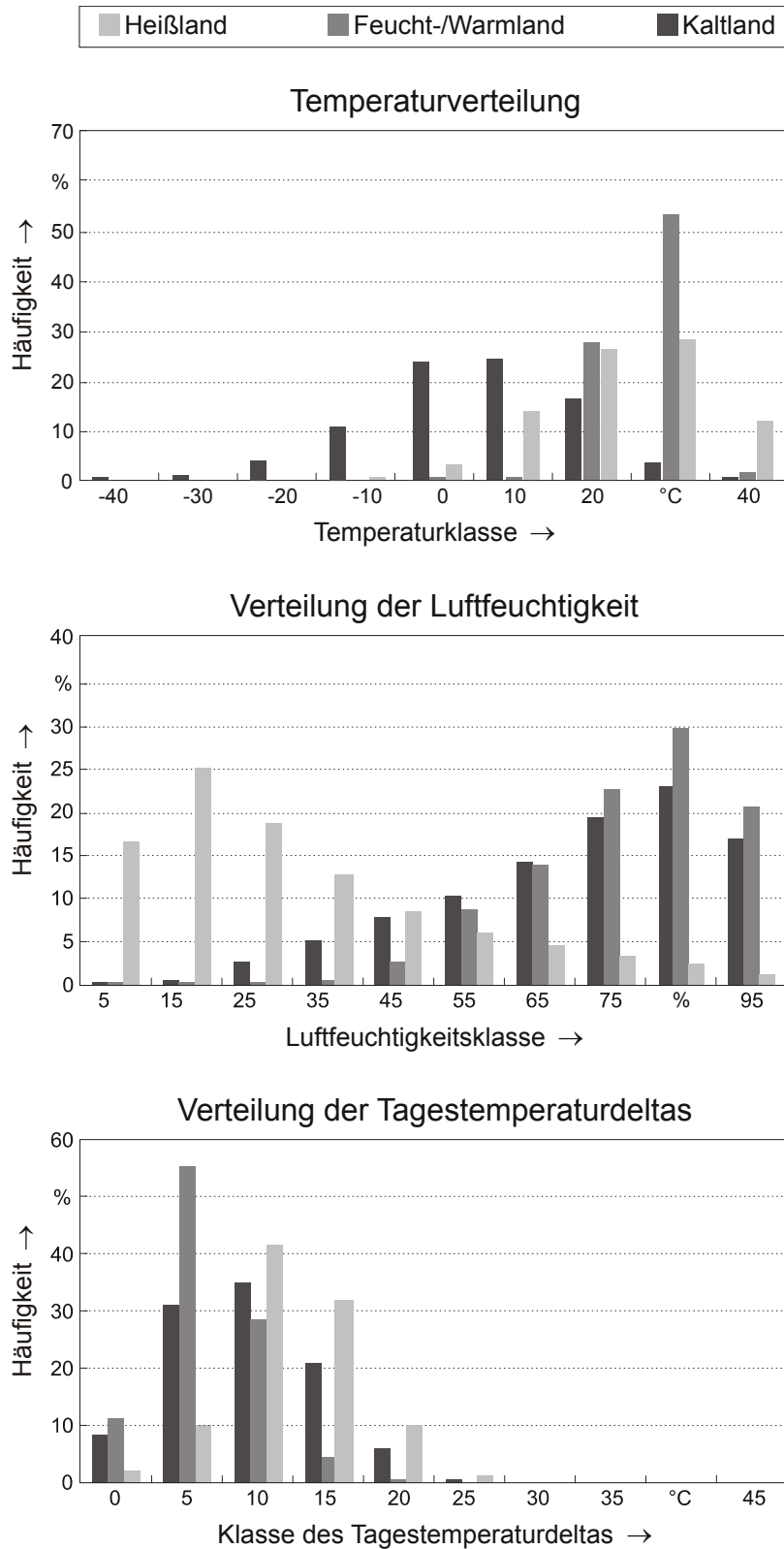


Bild 72: Häufigkeitsverteilungen ausfallrelevanter Belastungen für die aggregierten Klimazonen

In einem nächsten Schritt erfolgte die Unterteilung der ermittelten Klimabedingungen in Standard- und Extrembedingungen. Standardbedingungen stellen die unteren und oberen Grenzwerte dar, welche 95 % der Grundgesamtheit aller Klimawerte beinhalten. Die Extrembedingungen enthalten die Grenzwerte aus 100 % aller Klimawerte. Beim Polarklima werden nur die Extrema und der Durchschnitt berücksichtigt. In der Tabelle 9 wird eine Übersicht über die jeweiligen klimatischen Bedingungen gegeben.

		Temperatur in °C		Tagestemperaturdelta in K		Temperaturgradient in K/min		Relative Luftfeuchtigkeit in %	
		Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Heißland	Extrema	-5	46	0	38	0	1,4	4	100
	Standard	5	41	3	23	0	0,15	5	85
	Durchschnitt	25		12		0,05		24	
Feucht-/ Warmland	Extrema	4	38	0	27	0	1	4	100
	Standard	20	33	0	14	0	0,1	47	99,5
	Durchschnitt	27		6		0,03		81	
Kaltland	Extrema	-41	38	0	37	0	1,3	3	100
	Standard	-21	26	1	20	0	0,11	28	99
	Durchschnitt	6		9		0,04		75	
Polar- klima	Extrema	-59	31	0	28	0	1,4	4	100
	Standard	-	-	-	-	-	-	-	-
	Durchschnitt	-3		6		0,02		71	

Tabelle 9: Klimatische Eigenschaften der aggregierten Klimazonen

Bei der Betrachtung der makroklimatischen Anforderungen gilt es neben den klimatischen Parametern auch den Wärmeeinfluss durch die Solarstrahlung zu berücksichtigen. Als Solarstrahlung bezeichnet man die in der Sonne durch Kernfusion erzeugte elektromagnetische Strahlung. Ein Teil der Solarstrahlung wird an der Atmosphäre sowie an Teilchen in dieser reflektiert, wohingegen ein weiterer Strahlungsanteil von Objekten in der Atmosphäre absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Die restliche Strahlung gelangt zur Erdoberfläche und wird dort in Wärme umgewandelt. Die Summe aus direkter und diffuser Strahlung wird als Globalstrahlung bezeichnet [92][177]. Um den Einfluss der solaren Strahlung auf das Mikroklima an verschiedenen Verbauorten in einem Automobil zu bewerten, wird diese im Folgenden näher untersucht. Dazu wurden Daten von drei Wetterstationen in Deutschland über einen Zeitraum von 2006 bis 2008 analysiert und die Tagesstrahlungsintensität (-stärke) zu unterschiedlichen

Jahreszeiten erfasst. Da der Monat Mai als Monat mit den höchsten Strahlungsintensitäten des Jahres gilt, wurde dieser repräsentativ für die Sommermonate gewählt [24]. Die Daten des deutschen Wetterdienstes lagen als Stundensummen der Uhrzeiten 11:00-12:00 Uhr, 13:00-14:00 Uhr, 15:00-16:00 Uhr sowie 17:00-18:00 Uhr in der Einheit J/cm^2 vor. Aus der Stundensumme und der mathematischen Beziehung

$$1 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 1 \text{ W} \quad (\text{Gl. 59})$$

erfolgte die Transformation der Werte in flächenbezogene Strahlungsleistungen. Die geografischen Messorte innerhalb Deutschlands sowie die durchschnittlichen und absoluten Tagesmaximalwerte der Globalstrahlung für verschiedene Zeiträume werden in Bild 73 gezeigt.

	20.12.-12.01.	01.02.-28.02.	01.05.-31.05.
① Schleswig	66,7/197 W/m^2	187/480 W/m^2	679/914 W/m^2
② Würzburg	132/313 W/m^2	279/522 W/m^2	672/917 W/m^2
③ Hohenpeissenberg	252/366 W/m^2 *	381/644 W/m^2	681/944 W/m^2

* Werte aus dem Jahr 2006 nicht mit einbezogen




Bild 73: Übersicht der durchschnittlichen und absoluten Tagesmaximalwerte der Globalstrahlung in Deutschland zu unterschiedlichen Jahreszeiten

Zu erkennen ist ein deutliches Nord-Süd-Gefälle der Strahlungsintensitäten zur Jahreswende sowie im Monat Februar. Im Monat Mai ist die Ausprägung des Nord-Süd-Gefälles nicht mehr erkennbar, was auf den erhöhten Sonnenstand im Sommer zurückzuführen ist. Umfangreiche Messreihen der Firma Audi haben ergeben, dass die maximal mögliche Strahlungsintensität in Wüstenregionen bei rund $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ liegt. Vergleicht man diese mit den analysierten Datenwerten, so zeigt sich, dass in den Sommermonaten in Deutschland ähnliche Strahlungsintensitäten wie in den Wüstenregionen erreicht werden können.

Ausgehend von den in diesem Abschnitt ermittelten makroklimatischen Bedingungen, denen Fahrzeuge ausgesetzt sind, werden diese Daten im Folgenden eingesetzt, um über definierte Testszenarien die Belastungen an unterschiedlichen Einbauorten von elektronischen Steuergeräten zu erfassen.

7.3 Mikroklimatische Betaungsanforderungen im Automobil

Das Mikroklima bezeichnet die klimatischen Bedingungen in einem definierten und abgeschlossenen Einbauraum. Abhängig von dem auf das Gesamtfahrzeug einwirkenden Klima, der spezifischen Nutzung einzelner Systeme sowie peripherer Faktoren kann das Mikroklima an verschiedenen Einbauorten variieren. Gerade die komplexe Wechselwirkung zwischen den unterschiedlichen Einflussgrößen führt zu einer deutlichen Komplexitätssteigerung bei der Ermittlung der Anforderungen an einem Einbauort. Bild 74 zeigt die Einflüsse, welche die klimatischen Bedingungen an Verbauorten elektronischer Systeme beeinflussen.

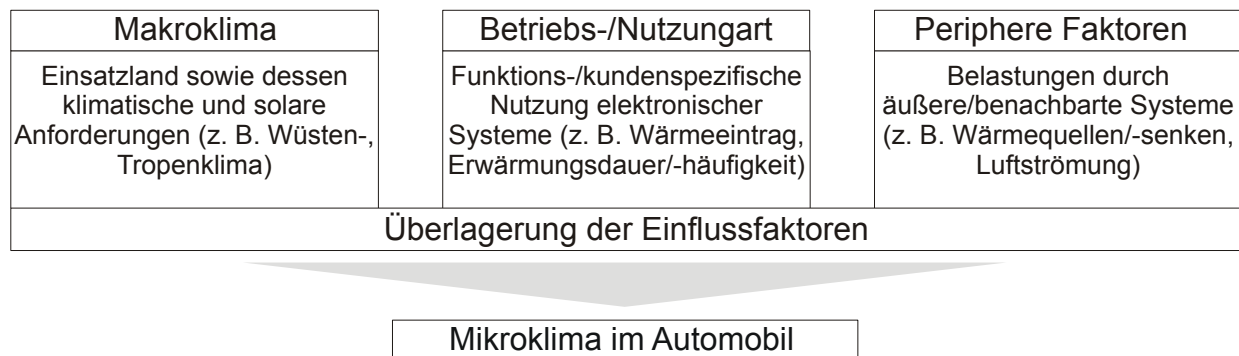


Bild 74: Übersicht der verschiedenen Einflussgrößen auf das Mikroklima

Um die klimatischen Anforderungen hinsichtlich einer Betaung beziehungsweise einer hohen Luftfeuchtigkeit genauer zu spezifizieren, wurden umfangreiche Messreihen durchgeführt. Ausgehend von den in Kapitel 7.2 ermittelten makroklimatischen Belastungen, die auf das Gesamtfahrzeug einwirken, erfolgte die Definition unterschiedlichster Testszenarien, welche betauungskritische Belastungen induzieren. Der Einsatz von speziellen Fahrzeugtestkammern zur Simulation realer Klimate sowie zur Simulation solarer Strahlung sind hierbei eine wesentliche Grundvoraussetzung. Aufgrund der Tatsache, dass der Effekt der Betaung dadurch verursacht wird, dass bei einer hohen relativen Luftfeuchtigkeit die Temperatur einer Baugruppe mit einer ausreichenden Differenz unter der Umgebungstemperatur liegt und damit der Taupunkt unterschritten wird, wurden primär Standzeiten beziehungsweise Szenarien im Anschluss an diese fokussiert. Versuche, bei denen durch eine Eigenerwärmung der Komponenten und Systeme im Fahrzeug eine Taupunktunterschreitung verhindert wird, wurden aus theoretischer Betrachtung und praktischen Vorversuchen als nicht relevant identifiziert.

Da eine vollständige und ganzheitliche Abdeckung der gesamten Modellpalette an Audi Fahrzeugen im Rahmen der Arbeit nicht möglich war, wurde als primäres Messfahrzeug für die Versuche ein Audi A5 Sportback mit einem 2.0 Liter

Dieselmotor ausgewählt. Dieses Fahrzeug wurde im September 2009 in den Markt eingeführt und stellt demnach ein technisch und technologisch innovatives Fahrzeug dar. Ergänzende Messungen fanden in einem Audi A6 Limousine mit 3.0 Liter Dieselmotor statt. Die Messorte waren in beiden Fahrzeugen bis auf zwei fehlende Messorte im Audi A6 identisch. Für die Erfassung und Aufzeichnung der Parameter Temperatur und Luftfeuchtigkeit wurde eine Messtechnik der Firma Rotronic eingesetzt. Hierbei wurden als Sensoren je Messort ein *Pt100 1/3 DIN* für die Temperatur- sowie ein *HYGROMER® AC-1* für die Luftfeuchtigkeitsmessung eingesetzt [144]. Insgesamt wurden mit diesem Messequipment 13 Einbauorte, welche sich an die konzerninterne Norm VW 80101 anlehnen, klimatisch untersucht [68]. Aufgrund der technischen Spezifikation der Sensorik konnten keine Messungen im Außenbereich sowie in Motornähe vorgenommen werden. Um präzise Informationen über die transienten klimatischen Bedingungen zu erhalten, erfolgte die Messdatenaufzeichnung mit einer zeitlichen Auflösung von 30 Sekunden. Die gewählten Messorte sowie die verwendete Messtechnik werden in Bild 75 dargestellt. Die Sensoren sind hierbei direkt an den aufgeführten Systemen beziehungsweise Einbauorten platziert worden, wohingegen der Datenlogger im Fahrzeuginnenraum positioniert war, um eine Zugänglichkeit für die Datenakquise zu gewährleisten.



Bild 75: Messorte zur Bestimmung mikroklimatischer Anforderungen im Automobil sowie das dabei verwendete Messequipment

Im Laufe der Versuche wurden etwa 1.100.000 Messwerte mit insgesamt 14.000 Stunden an Einzelmesskurvenverläufen aufgezeichnet. Um diese Datenmenge zu verarbeiten, sind einerseits eine durchgängige Bewertungsstrategie und

andererseits eine vollautomatisierte Datenverarbeitung nötig. Dies wurde durch die Entwicklung eines plattformunabhängigen Softwaretools realisiert, welches die gesamte Datenverarbeitung und deren Visualisierung ermöglicht. Neben den erfassten Temperatur- und Luftfeuchtwerten werden durch spezielle Algorithmen die Daten hinsichtlich Temperaturgradienten in definierten Feuchteklassen sowie Maximalbedingungen und deren Häufigkeitsverteilungen weiter aufbereitet. Somit ermöglichen die Auswertungen einen Vergleich der verschiedenen Versuchsreihen untereinander sowie mit bestehenden Prüfscenarien und liefern eine hohe Transparenz hinsichtlich fehlerrelevanter Belastungen. Aufgrund der benutzer- und datenformatenabhängigen Konfigurationsmöglichkeiten sowie der systemplattformunabhängigen Auslegung der Software ist eine Wiederverwendung für zukünftige Messreihen gewährleistet.

Unter Anwendung der in Kapitel 7.2 ermittelten makroklimatischen Anforderungen, welche in den Versuchen simuliert wurden, werden im Folgenden die Ergebnisse aus der Sonnensimulation sowie aus verschiedenen Klimakammerversuchen vorgestellt.

7.3.1 Simulation solarer Strahlung

Bei der realitätsnahen Nachbildung makroklimatischer Anforderungen an das Gesamtfahrzeug stellt die Simulation der solaren Strahlung einen wesentlichen Aspekt dar. Auf diese Art und Weise kann beispielsweise der Sonnentagesverlauf mit den unterschiedlichen Klimazonen der Erde kombiniert werden und dabei das Klima an den ausgewählten Einbauorten detektiert und verglichen werden.

In der für die Versuche verfügbaren Sonnensimulationskammer kann die Intensität der Bestrahlung zwischen 50 % und 100 % der Lampenleistung geregelt werden. Da keine detaillierte Information über die Änderung der Strahlungsstärke der Lampen bei Reduzierung der Leistungsstufen vorlag, wurde zunächst eine Referenzmessung mit Hilfe eines Strahlungssensors durchgeführt. Hierzu wurde in der Kammermitte auf einer Höhe von 1,20 m ein Pyranometer installiert, welches mit einem Datenlogger außerhalb der Kammer verbunden war. Entsprechend dem nach DIN 75220 normierten Vorgehen wurde, ausgehend von der maximalen Strahlungsleistung von 100 %, diese in Stufen von 10 % bis auf 50 % der Strahlungsleistung heruntergeregelt und die Strahlungsstärke erfasst [114]. Die Referenzmessung hat ergeben, dass die auf dem Fahrzeug auftreffende Strahlungsstärke nahezu linear mit der eingestellten Lampenleistungsstufe korreliert. Anhand der Tabelle 10 wird die je Leistungsstufe detektierte Strahlungsstärke dargestellt.

Leistungsstufe in %	50	60	70	80	90	100
Strahlungsstärke in W/m ²	480	602	711	815	918	1003

Tabelle 10 Übersicht der Strahlungsstärke in der Sonnensimulation bei unterschiedlichen Lampenleistungen

Damit kann durch eine definierte Ansteuerung der einzelnen Lampen und deren Intensität der Tagesverlauf der Sonne in der Kammer entsprechend Bild 76 nachgebildet werden. Hierbei wird der Verlauf der Sonne von deren Aufgang über die Mittagszeit bis zum Nachmittag abgebildet.

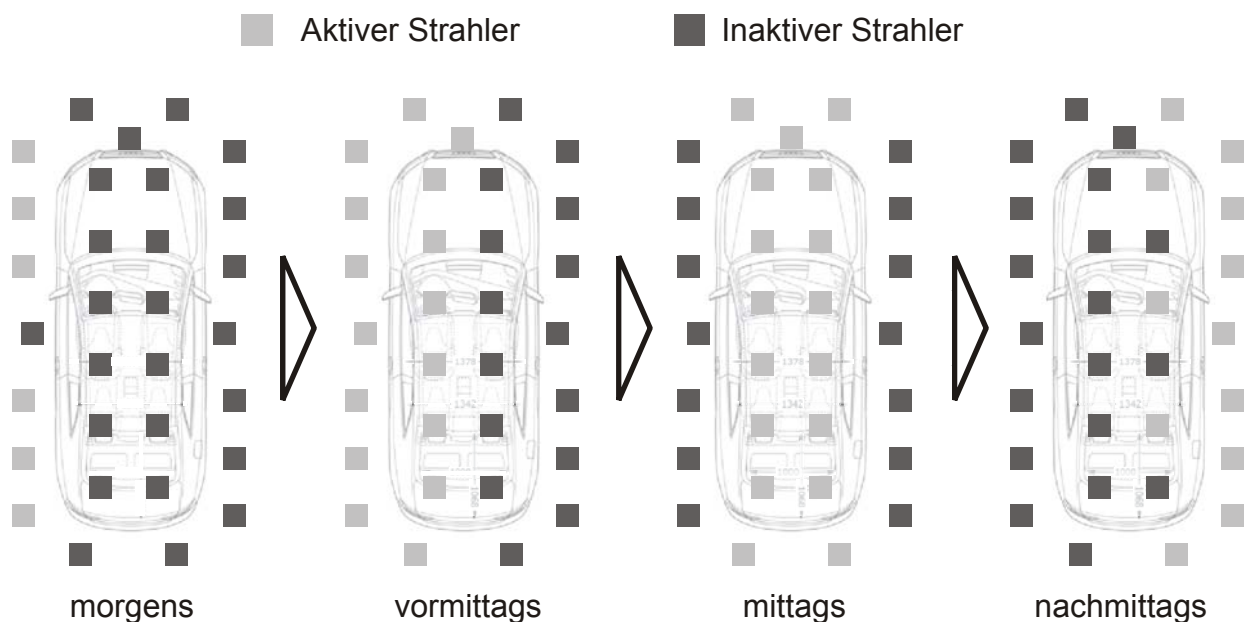


Bild 76: Simulation eines Sonnentagesverlaufs in der Klimakammer mit den entsprechenden fiktiven Tageszeiten

Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen wurde in diesem Versuch die plötzlich einsetzende Bestrahlung eines Fahrzeugs mit maximaler Strahlungsintensität zur Mittagszeit in den unterschiedlichen Klimazonen simuliert. Das reale Szenario, welches dabei nachgestellt wird, kann mit dem Umparken eines Fahrzeugs beziehungsweise mit der Umwanderung der Sonne um einen Schattenspender beschrieben werden. Jede Simulation der Klimazonen Heißland, Feucht-/Warmland und Kaltland erfolgte in drei Sequenzen. Zu Beginn wurde ein halber Tagessonnengang bei 100 % Strahlerleistung und konstanter unterer Außentemperatur durchgeführt. Im Anschluss daran erfolgte die Regelung der Umgebungstemperatur im Tagesgang von der unteren zur oberen Grenztemperatur und wieder zurück, wobei ab der Mittagszeit die Sonnensimulation mit 100% Strahlerleistung zugeschaltet wurde. Die dritte Sequenz enthält den Tagestempe-

raturgang der Umgebung bei einer ab der Mittagszeit zugeschalteten Strahlerleistung von 70 %. Bedingt durch den Tagesgang erhält man für Sequenz eins und drei Strahlungswerte von etwa 850 W/m^2 sowie 600 W/m^2 . Aufgrund technischer Restriktionen der verbauten Messtechnik konnten die Kaltlandversuche nur bei einer minimalen Außentemperatur von -10 °C durchgeführt werden. Während der Abkühlphase in der zweiten Prüfsequenz wurde die Kammertemperatur kurzzeitig auf -20 °C eingestellt, um den Abkühlprozess des Fahrzeugs zu beschleunigen. Eine Regelung der Luftfeuchtigkeit bei Temperaturen unter 10 °C war technisch nicht realisierbar. Die oberen Tagestemperaturen von Feucht-/Warmland sowie Heißland orientieren sich an den Maximalwerten der Standardbedingungen aus der Tabelle 9. Über das Tagestemperaturdelta der Klimazone wurde die untere Tagestemperatur festgelegt. Während der Messungen war die Zündung ausgeschaltet und die Fenster und Türen waren geschlossen. Bild 77 zeigt das Profil von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Strahlungsstärke bei der beschriebenen Versuchsstrategie in der Sonnensimulation.

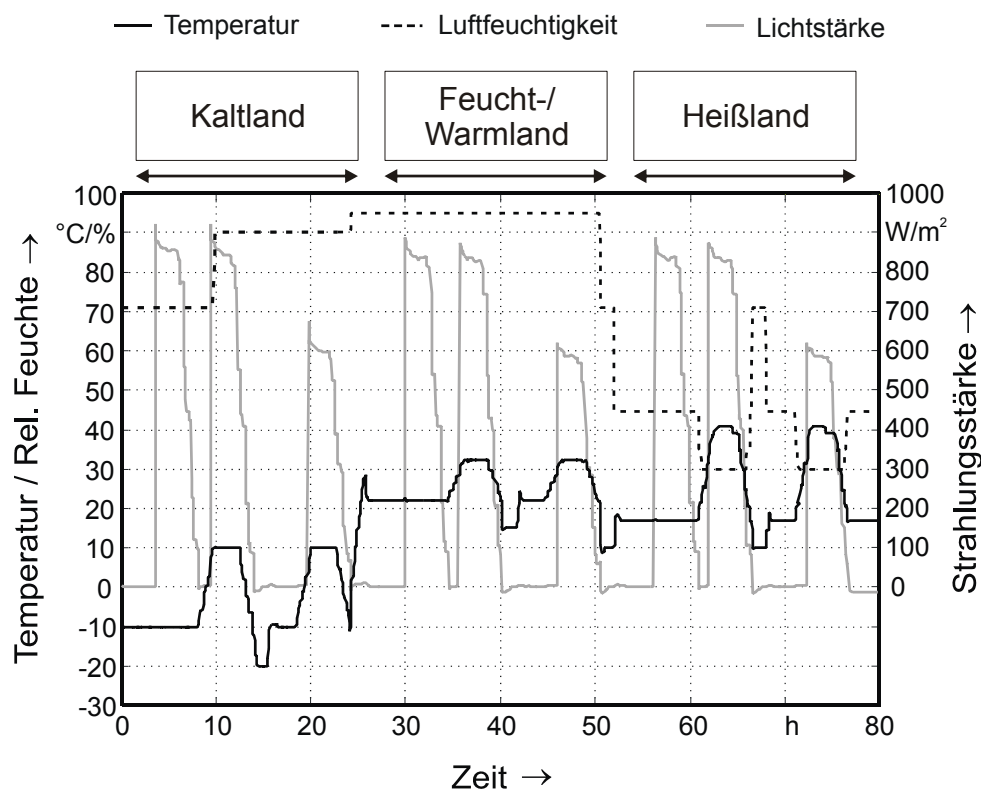


Bild 77: Definiertes Profil von Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Strahlungsstärke bei den Versuchen in der Sonnensimulation

Wertet man die Versuche hinsichtlich der genannten Belastungsparameter Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Temperaturgradienten aus, so ist zunächst an allen Messorten ein inverser Verlauf der Luftfeuchtigkeit zur Temperatur zu erkennen. Dies ist dadurch begründet, dass bei konstanter Wassermasse die

relative Luftfeuchtigkeit mit der Temperatur sinkt. Vergleicht man die maximalen Temperaturen an den Messorten bei konstanter Außentemperatur mit denen mit einem simulierten Tagestemperaturverlauf, so geht eine Änderung der Umgebungstemperatur nahezu linear in die Maximaltemperaturen an den Messorten ein.

Der Einfluss solarer Strahlung ist am stärksten im Dachbereich ausgeprägt. Somit treten im Dach die höchsten Maximaltemperaturen und die steilsten Temperaturgradienten auf. Bei einem Vergleich der drei simulierten Globalkimate erwärmen sich Elemente in der Nähe der Dachaußenhaut bei kälteren Außentemperaturen schneller auf als bei warmen. Unabhängig von den maximal erfassten Temperaturgradienten konnte bei allen Testszenarien an diesen Messorten ein Gradient von etwa 1 K/min für eine Dauer von 15 Minuten ermittelt werden. Um dies zu verdeutlichen, werden in Bild 78 die Klimaparameter am Lichtmodul über den gesamten Versuch sowie ein detaillierter Ausschnitt zu Beginn der Feucht-/Warmland-Sequenz dargestellt. In dem Detailausschnitt beträgt die relative Luftfeuchtigkeit zu Beginn etwa 63 %. Bereits nach wenigen Minuten wird ein Temperaturgradient von mehr als 2 K/min am Messort erreicht, wobei während des Temperaturanstiegs die relative Luftfeuchtigkeit bis zu diesem Zeitpunkt bis auf etwa 46 % gesunken ist.

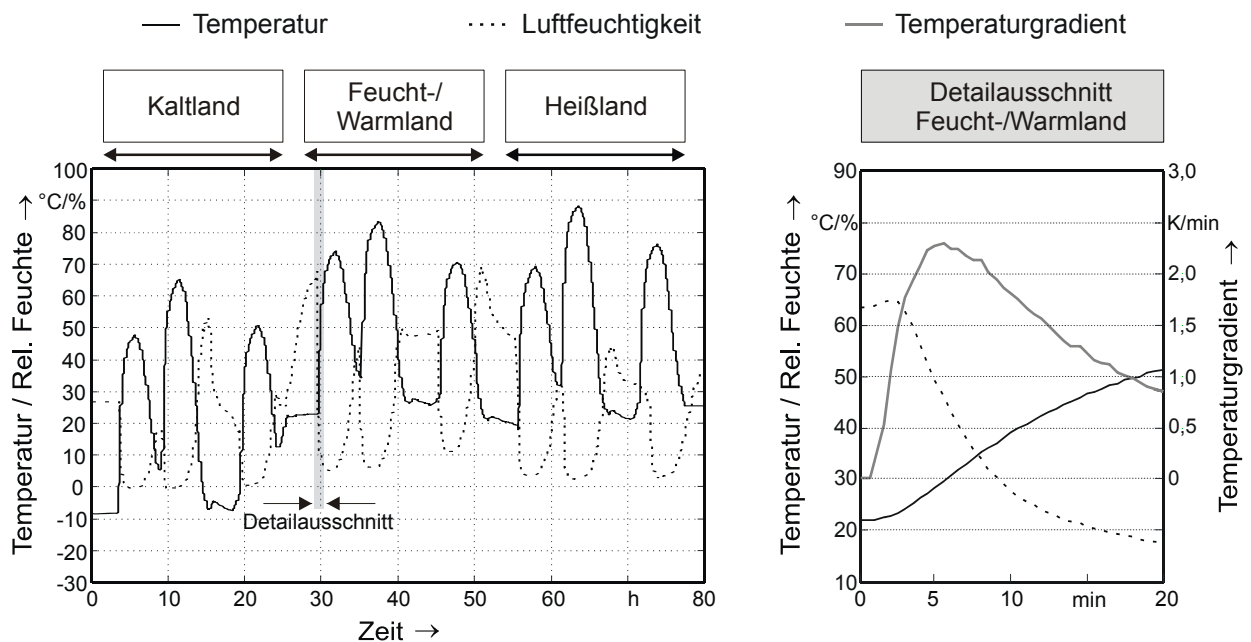


Bild 78: Klimatische Bedingungen am Lichtmodul (Messort 3) bei den Versuchen mit Sonnensimulation in der Gesamtansicht und an einem Detailausschnitt

Hinsichtlich der mit der Luftfeuchtigkeit abnehmenden Wahrscheinlichkeit einer Wasserkondensation sind Temperaturgradienten besonders dann als relevant zu bewerten, wenn eine Luftfeuchtigkeit von etwa 70 % überschritten wird. Abgesehen von dem Messort acht (Beifahrertür) konnten bei den geschilderten Szenarien in der Sonnensimulation keine betauungskritischen Temperaturgradienten im Innenraum detektiert werden. Hinter der Türverkleidung wurde in der Kaltlandsimulation ein Gradient von 0,3 K/min bei 85-90 % Luftfeuchtigkeit und in der Feucht-Warmland-Simulation ein Gradient von 0,31 K/min bei 95-100 % Luftfeuchtigkeit erfasst. Die Tabelle 11 gibt einen Überblick über die maximal erfassten Temperaturgradienten bei definierten Feuchteklassen.

Messstelle	Maximaler Temperaturgradient in K/min					
	70-75 %	75-80 %	80-85 %	85-90 %	90-95 %	95-100 %
1	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-
4	0,65	0,71	0,7	0,62	0,44	0,4
5	0,2	-	-	-	-	-
6	-	-	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-
8	0,22	0,23	0,26	0,3	0,32	0,31
9	0,47	0,41	0,41	0,421	0,42	0,34
10	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-
12	-	-	-	-	-	-
13	0,14	0,09	0,06	0,03	0,02	-

Tabelle 11: Maximale Temperaturgradienten an verschiedenen Einbauorten elektronischer Systeme bei definierten Luftfeuchtigkeitsklassen im Rahmen der Sonnensimulation

7.3.2 Aktive Fahrzeugaufwärmphase bei tiefen Außentemperaturen

Um die Einflüsse einzelner Szenarien, bei denen es zu einer Betauung auf den elektronischen Systemen kommen kann, zu untersuchen, wurden relevante Belastungsszenarien in einer Klimakammer mit Fahrtwindsimulation und Abgasvorrichtung nachgebildet. Aufgrund baulicher Einschränkungen des Vorserienfahrzeugs war ein Leerlaufbetrieb, jedoch kein Fahrbetrieb mit Lastsimulation auf dem Rollenprüfstand möglich. Der im Rahmen der Untersuchungen konzipierte Prüfablauf kann wie folgt beschrieben werden: Ausgehend von einer 13-stündigen Lagerung des Fahrzeugs bei -10 °C erfolgte ein 30minütiger Leerlaufbetrieb bei einer Motordrehzahl von 700 Umdrehungen pro Minute (U/min). Dieses Szenario simuliert eine Aufwärmphase des Fahrzeugs im Winter ohne Motorlast. Die Regelung der Fahrzeugklimaanlage betrug 21 °C bei mittlerer Gebläseeinstellung. Zudem war die Audioanlage während des gesamten Versuchs in Betrieb. Im Anschluss an diese anfängliche Aufwärmphase wurde die Motordrehzahl auf 2500 U/min erhöht und bei voller Heizleistung der Klimaanlage ein mit Wasser getränktes Handtuch im Fahrzeug platziert. Damit sollte der Feuchteintrag ins Fahrzeug durch beispielsweise Schnee oder Wasser nachgestellt werden. Abschließend wurde der Motor abgestellt und das Fahrzeug wieder abgekühlt.

Analysiert man die Messdaten, so zeigt sich bei diesem Versuchsszenario ein hohes Potenzial hinsichtlich einer möglichen Betauung. Vor allem in der ersten Aufheizphase des bei Minusgraden temperierten Fahrzeugs können starke Temperaturgradienten bei hohen Luftfeuchtigkeiten identifiziert werden. Abhängig vom jeweiligen Messort variieren maximale Luftfeuchtigkeit, Maximaltemperaturen und entsprechende Temperaturgradienten. Insbesondere an Stellen, die vom Luftstrom der Klimaanlage tangiert werden, findet ein schneller Temperaturanstieg statt. Isolierte Einbauorte wie beispielsweise der Kofferraum, die entfernt der Lüftungsöffnungen vorzufinden sind, reagieren einerseits thermisch etwas träger im Vergleich zu Messorten im Lüftungsstrom und andererseits werden geringere Temperaturdeltas erreicht. Um diesen Sachverhalt zu verdeutlichen, zeigt Bild 79 den Temperatur- und Feuchteverlauf im Mitteltunnel und im Kofferraum rechts bei den eingangs beschriebenen Testszenarien. Hier werden jeweils Luftfeuchtigkeiten von etwa 80 % im Maximum erreicht, wobei in diesen Phasen zusätzlich ein steiler Temperaturanstieg zu verzeichnen ist. Deutlich zu erkennen ist zudem, dass die Klimaanlage eine stark entfeuchtende Wirkung aufweist, wodurch die Luftfeuchtigkeit nach einem kurzzeitigen Anstieg nach dem aktiven Wassereintrag mit dem nassen Handtuch stark abnimmt.

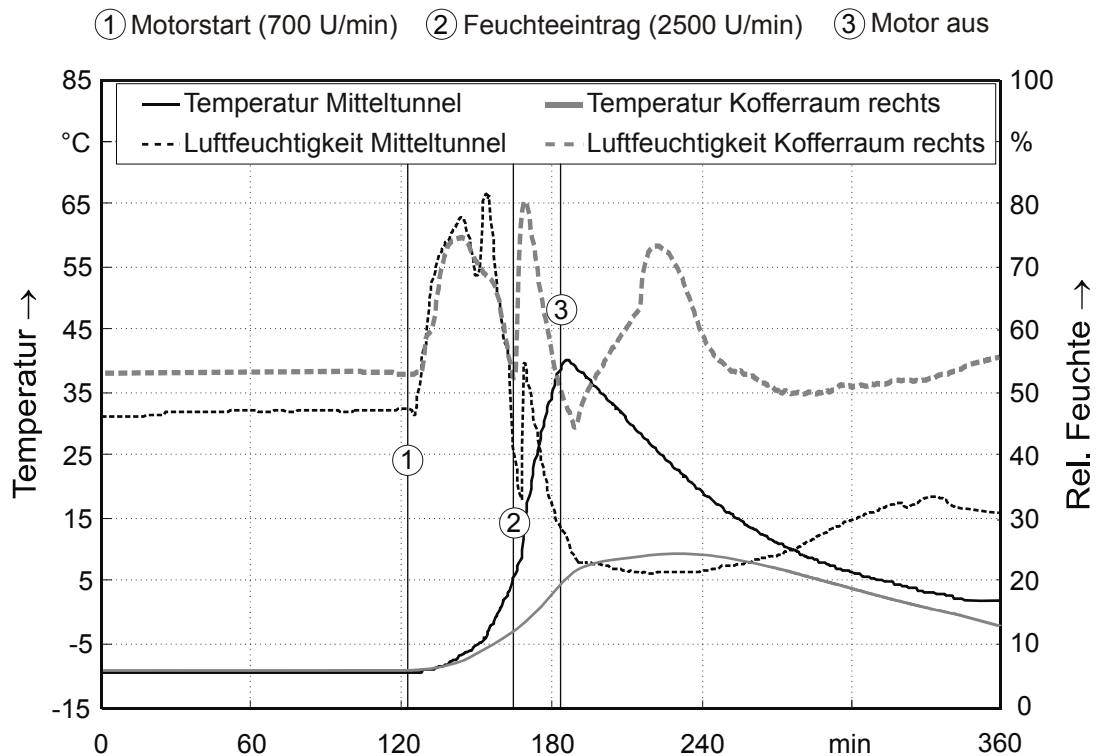


Bild 79: Verlauf von Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Mitteltunnel und im Kofferraum rechts während der Klimaversuche

Die durchschnittliche Umgebungstemperatur an den Messorten im Fahrzeuginnenen, bei denen die maximalen Temperaturgradienten auftreten, beträgt etwa 8 °C. Betrachtet man die Klimabedingungen links und rechts im Kofferraum, so zeigen sich in der rechten Seite aufgrund der dort verbauten Leistungselektronik des Verstärkers höhere Temperaturgradienten und eine um 5 °C höhere Maximaltemperatur. Ein weiterer Effekt, der bei einer Vielzahl der Messreihen beobachtet werden konnte, ist ein deutlicher früherer Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum thermischen Verhalten am Messort. Abhängig vom transienten Verhalten der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur kann je nach thermischer Masse der Baugruppe und der Art des Schutzgehäuses eine Wasseradsorption an der Oberfläche eines Schaltungsträgers stattfinden. Zusammenfassend werden in der Tabelle 12 die bei diesem Versuch maximal detektierten Temperaturgradienten bei unterschiedlichen Feuchteklassen aufgeführt.

Messstelle	Maximaler Temperaturgradient in K/min					
	70-75 %	75-80 %	80-85 %	85-90 %	90-95 %	95-100 %
1	0,78	-	-	-	-	-
2	0,49	0,45	0,37	-	-	-
3	1,01	1,25	1,29	-	-	-
4	1,16	1,03	0,47	0,56	0,42	0,4
5	0,78	0,26	0,03	-	-	-
6	1,35	1,35	1,53	1,61	1,57	-
7	0,81	0,72	0,68	-	-	-
8	0,39	0,54	0,54	0,48	0,46	-
9	0,33	0,35	0,36	0,15	0,17	-
10	0,7	0,73	-	-	-	-
11	0,57	0,25	0,17	-	-	-
12	0,7	0,69	0,61	-	-	-
13	0,14	0,27	0,38	0,43	0,43	-

Tabelle 12: Maximale Temperaturgradienten an verschiedenen Einbauorten elektronischer Systeme bei definierten Luftfeuchtigkeitsklassen im Rahmen der Klimakammerversuche

7.3.3 Passive Fahrzeugaufwärmung durch Kalt-Warm-Umlagerung

Wie bereits im letzten Versuch festgestellt wurde, stellt der Aufwärmvorgang eines bei tiefen Temperaturen temperierten Fahrzeugs eine hohe Belastung hinsichtlich einer hohen Luftfeuchtigkeit und einer potenziellen Betauung dar. Ein relevantes Extremszenario diesbezüglich ist neben der aktiven Temperaturerhöhung im Fahrzeug die passive Aufwärmung. Dies kann durch eine Umlagerung des Fahrzeugs aus einer kalten Klimakammer in eine warme Werkstatt erfolgen, wobei weder das Fahrzeug noch die elektronischen Systeme zu dieser Zeit in Betrieb sind. Insbesondere durch die niedrigen Temperaturen der elektronischen Systeme, welche sich bei aktivem Betrieb üblicherweise aufwärmen, ist eine erhöhte Kondensationsgefahr bei einem Eintrag thermischer Energie gegeben. Ein realer Anwendungsfall im Kundenumfeld lässt sich mit einem schnellen Umparken eines bei Minusgraden geparkten Fahrzeugs in eine Garage oder Werkstatt beschreiben. Um dieses Szenario hinsichtlich auftretender Belastungen zu bewerten, wurde ein Audi A6 Limousine an nahezu identischen Messorten wie

in dem Audi A5 Sportback mit Sensorik ausgerüstet und nach Konditionierungsphasen bei unterschiedlichen Temperaturen in der Klimakammer in eine Werkstatt mit 23 °C und etwa 60 % relativer Luftfeuchtigkeit umgelagert. Um ein realitätsnahes Prüfverfahren zu gewährleisten, wurde das Fahrzeug nach einer Konditionierungszeit von mindestens acht Stunden in der Kältekammer gestartet und innerhalb von weniger als 30 Sekunden in die Werkstatt gefahren. Die Türen wurden anschließend geöffnet und der Zündschlüssel abgezogen.

Bei der Analyse der Messdaten konnte eine Abhängigkeit der maximalen Luftfeuchtigkeit und deren Verweildauer von der Konditionierungstemperatur vor der Umlagerung identifiziert werden. Wie in Bild 80 am Beispiel der Messorte Lichtmodul und Beifahrertür deutlich wird, sinkt an beiden Messorten mit steigenden Lagertemperaturen der maximal erreichte Feuchtwert sowie die Haltedauer. Ein signifikanter Abfall der maximalen Luftfeuchtigkeit tritt ab einer Lagertemperatur von etwa 0 °C auf. Dieses Verhalten konnte bei allen Messorten beobachtet werden.

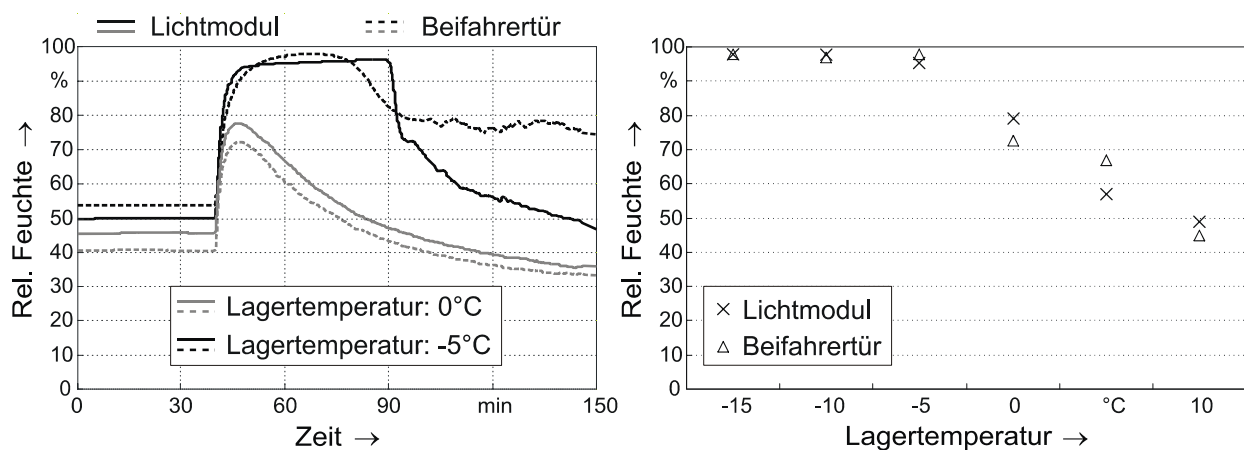


Bild 80: Verlauf der Luftfeuchtigkeit am Lichtmodul und in der Beifahrertür bei Lager-temperaturen von 0 °C und -5 °C sowie maximale Luftfeuchtigkeitswerte bei unterschiedlichen Lager-temperaturen

Da in der Realität deutlich niedrigere Außentemperaturen vorherrschen können, wurde der Umlagerungsversuch ergänzend bei einer Konditionierung von -25 °C durchgeführt. Der Datenlogger wurde hierzu durch eine Isolierung gegen die tiefen Temperaturen geschützt. Analog den bisherigen Versuchen erfolgte anschließend die Auswertung der erfassten Klimadaten hinsichtlich der maximalen Temperaturgradienten bei unterschiedlichen Feuchteklassen. Wie die Tabelle 13 zeigt, treten bei dem geschilderten Experiment an diversen Einbauorten Temperaturgradienten von deutlich über 1 K/min auf. Die höchste Belastung im Innenraum des Fahrzeugs konnte mit 3,21 K/min bei einer

Luftfeuchtigkeit zwischen 95-100 % im Dashboard vorne links vor dem Fahrercockpit detektiert werden.

Messstelle	Maximaler Temperaturgradient in K/min					
	70-75 %	75-80 %	80-85 %	85-90 %	90-95 %	95-100 %
1	0,95	1,1	1,25	1,47	1,6	1,47
2	0,82	0,86	0,91	1,25	1,87	0,33
3	0,73	0,71	0,76	0,78	0,75	0,26
4	3,73	2,93	3,69	3,18	2,88	2,96
5	2,69	2,22	2,7	2,85	2,6	3,21
-	-	-	-	-	-	-
7	1,36	0,19	0,19	1,13	2,1	2,2
8	0,31	0,43	0,52	0,58	0,68	0,7
9	3,12	3,29	1,14	3,79	4,12	1,37
10	1,0	0,63	0,95	0,94	1,29	1,67
11	1,92	1,47	0,19	2,17	2,33	0,3
-	-	-	-	-	-	-
13	0,52	0,68	0,75	0,01	-	-

Tabelle 13: Maximale Temperaturgradienten an verschiedenen Einbauorten elektronischer Systeme bei definierten Luftfeuchtigkeitsklassen im Rahmen der Umlagerungsversuche

Insgesamt wurden bei dieser Versuchsreihe die höchsten Belastungen hinsichtlich einer potenziell auftretenden Betauung im Fahrzeug nachgewiesen. Die visuelle Inspektion elektronischer Systeme bei diesem Versuchsszenario bestätigte dies. Kurz nach der Umlagerungsphase waren feine Kondensattropfen an den Bedienelementen, dem Kombiinstrument und dem Audioverstärker im Kofferraum zu beobachten. Funktionale Störungen wurden nicht verursacht. Weitere Untersuchungen, die im Rahmen der Arbeit betrachtet wurden, waren belastungsinduzierende Szenarien wie beispielsweise der Feuchteintrag in ein abgekühltes Fahrzeug durch mehrere Personen nach einer sportlichen Aktivität sowie zahlreiche Fahrversuche bei unterschiedlichen Außentemperaturen und variabler Anzahl an Fahrzeuginsassen. Hierbei konnten allerdings keine höheren Belastungen als die in der Tabelle 13 aufgeführten Temperaturgradienten identifiziert werden.

7.4 Anwendbarkeit bestehender Lebensdauermodelle

Da für Automobilelektroniken eine Lebensdauerermittlung unter realen Anforderungen weder finanziell noch zeitlich durchführbar ist, werden beschleunigte Prüfverfahren eingesetzt um die Lebensdauer technischer Produkte unter Einsatzbedingungen abzuschätzen. Mit Hilfe mathematischer Modelle lassen sich anhand der verschärften Testparameter und der am Einsatzort einer Komponente oder eines Systems vorherrschenden Belastungen die Testzeiten zur Lebensdauerabbildung über Beschleunigungsfaktoren ermitteln. Aus der Gleichung 60 kann so über einen belastungsspezifischen Beschleunigungsfaktor A_F und die geforderte Einsatzzeit T_{Einsatz} die benötigte Testzeit T_{Test} bestimmt werden.

$$T_{\text{Einsatz}} = A_F \cdot T_{\text{Test}} \quad (\text{Gl. 60})$$

In diesem Zusammenhang wird auf die Diffizilität der Testzeitermittlung mittels der belastungsspezifischen Modelle hingewiesen, da in den meisten Fällen weder eine eindeutige Nutzungshäufigkeit noch ein definiertes und ganzheitliches Einsatzbelastungsprofil vorliegt. Darüber hinaus können Toleranzen spezifischer Bauelemente oder Materialien eine exakte Lebensdauervorhersage erschweren. Dennoch werden in der Praxis unterschiedliche Lebensdauermodelle für verschiedene Belastungsparameter herangezogen, um die geforderte Lebensdauer mittels beschleunigter Prüfverfahren abzusichern. Beispielweise können für thermische und mechanische Fehler Beschleunigungsmodelle nach Arrhenius, Coffin-Manson oder Engelmaier aufgeführt werden. Zur Bestimmung der Prüfdauern für statische Temperatur-Feuchte-Belastungen existieren eine Reihe von Raffungsmodellen, von denen im Folgenden einige vorgestellt werden. Weitere Modelle sind in der angegebenen Literatur zu finden, sollen aber im Rahmen der Arbeit nicht weiter untersucht werden [25][36][63][67][94][128][167].

Die zentrale Fragestellung, die in diesem Abschnitt behandelt wird, ist die Anwendbarkeit diese Modelle, welche auf Bauteilebene ermittelt wurden, auf komplexe elektronische Systeme.

Modell nach Hallberg-Peck

Das von Hallberg und Peck entwickelte Modell wird heute noch häufig verwendet, und wird als Basis für weitere Modelle eingesetzt. Als Grundlage dienten experimentell erfasste Ausfalldaten von Halbleiterbauelementen mit einem Gehäuse aus Epoxidharz. Als relevanter Ausfallmechanismus wurde die Korrosion der internen Aluminiummetallisierungen betrachtet. Der ermittelte Beschleunigungsfaktor A_F wurde durch eine logarithmische Normalverteilung der Testergebnisse bestimmt, wobei als Testparameter eine Temperatur von 85 °C und eine Luftfeuchtigkeit von 85 % verwendet wurden. Mathematisch kann die

Beschleunigung zwischen Test- und Einsatzbedingungen mit Gleichung 61 beschrieben werden [48][75][78][87][131][163].

$$A_F = e^{\left(\left(\frac{-E_A}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right)} \cdot \left(\frac{rF_0}{rF}\right)^n \quad (\text{Gl. 61})$$

mit $n=3$, E_A =Aktivierungsenergie (0,9 eV), k =Boltzmann-Konstante ($8,6 \cdot 10^{-5}$ eV/K), T_0 =absolute Referenztemperatur, rF_0 =Referenzluftfeuchtigkeit, T =absolute Einsatztemperatur und rF =Einsatzluftfeuchtigkeit.

Modell nach Reich-Hakim

Das Modell von Reich-Hakim basiert auf Ausfalldaten von Halbleiterbauelementen in kunststoffgekapselten Gehäusen und wurde 1974 entwickelt. Parallel zu beschleunigten Prüfungen im Labor wurden reale Feldversuche nahe dem Panamakanal durchgeführt. Der Testort Galeta Point hat eine Jahresdurchschnittstemperatur von 26,66 °C bei einer relativen Feuchte von 85-100 %. Als Ausfallkriterium und Ausfallmechanismus wurde die Korrosion der Metallisierungen gewählt. Ein Vergleich der Feldversuche in Panama und den Labortests ergab einen Beschleunigungsfaktor entsprechend der Gleichung 62.

$$A_F = e^{\left(\frac{-E_A}{k}\right) \cdot \left[\left(\frac{1}{T_0 + rF_0}\right) - \left(\frac{1}{T + rF}\right)\right]} \quad (\text{Gl. 62})$$

mit einer Aktivierungsenergie $E_A=1,19$ eV.

Dieser Beschleunigungsfaktor basiert auf dem Lebensdauermodell nach Arrhenius und wurde um den Einflussfaktor der Luftfeuchtigkeit erweitert [49][75][137].

Modell nach Eyring

Das Eyring Modell stellt eine Ergänzung des Arrhenius-Modells dar, indem es neben den thermischen Effekten auch andere Stressfaktoren einbindet. Abhängig von der Aktivierungsenergie lassen sich damit unterschiedliche Fehlermechanismen modellieren. Für den Effekt der Luftfeuchtigkeit lässt sich der Beschleunigungsfaktor gemäß der Gleichung 63 bestimmen.

$$A_F = e^{\left(\frac{-E_A}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) - 296 \cdot \left(\frac{1}{rF_0} - \frac{1}{rF}\right)} \quad (\text{Gl. 63})$$

Die Aktivierungsenergie E_A wird für den Effekt der Korrosion mit 0,3 eV angegeben [13][16][75].

Modell nach Lawson

Das Modell nach Lawson nimmt einen linearen Zusammenhang mit der Temperatur und einen nichtlinearen Zusammenhang mit der Luftfeuchtigkeit an. Damit ergibt sich aus der Gleichung 64 der Beschleunigungsfaktor nach Lawson.

$$A_F = e^{\left(\frac{-E_A}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right) + [D \cdot (rF_0^2 - rF^2)]} \quad (\text{Gl. 64})$$

mit einer Aktivierungsenergie $E_A=0,4$ eV. Für den Effekt der metallischen Korrosion nimmt die Konstante D den Wert $5,57 \cdot 10^{-4}$ an [75][76][86].

Um die aufgeführten Modelle hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit bei zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen zu bewerten, wurde ein komplexes Automotive-System einem angepassten Prüfprofil mit einheitlicher Belastungsart aber unterschiedlichen Schärfegraden ausgesetzt, und das Ausfallverhalten untersucht. Wie auch auf Testleiterplattenebene verursacht der Fehlermechanismus der ECM bei funktionsfähigen Baugruppen Störungen aufgrund unspezifizierter Leckströme an unterschiedlichen Stellen. Diese Störungen gehen primär einher mit einem erhöhten Ruhestrombedarf der Geräte, welche entweder durch die Aktivierung von Halbleiterbausteinen oder durch Ströme zwischen Versorgungsanschlüssen verursacht werden. Unabhängig von dem Fehlerbild resultiert dieses von einem identischen Fehlermechanismus. Daher wurde bei den Versuchen der elektrische Stromfluss bei drei Prüfbjekten je Versuchsdurchlauf kontinuierlich während der Prüfungen überwacht und die erste aufgetretene Stromerhöhung als Ausfall gewertet. Funktionale Störungen welche nicht über die Stromaufnahme des Systems detektiert werden, bleiben bei den Versuchen unberücksichtigt. Da die Stromaufnahme des Systems, abhängig vom ausgelösten Fehlerbild, über 100 mA reichen kann, musste der Vorwiderstand, an dem die Stromaufnahme überwacht wurde, so gewählt werden, dass bei maximalem Stromfluss ein Absinken der Betriebsspannung des Systems unter die untere Betriebsspannungsgrenze von 9 V verhindert wird. Als Prüfprofil wurde eine zyklische Temperatur-Feuchte-Prüfung über einen Temperaturbereich von 10 °C bis 70 °C bei einer konstanten Luftfeuchtigkeit von 93 % gewählt. Als variabler Faktor bei den Prüfungen wurde der Temperaturanstiegsgradient bei jedem Versuch verändert. Im Rahmen der Experimente erfolgten die Tests mit Gradienten von 1 K/min, 3 K/min und 5 K/min. Bild 81 zeigt die Ober- und Unterseite der Prüfbjekte und deren elektrische Überwachung sowie das für die Prüfungen verwendete Prüfprofil mit den unterschiedlichen Schärfegraden.

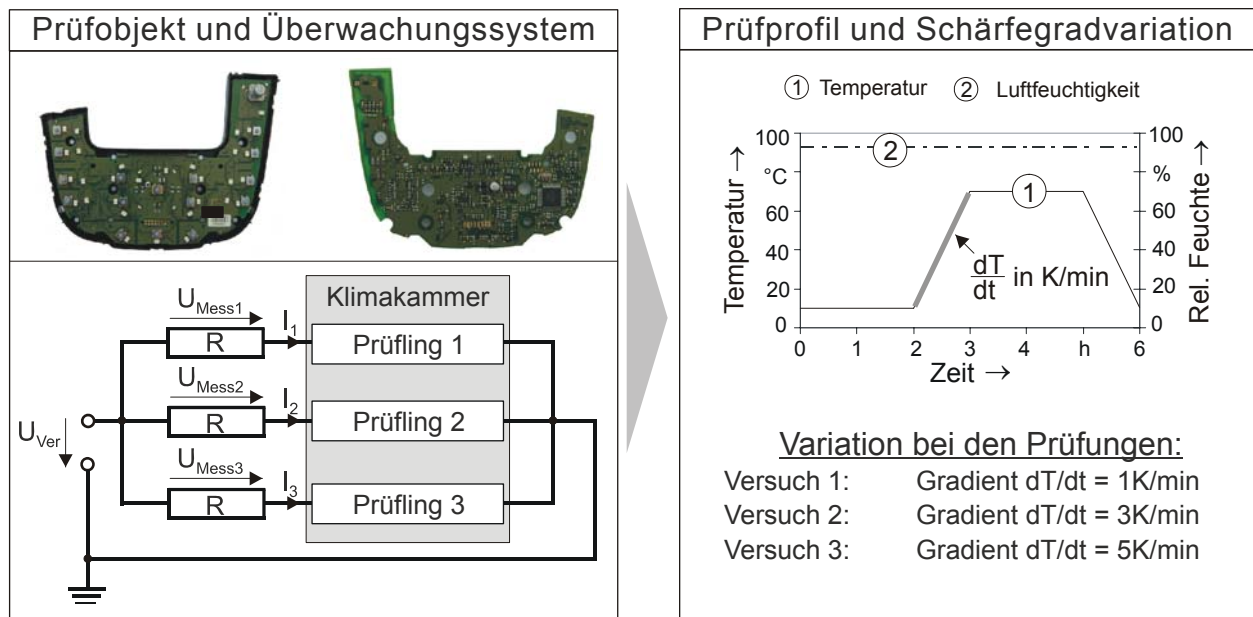


Bild 81: Prüfobjekte und deren Überwachung sowie das applizierte Prüfprofil mit unterschiedlichen Schärfegraden

Im Anschluss an die Versuche fand die statistische Bewertung der Lebensdauer der Prüflinge bei den unterschiedlichen Belastungsparametern statt. Die Ausfallzeitpunkte der einzelnen Prüfobjekte wurden zur Berechnung der zweiparametrischen Weibullverteilung herangezogen. Obwohl kein paralleler Verlauf der Weibullkurven bei der Auswertung zu beobachten war, zeigt sowohl die Berechnung der charakteristischen Lebensdauer als auch der Mittelwert der einzelnen Systemausfallzeiten, dass mit steigendem Temperaturanstiegsgradienten die Lebensdauer der Systeme abnimmt. Ein paralleler Verlauf der Regressionsgeraden im Weibullnetz hätte aufgrund der verschiedenen Fehlerbilder, welche bei dem Prüfling möglich sind, nicht erwartet werden können. Trägt man die Lebensdauern über die Belastungen auf, so ergibt sich ein exponentiell abnehmender Verlauf, der eine Vorhersage weiterer Lebensdauern unter anderen Belastungsparametern erlaubt. In Bild 82 wird der Stromverlauf eines Moduls im ersten Versuch mit zwei aufgetretenen Fehlerbildern und dem festgelegten Ausfall des Systems sowie die charakteristische Lebensdauer der Prüflinge bei den unterschiedlichen Schärfegraden dargestellt. In dem im rechten Bild dargestellten grauen Bereich ist die Lebensdauer mit starken Unsicherheiten behaftet, da hier ab einem bestimmten Temperaturgradienten keine Kondensation mehr auf der Oberfläche stattfindet, und daher der Fehlermechanismus der ECM stark verlangsamt wird. Mit abnehmendem Temperaturgradienten ist daher mit einer deutlich wachsenden Lebensdauer zu rechnen.

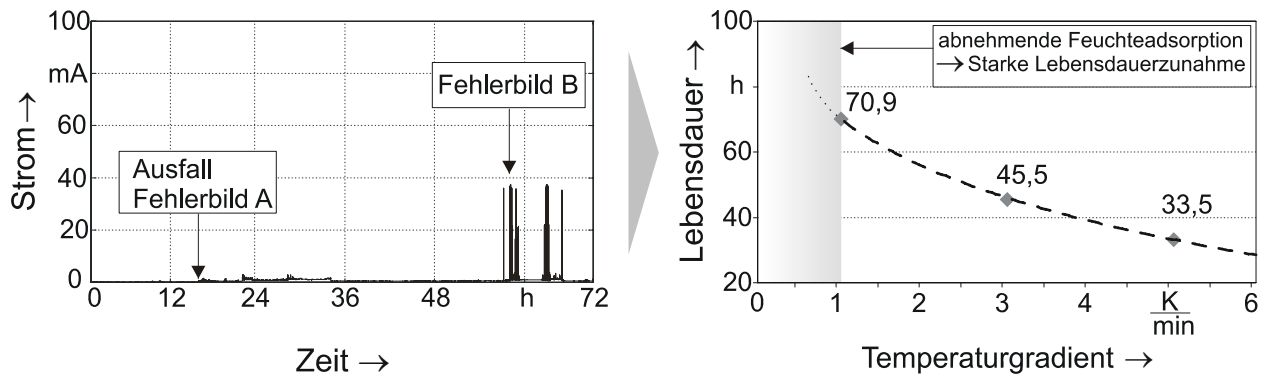


Bild 82: Exemplarischer Ausfall eines Moduls bei Versuch 1 und Darstellung der Lebensdauern über die gewählten Belastungen

Wendet man die vorgestellten mathematischen Modelle für die Berechnung der Lebensdauer des geprüften Systems unter realen Einsatzbedingungen an, so ist zu beachten, dass diese Modelle für konstante Temperatur-Feuchte-Belastungen ermittelt wurden. Um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen, müssen die Testbedingungen in statische Prüfbedingungen transformiert werden. Aus der Fehlerrelevanz in den Temperaturanstiegsphasen und dem oberen Testtemperaturbereich, werden aus diesen beiden gemittelten Temperaturstufen und deren Zeitdauern die mittleren Testtemperaturen von 55 °C, 62,5 °C und 65 °C angenommen. Berechnet man unter Berücksichtigung der Standardbedingungen aus den Klimazonen Kaltland und Feucht-/Warmland die Beschleunigungsfaktoren mit Hilfe der vorgestellten Lebensdauermodelle, so ergeben sich, abgesehen vom Lawson-Modell, implausible Ergebnisse. Diese prognostizieren einen Beschleunigungsfaktor der gegen unendlich divergiert. Die Tabelle 14 gibt eine Übersicht über die ermittelten Parameter.

Einsatzort	Kaltland			Feucht-/Warmland		
Einsatztemperatur	6 °C			27 °C		
Testtemperatur	55 °C	62,5 °C	65 °C	55 °C	62,5 °C	65 °C
Luftfeuchtigkeit Einsatzort	75 %	75 %	75 %	81 %	81 %	81 %
Luftfeuchtigkeit Test	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %	93 %
Lebensdauer Test	70,1 h	45,5 h	33,5 h	70,1 h	45,5 h	33,5 h
A_f nach Hallberg-Peck	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$6,5 \cdot e^{85}$	$5,4 \cdot e^{95}$	$3,4 \cdot e^{98}$
A_f nach Reich-Hakim	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$\rightarrow \infty$	$8,9 \cdot e^{168}$	$1,2 \cdot e^{182}$	$5,8 \cdot e^{185}$
A_f nach Eyring	$1,9 \cdot e^{225}$	$3,9 \cdot e^{228}$	$3,3 \cdot e^{229}$	$5,9 \cdot e^{28}$	$1,2 \cdot e^{32}$	$1,0 \cdot e^{33}$
A_f nach Lawson	65	89,3	98,9	12	16,5	18,3

Tabelle 14: Vergleich der Beschleunigungsfaktoren für die Einsatzbedingungen Kaltland und Feucht-/Warmland

Vergleicht man die Verhältnisse der berechneten Beschleunigungsfaktoren nach Lawson mit denen der unterschiedlichen Lebensdauern in den Testreihen, so ergeben sich Abweichungen von etwa 10 %. Damit stimmt in gewisser Näherung das Verhältnis zwischen den Raffungsfaktoren bei den umgerechneten Testbedingungen. Der Absolutwert der Beschleunigung zwischen realen Einsatzbedingungen und Testbedingungen kann weder aus experimenteller Sicht noch durch Feldbeobachtungen der getesteten Geräte bestätigt werden.

Mit Hilfe der vorgestellten Versuchsmethodik konnte gezeigt werden, dass die Berechnung der Beschleunigungsfaktoren mit Hilfe bestehender Modelle keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefert und mit starken Unsicherheiten behaftet ist. Betrachtet man aktuelle elektronische Baugruppen, so sind an deren Herstellung eine Reihe von Prozessen, Materialien und Designfaktoren beteiligt, welche neben dem Einbauort einen Einfluss auf die Robustheit des Systems haben können. Wesentliche Einflussfaktoren sind in Bild 83 dargestellt.

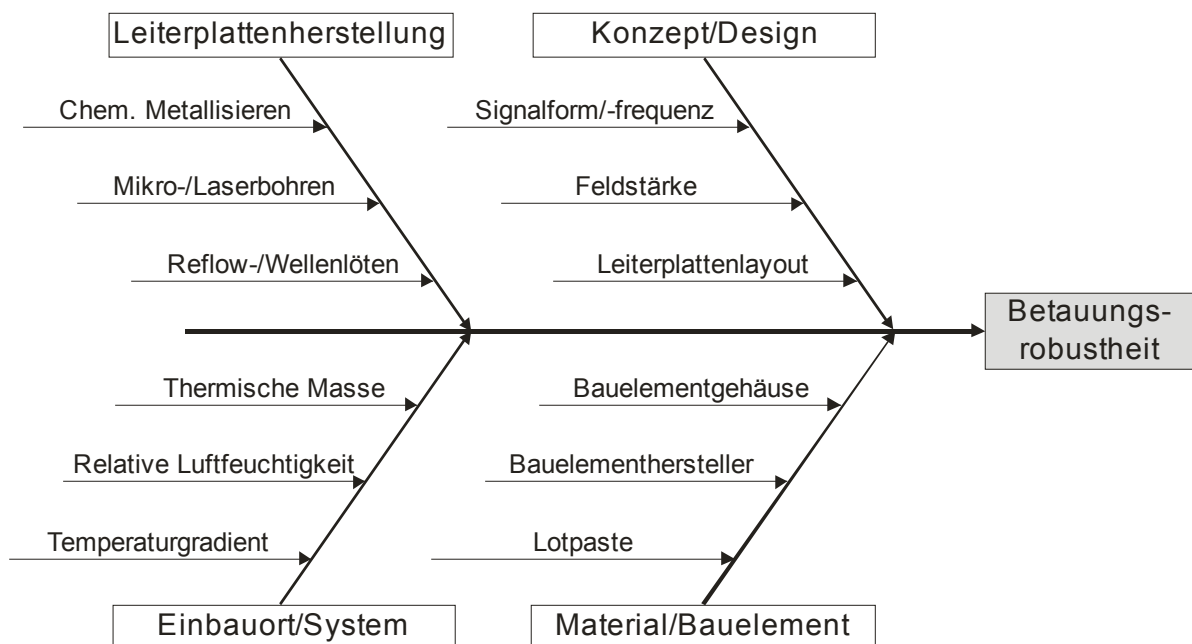


Bild 83: Exemplarische Einflussfaktoren auf die Betauungsrobustheit elektronischer Baugruppen

Die generelle Anwendbarkeit spezifischer Lebensdauermodelle, welche an einem bestimmten Bauelement und unter definierten Prozessparametern empirisch ermittelt wurden, ist daher kritisch zu bewerten. Zwar können die in der Vergangenheit entwickelten Raffungsmodelle an einzelnen Bauteilen oder an spezifischen Komponenten plausible Resultate liefern, doch empfiehlt es sich bei komplexen elektronischen Systemen die Lebensdauer mittels unterschiedlicher Belastungsparameter individuell zu bestimmen. Bei Kenntnis der realen Einsatzbedingungen kann damit durch grafische Extrapolation bei bekannten

Belastungen und den daraus resultierenden Ausfallzeiten die produktspezifische Lebensdauer eines Systems geschätzt werden. Für eine ganzheitliche Zuverlässigkeitsbetrachtung ist dieses Vorgehen allerdings für alle auf das Produkt einwirkenden Belastungen, und im Idealfall deren kombiniertes Zusammenwirken, durchzuführen.

7.5 Optimierung bestehender Prüfverfahren

Die Qualifikation elektronischer Komponenten und Systeme für automobiler Anwendungen gegen die Einwirkung hoher Luftfeuchtigkeit und Betauung basiert primär auf dem Einsatz eines standardisierten Prüfverfahrens gemäß der Norm DIN EN 60068-2-30. Hinsichtlich der Belastungsschärfe, der Belastungsdauer und der Belastungsart findet keine Unterscheidung zwischen unterschiedlichen Einbauorten der Systeme im Fahrzeug statt. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 5 sowie den durchgeführten Fahrzeugmessungen kann das bisherige Prüfverfahren weiter optimiert werden.

Eine ganzheitliche Betrachtung der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Experimente hat gezeigt, dass die elektrischen Auffälligkeiten nahezu ausschließlich in den positiven Temperaturgradienten aufgetreten sind. Ausfälle durch ECM werden während der konstanten Haltephasen gar nicht oder nur extrem verlangsamt induziert. Daher sind lange Haltedauern, die über das thermische Angleichen der Baugruppe an die obere und untere Prüftemperatur hinausgehen, weder zielführend noch zeit- und damit kosteneffizient. In der Regel kann eine Haltedauer von etwa zwei bis drei Stunden als ausreichend betrachtet werden. Einen weiteren wesentlichen Aspekt bei den zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfungen stellt der Gradient zwischen der oberen und der unteren Prüftemperatur dar. Dieser ist, abhängig von der thermischen Masse der Prüflinge, für eine potenzielle Betauung auf den Baugruppen verantwortlich und bestimmt daher den Schärfegrad der Prüfung maßgeblich. Entsprechend dem in Kapitel 4.1 vorgestellten Konzept zur Ermittlung system- und belastungsspezifischer Prüfstrategien und den in Kapitel 7.3 akquirierten mikroklimatischen Anforderungen lassen sich für die betrachteten Einbauorte die Temperaturgradienten für zukünftige Prüfungen adaptieren. Das standardisierte Prüfverfahren sowie ein einbauortspezifisches Klimaprofil, welches im Temperaturgradienten an die maximal auftretenden Belastungen am jeweiligen Einbauort eines Systems anzupassen ist, wird schematisch in Bild 84 gezeigt. Durch ein an den Fehlermechanismus und das reale Belastungsprofil angepasstes Prüfprofil kann, abhängig vom Temperaturanstiegsgradienten, eine Testzeitreduzierung von etwa 50 % erreicht werden.

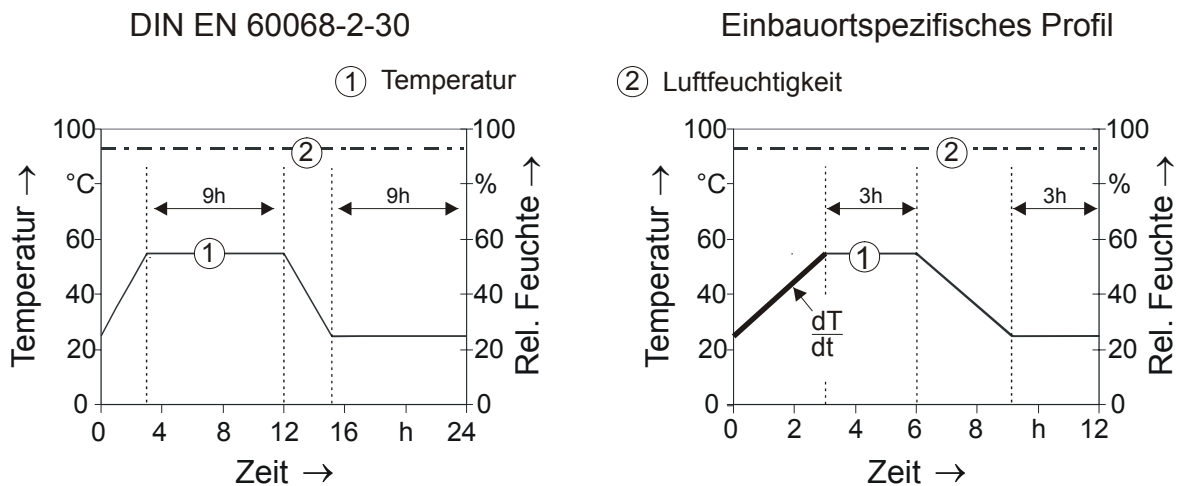


Bild 84: An den Einbauort und den Fehlermechanismus angepasstes Klimaprofil zur Zuverlässigkeitsabsicherung elektronischer Systeme im Automobil

Ausgehend von einem in der standardisierten Prüfung verwendeten Temperaturgradienten von 0,16 K/min ergibt sich bei der einbauortspezifischen Prüfung die Zeitdauer je Zyklus T_{Zyklus} aus dem Temperaturgradienten $\Delta T/\Delta t$ und dem vorgegebenen Temperaturdelta von 30 K entsprechend der Gleichung 65. Die Zeitdauer für den negativen Temperaturgradienten ist mit etwa 0,1-0,16 K/min stets konstant zu halten.

$$T_{\text{Zyklus}} = \begin{cases} 12\text{h} + \frac{30\text{K}}{\Delta T/\Delta t} & , \text{für } \Delta T/\Delta t < 0,16\text{K/min} \\ 12\text{h} & , \text{für } \Delta T/\Delta t = 0,16\text{K/min} \\ 12\text{h} - \frac{30\text{K}}{\Delta T/\Delta t} & , \text{für } \Delta T/\Delta t > 0,16\text{K/min} \end{cases} \quad (\text{Gl. 65})$$

Analysiert man die real im Fahrzeug aufgetretenen Klimabelastungen, so kann festgestellt werden, dass die maximalen Temperaturgradienten bei hoher Luftfeuchtigkeit primär bei Temperaturen unter 10 °C auftreten. Um den Einfluss der Prüftemperatur auf das Ausfallverhalten durch ECM zu untersuchen, wurde das Prüfkonzept aus Kapitel 5.1 an verzinnten Kammstrukturen auf FR4-Leiterplatten ohne Lötstopplack bei unterschiedlichen Temperaturen wiederholt. Hierzu erfolgte ein definierter Tropfenauftrag zwischen die mit 10 VDC potenzialgetrennten Leiterbahnen, während über eine temperaturgeregelte Heizplatte die Leiterplattentemperatur variiert wurde. Der Strom zwischen den Kammstrukturen wurde kontinuierlich überwacht und die Zeit bis zum elektrischen Kurzschluss durch ECM ab dem Zeitpunkt des Tropfenauftrags dokumentiert. Für jede der Temperaturen von 23 °C, 30 °C, 40 °C und 50 °C wurden zehn

Wiederholungen durchgeführt, um eine statistische Weibullanalyse mit ausreichendem Stichprobenumfang zu gewährleisten. Wertet man die unterschiedlichen Ausfallzeitpunkte hinsichtlich der charakteristischen Lebensdauern bei den verschiedenen Temperaturen aus, so ist eine eindeutige thermische Beschleunigung des Ausfallmechanismus zu erkennen. Trägt man den natürlichen Logarithmus der Lebensdauern über die reziproke Testtemperatur auf, so zeigt sich ein mit der reziproken Temperatur linear steigender Verlauf. Dies deutet auf einen identischen Fehlermechanismus und einen temperaturbeschleunigten Effekt hin. Bild 85 zeigt schematisch den Messaufbau und verdeutlicht die mit der Temperatur abnehmende Lebensdauer.

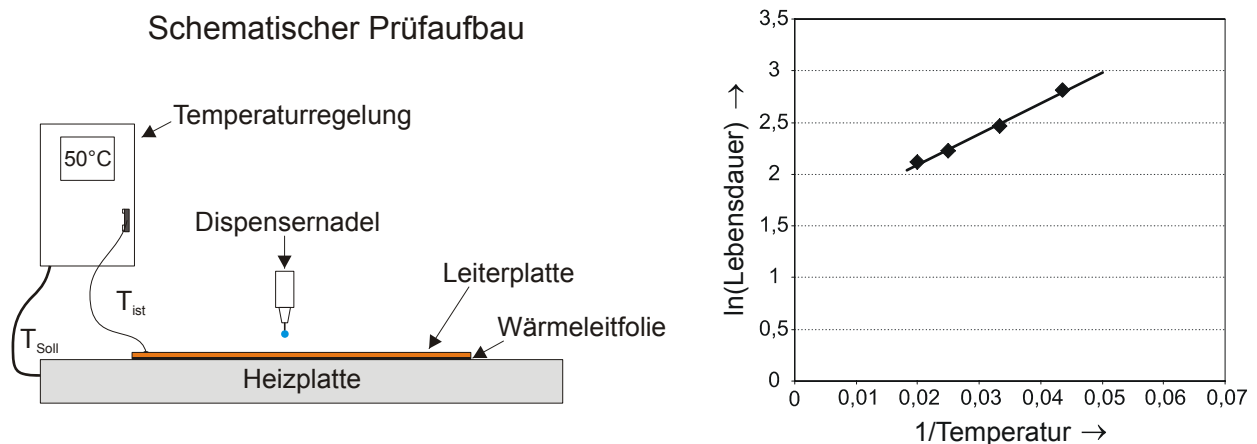


Bild 85: Prüfaufbau und Darstellung der logarithmischen Lebensdauer über die reziproke Testtemperatur

Vergleicht man die charakteristische Lebensdauer bei 23 °C mit der bei 50 °C, so stellt man eine Lebensdauerreduzierung im Test von beinahe 50 % fest. Vergleicht man die Aktivierungsenergien bei den unterschiedlichen Testtemperaturen ($T_{1,2}$) nach dem Arrheniusmodell entsprechend der Gleichung 66, so nimmt mit steigender Testtemperatur die Aktivierungsenergie ab.

$$A_F = e^{\left(\frac{-E_A}{k}\right) \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}, \text{ für } T_2 > T_1 \quad (\text{Gl. 66})$$

Für den Effekt der ECM ergibt sich durch einen geringeren Beschleunigungsfaktor bei höheren Temperaturen ein logarithmisch abnehmender Verlauf der Lebensdauer mit steigender Testtemperatur. Diese zusätzliche thermische Beschleunigung ist bei der Prüfprofilauslegung oder der Ergebnisbewertung zu berücksichtigen.

8 Einsatz der Simulation für die Robustheitsbewertung in den frühen Entwicklungsphasen

Eine zunehmende Globalisierung der Einkaufs-, Herstellungs- und Absatzmärkte sowie der daraus resultierende Wettbewerb, führen zu einer deutlichen Verkürzung der Produktlebenszyklen. Im Maschinenbau beispielsweise verringert sich seit 1991 die durchschnittliche Produktlebensdauer von dreißig auf zwölf Monate. Diese Herausforderungen und die Anforderungen an die Produktherstellung lassen sich durch verkürzte Entwicklungszeiten sowie eine Reduzierung des Qualitätsaufwands erfüllen [2]. In diesem Zusammenhang hat das Innovationspotenzial durch die virtuelle Produktentwicklung, also der Einsatz von Verfahren zur Beschreibung und Dimensionierung von Produkten, an Bedeutung gewonnen. Die methodischen Ansätze für die Berechnung und Simulation in der Produktentwicklung lassen sich in analytische Berechnungsverfahren, mathematische Programmsysteme, numerische Methoden, Mehrkörpersysteme, Optimierungsverfahren und elektrotechnische Simulation untergliedern [37]. Da bereits einige der genannten Simulationsmethoden bei der Entwicklung komplexer elektronischer und mechatronischer Systeme im Automobil angewendet werden, stellt sich die Frage nach den Einsatzmöglichkeiten dieser Verfahren zur Robustheitsbewertung elektronischer Baugruppen unter Betaungseinfluss. Bisher werden primär Aspekte wie thermische Leistungsfähigkeit elektronischer Baugruppen sowie die Dimensionierung und Gestaltung der Gehäuse simulativ unterstützt, wobei die generierten Modelle mit gewissen Ergänzungen möglicherweise weitere wichtige Aussagen liefern könnten.

Daher wird in diesem Kapitel der Einsatz der Simulation zur Robustheitsbewertung elektronischer Baugruppen für Einsatzbedingungen mit auftretender Betaung untersucht. Hierbei wird einerseits der innovative Ansatz einer Betaungssimulation, wie diese in der Software STAR CCM+ von der Firma CD-adapco entwickelt wurde, und andererseits der Nutzen einer thermischen Simulation analysiert und mit Hilfe praktischer Versuche verifiziert. Auf der Basis eines zweidimensionalen Leiterplattenlayouts wurde ein dreidimensionales Modell der Baugruppe inklusive der darauf vorgesehenen Bauelemente erstellt. Anschließend wurde dieses Modell hinsichtlich der Gitternetzstruktur aufbereitet, um damit die Betaungs- und Temperatursimulation durchzuführen. Sowohl die Modellaufbereitung und die Gittergenerierung aus dem zur Verfügung gestellten dreidimensionalen Baugruppenmodell als auch die Durchführung der Simulation erfolgte bei der Firma CD-adapco in Nürnberg. Die Simulationsparameter wie Luftfeuchtigkeit, Temperaturgradient, Strömungsgeschwindigkeit und Materialkennwerte waren an die Experimente und die entsprechenden Prüflinge angepasst. Um die Ergebnisse aus der Simulation zu verifizieren, wurden sowohl

thermographische Analysen als auch eine beschleunigte Klimaprüfung mit elektrischer Überwachung der realen Testbaugruppe durchgeführt. Ziel der Untersuchung war es, Stellen, an denen eine Kondensation während der Klimakammerprüfung auftritt, mit Hilfe der Betaungs- und Temperatursimulation zu identifizieren. Mittels der realen Versuche sollte eruiert werden, ob die Stellen maximaler Temperaturdifferenz beziehungsweise maximaler Betaung auch zu den frühesten Ausfällen im Test führen oder ob technologische Parameter wie Bauelementtyp, Abstand der Anschlussstrukturen oder Materialien primär für Ausfälle von elektronischen Baugruppen durch Migration verantwortlich sind. Bild 86 zeigt einerseits das konzipierte Vorgehen bei der Robustheitsbewertung auf der rechnergestützten Modellebene und andererseits die Schritte zu deren Verifikation auf der Baugruppen- und Testebene.

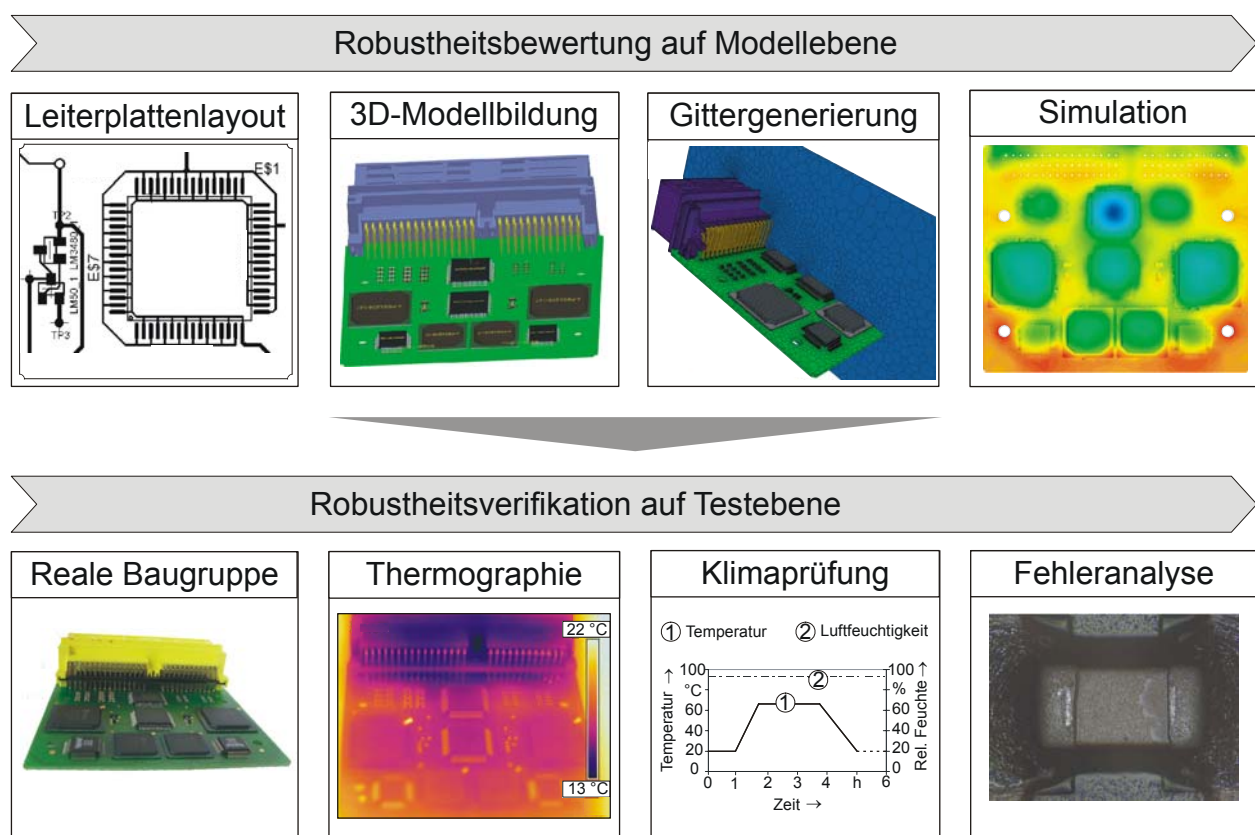


Bild 86: Konzept einer rechnergestützten Robustheitsbewertung für den Effekt der Betaung und deren Verifikation

8.1 Leiterplattenlayout und dreidimensionales Platinenmodell

Bei der Gestaltung und Auslegung des Leiterplattenlayouts wurde das Konzept der vorangegangenen Prüflinge durchgängig fortgeführt. Unter Verwendung sogenannter Daisy-Chain-Bauelemente in Verbindung mit entsprechend darauf angepasster Leiterbahn- und Layoutgestaltung, können potentialgetrennte Anschlüsse an den verschiedenen Bauelementen realisiert werden. Um eine realitätsnahe Baugruppe abzubilden, wurde, analog der Baugruppe zur Bewertung unterschiedlicher Schutzlackarten, ein umfangreiches Bauteilspektrum unter Verwendung einer Lötstopmmaske und einer Nickel-Gold-Oberflächenpassivierung eingesetzt. Entsprechend den aktuellen Trends der Elektronikproduktion erfolgte der Aufbau der Leiterplatten in bleifreier Aufbau- und Verbindungstechnik. Als Lotmedium kam eine Zinn-Silber-Kupfer Lotpaste zum Einsatz. Eine nahezu symmetrische Positionierung identischer Bauelementvarianten zur Mittelachse der 1,6 mm dicken FR4-Leiterplatte ermöglichte sowohl eine Redundanz der einzelnen Bauelemente und andererseits eine thermodynamische Konformität der vertikalen Platinenhälfte. Einzig die verwendeten Keramik Kondensatoren der Bauform 0402, 0603 und 0805 wurden in Anbetracht der geringen thermischen Masse nicht symmetrisch angeordnet. Damit einerseits eine betauungsrelevante thermische Masse des Prüflings erreicht und andererseits ein umfangreiches Bauteilspektrum betrachtet werden konnte, wurden auf der Leiterplatte mit den Abmessungen 80 mm x 93 mm die Ober- und Unterseite der Leiterplatte bestückt. Die geometrischen Abmaße der Leiterplatte ergaben sich aus der Verfügbarkeit dimensionsadaptierter Automotive-Steckverbinder und entsprechender Schutzgehäuse. Da auf der Unterseite großflächig Kammstrukturen mit Leiterbahnabständen von 200 μm , 300 μm und 400 μm mit etwa 15 mm Überlappungslänge und 20 Leiterzügen je Elektrode befanden, wurde ein Großteil der Bauelemente auf der Oberseite platziert. Neben den unterschiedlichen Bauteilen und Bauteilgehäusevarianten wurden zwei Temperatursensoren auf der Leiterplatte vorgesehen, um das thermische Verhalten der Platine während der Klimaprüfung zu überwachen. Für eine bessere Veranschaulichung des konzipierten Leiterplattenlayouts zeigt Bild 87 die real aufgebaute und bestückte Leiterplatte sowie das verwendete Bauelementespektrum. Zudem wird in der Darstellung am Beispiel eines QFP- und eines BGA-Bauelementes die Layoutgestaltung für potentialunterschiedliche Anschlussstrukturen schematisch gezeigt.

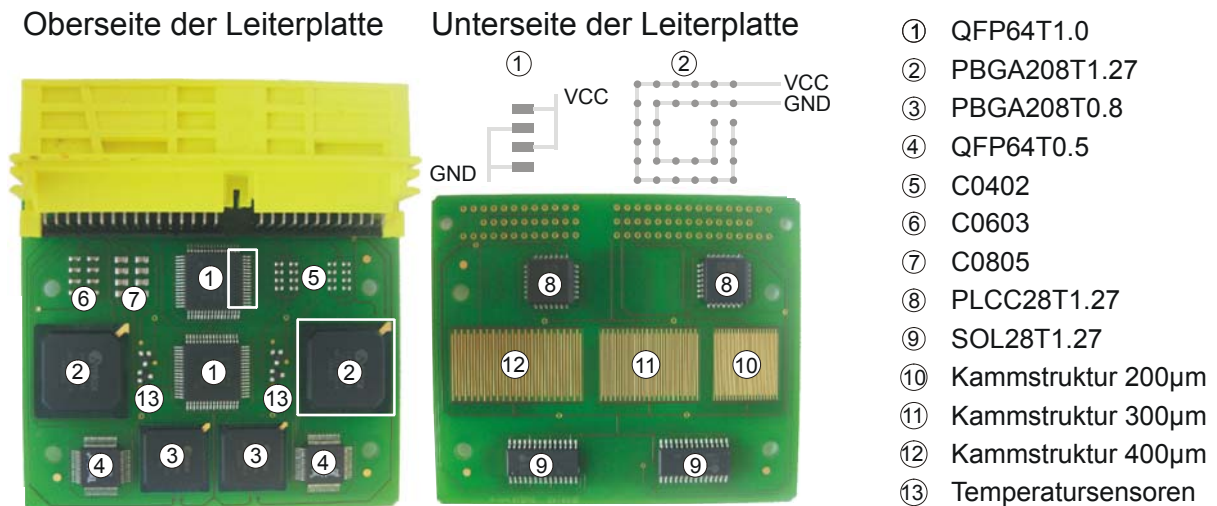


Bild 87: Testleiterplatte zur Verifikation der rechnergestützten Zuverlässigkeitsbetrachtung

Ausgehend von dem Leiterplattenlayout und den für die spätere Baugruppe vorgesehenen Bauelementen wurde mit Hilfe des Computer Aided Design Programms Pro/Engineer ein dreidimensionales Modell der konzipierten Leiterplatte erstellt. Durch eine detaillierte Rekonstruktion der einzelnen Bauteile mit Hilfe der dimensional-mechanischen Abmessungen und deren maßhaltige Kombination entsprechend dem zweidimensionalen Layoutvorgaben wurde das Gesamtmodell generiert. Zudem wurden bei dem Modellaufbau die Anschlussflächen und die Lötverbindungen an den einzelnen Bauteilanschlüssen berücksichtigt. Bild 88 zeigt die beschriebene Modellerstellung.



Bild 88: Modellgenerierung aus Einzelkomponenten sowie Aufbau- und Verbindungstechnik

8.2 Aufbereitung des 3D-Modells für die Strömungssimulation

Die grundlegende Voraussetzung, um eine Strömungssimulation mittels finiter Verfahren (Computer Fluid Dynamics, CFD) durchzuführen, ist die Erzeugung einer Gitterstruktur (Mesh) auf Basis des dreidimensionalen Modells. Hierbei sind die Bereiche, an denen in der Simulation eine hohe Genauigkeit erzielt werden soll, mit einem feineren Oberflächengitter zu versehen. Um ein thermodynamisches Verhalten zwischen der Baugruppenumgebung und der Baugruppe selbst zu simulieren, muss sowohl der periphere Raum als auch der Festkörper als Gitterstruktur vorliegen. Hierbei ist eine Konformität an den Grenzflächen essenziell. Die Gitterstruktur für den gasförmigen Betrachtungsbereich und den Festkörper sowie das entsprechende kombinierte Gittermodell sind in Bild 89 dargestellt.

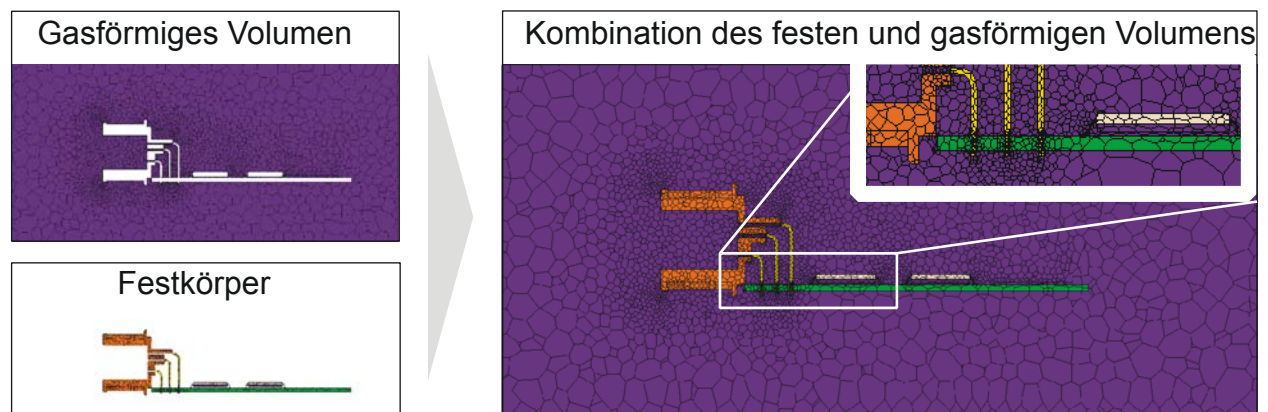


Bild 89: Erzeugung einer Gitterstruktur für den gasförmigen und festen Bereich als Basis für die Strömungssimulation

Neben der Modellaufbereitung hinsichtlich der benötigten Gitterstruktur wurden nach der Gleichung 67 die Wärmeleitfähigkeiten λ_i einzelner Strukturbestandteile (Pad, Lot, Anschlussbeinchen) der Dicke d_i zu einer äquivalenten Wärmeleitfähigkeit λ_{eff} für die Gesamtschichtdicke D der Anschlussstelle ermittelt und daraus die thermischen Wärmedurchlasswiderstände R der homogenen Volumenschichten gemäß der Gleichung 68 angepasst [15].

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{D}{\sum \frac{d_i}{\lambda_i}} \quad (\text{Gl. 67})$$

$$R = \frac{D}{\lambda_{\text{eff}}} \quad (\text{Gl. 68})$$

Dieses Vorgehen begünstigt einerseits die Gittergenerierung an den Bauteilanschlüssen und optimiert andererseits den zeitlichen Simulationsaufwand.

Entsprechend dem im Anschluss an die theoretische Betrachtung geplanten Versuch, wurde als zu simulierendes Szenario ein Temperaturgradient von 20 °C auf 65 °C innerhalb von 45 min bei einer Luftfeuchtigkeit von 93 % festgelegt. Hierbei wurde sowohl die kondensierte Wassermenge als auch das thermische Verhalten der Baugruppe bei der Auswertung betrachtet. Aufgrund des im Rahmen der Simulation gewählten instationären Ansatzes wird eine dreidimensionale, turbulente und inkompressible Strömung angenommen. Abgesehen von einer Wärmestrahlung werden als Wärmeübergangsarten sowohl Konvektion als auch Wärmeleitung berücksichtigt. Gemäß den Herstellerangaben des für die Versuche verwendeten Klimaschranks wird eine einheitliche Strömungsgeschwindigkeit von 3,5 m/s am Eingang des gasförmigen Volumens angenommen. Diese Strömungsgeschwindigkeit im Innenraum der Kammer kann als homogen angesehen werden. Damit wird das Strömungsverhalten im gasförmigen Bereich primär durch diesen Massenfluss am Eingang des Berechnungsvolumens bestimmt.

Der in der Software implementierte Berechnungsalgorithmus für das Be- und Enttaunungsmodell basiert auf der Lösung skalarer Transportgleichungen, welche den Massenanteil des Wasserdampfes repräsentieren. Ein Quelle-Senke-Ausdruck wird sowohl für die Wasserkondensation und Wasserverdampfung der Nebelschicht als auch für den dabei benötigten latenten Wärmebedarf bei einem Aggregatswechsel betrachtet. Für den Fall einer Divergenz des Wasserdampfanteils zwischen Nebelschicht und der benachbarten Zelle wird die Verdampfungs- und Betauungsrate abhängig von den stationären Bedingungen berechnet. Die hierbei vorliegenden Annahmen sind, dass der Wasserdampfanteil in der Luft die thermischen Eigenschaften des Wasser-Luft-Gemisches nicht ändert und dass die Wasserdampfmasse im Vergleich zur gesamten Masse einer betrachteten Zelle vernachlässigbar ist. Weiterhin ist die Rate des Massenstroms \dot{m} je Flächeneinheit unter Verwendung der Dampfdichte ρ_D , der empirischen Konstante C_{emp} (0,05-0,9), des Diffusionskoeffizienten des Wasserdampfes in Luft D_V , der charakteristischen Länge L sowie der Reynolds- (Re) und Schmidt-Zahl (Sc) definiert durch die Gleichung 69 [15].

$$\dot{m} = \rho_D \cdot C_{emp} \cdot \frac{D_V}{L} \cdot 0,045 \cdot Re^{0,8} \cdot Sc^{0,43} \cdot C_G \cdot \ln\left(\frac{C_G \cdot (1 - C_S)}{C_S \cdot (1 - C_G)}\right), \quad (Gl. 69)$$

Die Parameter C_G und C_S können mit Hilfe des Wasserdampfpartialdruckes p_W und dem Sättigungsdampfdruck p_S gemäß den Gleichungen 70 und 71 berechnet werden.

$$C_G = (0,622 + 0,378 \cdot p_W) \quad (Gl. 70)$$

$$C_S = (0,622 + 0,378 \cdot p_S) \quad (Gl. 71)$$

Für die Betaungssimulation ergibt sich die Menge des kondensierten beziehungsweise vaporisierten Dampfes in einem Zeitschritt aus

$$dm = \dot{m} \cdot dt. \quad (\text{Gl. 72})$$

Die flüssige Filmdicke S auf der Oberfläche kann mit Hilfe der kondensierten Dampfmenge dm und der Dichte des flüssigen Films ρ_F aus der Gleichung 73 berechnet werden.

$$S = S_{t-1} + \frac{dm}{\rho_F} \quad (\text{Gl. 73})$$

8.3 Ergebnisse der Betaungs- und Temperatursimulation

In einem ersten Schritt wurde die kondensierte Wasserfilmdicke auf der Baugruppe bei einem Temperaturanstieg von 20 °C auf 65 °C in 45 min bei einer Luftfeuchtigkeit von 93 % berechnet. Dabei hat sich gezeigt, dass bei den spezifizierten Parametern kein Wasser auf der Leiterplattenoberfläche kondensiert. Begründet werden kann dieses Ergebnis mit der geringen Temperaturdifferenz zwischen der gasförmigen Phase des Berechnungsvolumens und des Festkörpers. Über das gesamte Simulationsspektrum betrug der Unterschied zwischen minimalen und maximalen Temperaturen höchstens 0,8 K. Einzig der großvolumige Kunststoffsteckverbinder wies in der Simulation ein Temperaturdelta von etwa 1,25 K auf. Bei gegebenen Materialkenngrößen und den verwendeten Simulationsparametern erfolgte daher keine Kondensation auf der elektronischen Baugruppe. Bild 90 zeigt zu Beginn des simulierten Temperaturanstiegs die Temperaturen der Leiterplatte, des Steckverbinders und des Leadframes der SOL-Bauelemente auf der Baugruppe sowie die resultierende kondensierte Filmdicke nach 100 Sekunden ab Simulationsbeginn.

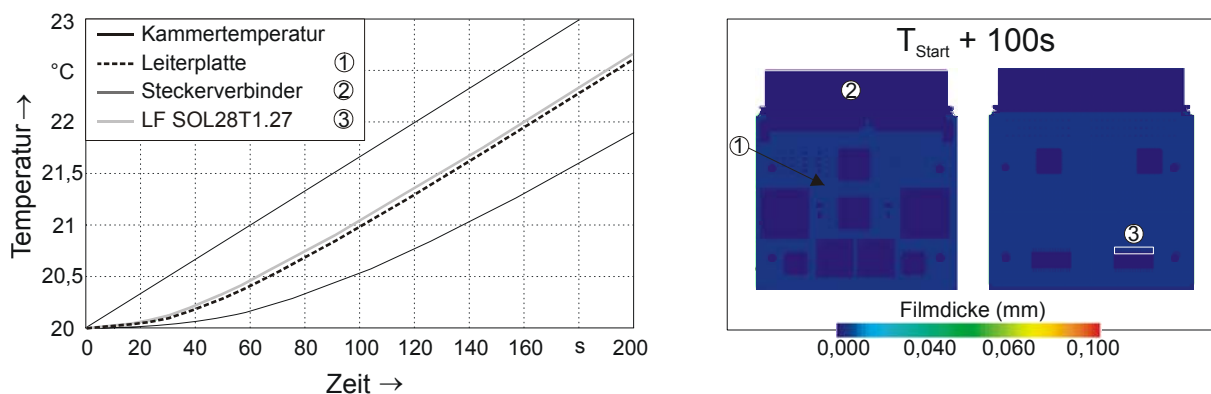


Bild 90: Temperaturverlauf an exemplarischen Stellen der Baugruppe und simulierte Filmdicke auf der Oberfläche

Da auf der realen Baugruppe eine Kondensation an den Stellen erwartet werden kann, an denen die größten Temperaturdifferenzen zur Umgebungsluft vorliegen, erfolgte in einem zweiten Schritt die Analyse des thermischen Verhaltens der Baugruppe bei einem Temperaturanstieg. Wie bei der Betaungssimulation wurde ein Temperaturgradient von 1 K/min von 20 °C auf 65 °C betrachtet, und das Temperaturverhalten der einzelnen Bauelemente auf der Baugruppe untersucht. Hierbei konnte festgestellt werden, dass der Bereich auf der Oberseite der Leiterplatte direkt vor dem Steckverbinder die größte Temperaturdifferenz aufweist. Aufgrund der Tatsache, dass dort aber nicht die größten und vermeintlich thermisch trägsten Bauelemente vorzufinden sind, wurde ergänzend das Strömungsverhalten im Bereich der Leiterplatte untersucht, um das thermische Verhalten zu erklären. Unter der Annahme einer homogenen Eintrittsströmungsgeschwindigkeit in das Berechnungsvolumen und einer horizontalen Ausrichtung der Baugruppe haben die Analysen ergeben, dass vor dem Steckverbinder die niedrigsten Strömungsgeschwindigkeiten auftreten. Hierbei wirkt der Steckverbinder wie eine Strömungsblockade, wodurch lokale Verwirbelungen und eine veränderte Strömungsführung einen optimalen Wärmeaustausch zwischen den Bauelementen vor dem Stecker und der umliegenden warmen Luft verhindern. Anhand von Bild 91 wird das thermische Verhalten der Baugruppe bei ausgeblendetem Steckverbinder zu Beginn und am Ende des Temperaturanstiegs sowie das Strömungsverhalten an der Baugruppe visualisiert.

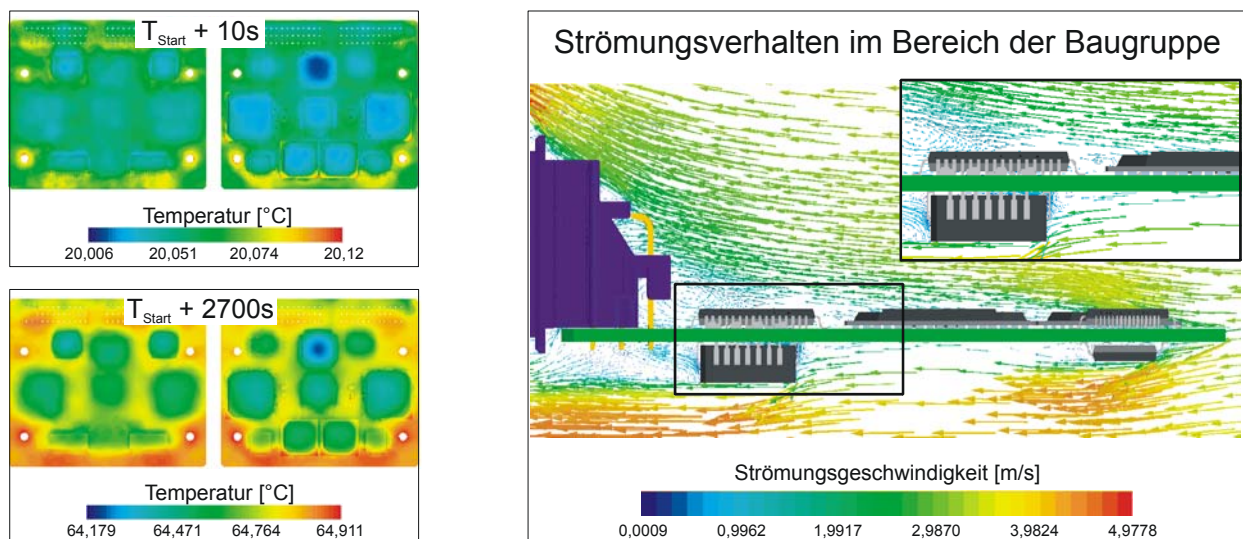


Bild 91: Thermisches Verhalten der Baugruppe zu Beginn und am Ende des Temperaturanstiegs sowie das simulierte Strömungsverhalten an der Baugruppe

8.4 Verifikation der Simulationsergebnisse

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse erfolgte gemäß dem eingangs beschriebenen Vorgehensmodell anschließend die Produktverifikation auf Testebene. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass neben den im Modell hinterlegten Parametern zusätzliche Einflussgrößen aus dem Prozess in die Ergebnisse mit einfließen können. Um die Ergebnisse der Simulation zu überprüfen, erfolgte zunächst eine Temperaturmessung auf verschiedenen Bauelementen während des Temperaturanstiegs von 20 °C auf 65 °C. Da bei der Verwendung von Thermoelementen bereits die Sensoren eine Messtoleranz von etwa 1 K aufweisen können, wurde der Fokus auf die Identifikation der thermisch trägsten Stellen gelegt. Hierzu wurde neben dem Steckverbinder zudem die Temperatur auf dem nächstgelegenen QFP-Baustein sowie dem benachbarten PBGA-Baustein erfasst. Wie auch in der Simulation festgestellt werden konnte, stellt der Bereich vor dem Steckverbinder beziehungsweise der Steckverbinder selbst die thermisch trägste Stelle auf der Leiterplatte dar. Bei den QFP- und BGA-Bauelementen konnte kein Temperaturunterschied festgestellt werden. Ergänzend zu den Temperaturmessungen wurde mittels thermographischer Analysen das thermische Verhalten der Baugruppe bei deren Umlagerung aus dem Klimaschrank bei 10 °C zu Normalklima betrachtet. Zwar ist hierbei der Einfluss der Strömung eliminiert, aber dennoch hat sich gezeigt, dass ebenfalls der lokale Bereich zentral vor dem Steckverbinder die kühlsche Zone der Leiterplatte darstellt. Bild 92 verdeutlicht die beiden geschilderten Erkenntnisse.

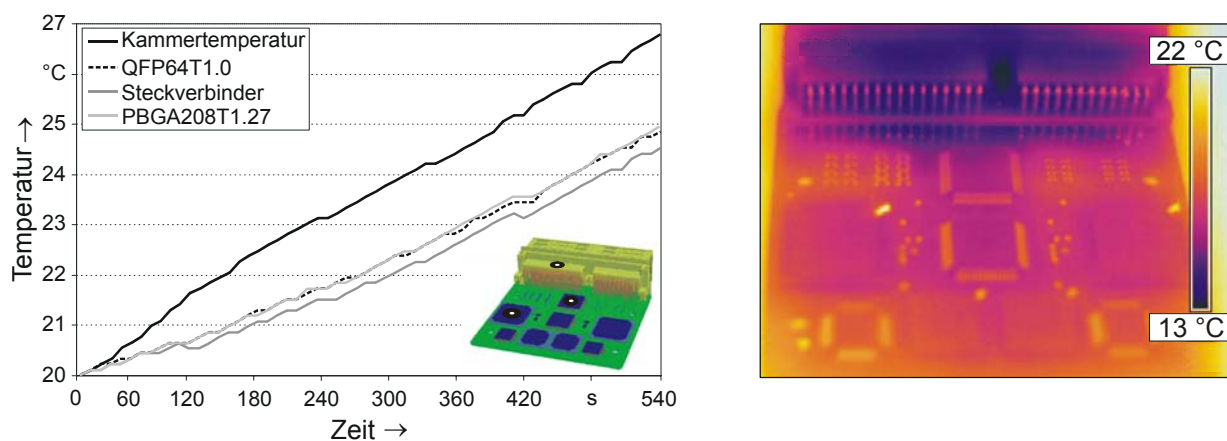


Bild 92: Temperaturmessung auf verschiedenen Bauelementen zu Beginn des Temperaturanstiegs im Testzyklus sowie eine Thermographieaufnahme der Baugruppe nach der Umlagerung von 10 °C in Normalklima

Da aus der Kammertemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit die Taupunkttemperatur, welche die Baugruppenoberfläche für eine forcierte Kondensation unterschreiten muss, mathematisch bestimmt werden kann, können Aussagen

über eine Wasseradsorption auf der Oberfläche der Baugruppe getroffen werden. Infolgedessen wird beispielsweise bei 25 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 93 % der Taupunkt bei 23,8 °C unterschritten. Entsprechend den Messergebnissen hat sich demnach auf der Steckeroberfläche ein Kondensat ausgebildet, wohingegen aus theoretischer Sicht an den anderen Messorten kein Kondensat auf der Baugruppe vorhanden war. Allerdings gilt es zu bedenken, dass lokale Verunreinigungen auf der Oberfläche die Taupunkttemperatur herabsetzen können.

Weiterhin kann eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Temperatursimulation und der realen Messung festgestellt werden. Dieser Sachverhalt lässt sich an der Temperaturdifferenz zwischen der Umgebungsluft in der Kammer und der Oberflächentemperatur des Steckverbinders verdeutlichen. Die maximale Abweichung zwischen Simulation und Test beträgt hierbei etwa 0,3 K.

Im Anschluss an die Analyse der thermischen Eigenschaften der Baugruppe erfolgte mit der realen Baugruppe die Durchführung einer zyklischen Temperatur-Feuchte-Prüfung mit identischen Parametern wie in der Simulation. Hierbei konnte festgestellt werden, dass nur ein begrenztes Bauteilspektrum während einer Testdauer von 30 Stunden auffällig war. Wie aus den Simulationsergebnissen und den Temperaturmessungen bekannt war, befindet sich die thermisch trügste Stelle der Baugruppe zentral vor dem Steckverbinder. Diese Zone konnte auch bei dem Klimakammerversuch als primäre Ausfallstelle identifiziert werden. Vor allem die beiden QFP-Bauelemente in zentraler Anordnung vor dem Stecker waren sowohl elektrisch als auch optisch durch ECM auffällig. Neben den beiden genannten Bauelementen vielen ebenfalls die benachbarten Keramikkondensatoren der Bauform 0402 und 0805 bei den Messungen auf. Besonders signifikant war, dass die am Rand platzierten Kondensatoren trotz gleicher beziehungsweise geringerer Baugröße nicht im Test ausgefallen waren. Bei den elektrisch auffälligen Kondensatoren konnten keine Spuren einer metallischen Migration festgestellt werden, was darauf hindeutet, dass der elektrische Kurzschluss auf der Leiterplatte unter den Bauelementen oder auf der Unterseite der Kondensatoren aufgetreten ist. Obwohl der horizontal gegenüberliegende Bereich zum Stecker als die Zone mit der geringsten thermischen Trägheit identifiziert wurde, konnten an dieser Stelle bei einem der QFP64T0.8-Bauelemente sowohl elektrisch als auch optisch das bekannte Fehlerbild festgestellt werden. Der von allen bestückten Bauelementen geringste Abstand der Anschlüsse bei diesem Bauelementetyp als auch möglicherweise vorhandene lokale Verunreinigungen können für diesen Effekt verantwortlich gemacht werden. Weiterhin ist bei den Versuchen aufgefallen, dass ein Teil der elektrischen Kurzschlüsse nicht nur in den Temperaturanstiegsphasen sondern auch in den fallenden Temperaturflanken aufgetreten ist. Der dafür verantwortliche Effekt liegt darin begründet, dass bei einem negativen Temperaturgradienten bei konstanter Luftfeuchtigkeit ein Teil der

in der Luft überschüssigen Wassermenge während der Abkühlphase an der Baugruppe kondensieren kann. Alle aufgetretenen elektrischen Kurzschlüsse waren sporadischer Natur. In Bild 93 wird der Stromverlauf an den angesprochenen Bauelementen sowie die Fehlerlokalisierung und deren Nachweis dargestellt.

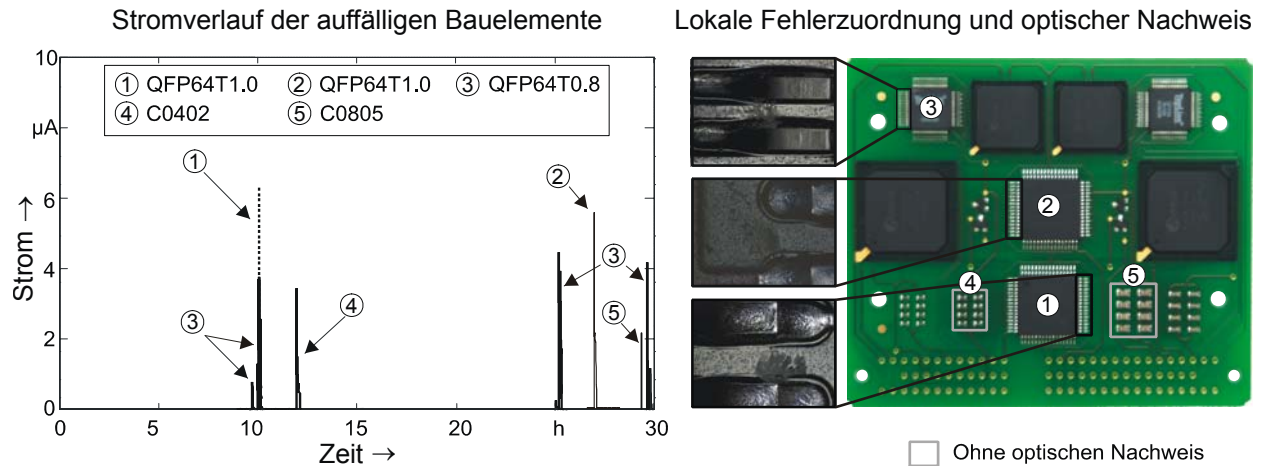


Bild 93: Elektrisch auffällige Bauteile und deren lokale Zuordnung auf der Leiterplatte mit und ohne optischen Nachweis

Vergleicht man zusammenfassend die Ergebnisse auf Simulationsebene und Versuchsebene, so zeigt sich eine hohe Korrelation der Zusammenhänge. In den Experimenten konnte nachgewiesen werden, dass an den Stellen, die in der Simulation die höchste thermische Trägheit aufwiesen, auch in den Versuchen die größte Fehlerhäufigkeit aufgetreten ist. Daher kann die Schlussfolgerung getroffen werden, dass zum aktuellen Stand eine Simulation des thermischen Verhaltens einer elektronischen Baugruppe bessere Erkenntnisse liefert als die Anwendung der evaluierten Betaungssimulation. Grund hierfür sind die komplexen Wirkzusammenhänge zwischen einer Wasserkondensation und den daran beteiligten Parametern wie Oberflächenrauigkeit, Hydrophobie der Oberfläche oder wasserbindende Verunreinigungen, welche im Simulationsmodell nicht hinterlegt sind. Die Prozesse im Rahmen der Elektronikfertigung bestimmen diese Parameter maßgeblich. Allerdings eignet sich das vorgestellte methodische Vorgehen der thermischen Betrachtung optimal, um entwicklungsbegleitende Erkenntnisse über die spätere Robustheit eines Produktes gegen Ausfälle durch Betaung zu gewinnen.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Mit fortschreitender Komplexitätssteigerung und dem anhaltenden Trend zu hoher Funktionsintegration und Miniaturisierung elektronischer Systeme für automobiler Anwendungen nimmt die Empfindlichkeit dieser Systeme gegen unterschiedliche Umweltbelastungen stetig zu. Gerade der bisher kaum berücksichtigte Effekt der Betauung gewinnt mit den reduzierten Anschlussabständen und hochsensitiven analogen und digitalen Signalen zunehmend an Bedeutung. Daher treten insbesondere in der Erprobung und der Qualifizierung elektronischer Komponenten und Systeme vermehrt betauungsbedingte Ausfälle in den Klimaprüfungen auf. Verkürzte Entwicklungszeiten und eine hohe Variantenvielfalt der Systeme erfordern eine schnelle Fehlerursachenanalyse sowie zeit- und wirkungseffiziente Maßnahmen zur Fehlervermeidung. Darüber hinaus werden entwicklungsbegleitende Verfahren und Methoden benötigt, die eine frühzeitige Robustheitsbewertung elektronischer Baugruppen gegen die Einwirkung von Betauung gewährleisten.

Ausgehend von physikalisch-chemischen Effekten bei einer Feuchteadsorption wurden im Rahmen der Arbeit unterschiedliche zuverlässigkeitsrelevante Einflussgrößen analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass im Vergleich zu einem Gleichsignal die Lebensdauer bei Betauung durch unipolare Signale mit steigender Frequenz erhöht werden kann und durch bipolare Signale ab Frequenzen von etwa 5 Hz Ausfälle gänzlich vermieden werden. Darüber hinaus wurden deutliche Zuverlässigkeitsunterschiede auf Material- und Bauteilebene am Beispiel von Lotpastensystemen und Keramik Kondensatoren identifiziert. Diese gewonnenen Erkenntnisse bieten die Möglichkeit, basierend auf den vorgestellten Versuchsstrategien, die Robustheit einer Baugruppe bereits auf Bauelement- und Materialebene zu bewerten.

Da heutzutage vermehrt Schutzlackierung zur Verbesserung der Klimabeständigkeit elektronischer Baugruppen eingesetzt werden, wurde an einem komplexen Testschaltungsträger die Wirksamkeit unterschiedlicher Lacksysteme analysiert. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass eine Schutzlackierung der elektronischen Baugruppen zwar eine Zuverlässigkeitsverbesserung bewirkt, aber keine ganzheitliche Betauungszuverlässigkeit in den Klimaprüfungen gewährleistet. Abhängig von der Lackart und der Auftragsqualität konnten ausfallkritische Bauelementtechnologien und dafür verantwortliche Ursachen ermittelt werden.

Da ein stetig steigender Bedarf an systemspezifisch angepassten Prüfstrategien vorliegt, wurde ein Konzept erarbeitet, welches eine individuell an das System und dessen Einsatzort adaptierte Prüfkonzeptgestaltung gewährleistet. Auf Basis

einer strukturierten Systemanalyse und einer fehlerphysikorientierten Betrachtung kritischer Systembestandteile können damit relevante Belastungsarten identifiziert und daraus Prüfanforderungen abgeleitet werden.

Mit Hilfe der durchgeführten Fahrzeugmessungen und der Erfassung ausfallrelevanter Belastungsparameter kann für zukünftige Erprobungs- und Qualifizierungsprüfungen eine einsatzortgerechte Prüfprofilgestaltung für klimatische Belastungen erfolgen. Im Vergleich zum standardmäßig verwendeten Prüfverfahren können, angepasst an den primär in den Prüfungen induzierten Fehlermechanismus, die Prüfzeiten bei gleichbleibender Belastungszyklenzahl um etwa 50 % reduziert werden. Eine Bestimmung lebensdauerrepräsentativer Testzeiten mittels mathematischer Beschleunigungsmodelle hat sich aufgrund der Komplexität und der Vielzahl an zuverlässigkeitsrelevanten Einflussgrößen als wenig sinnvoll erwiesen. Ergänzend zu der optimierten Auslegung klimatischer Prüfstrategien wurde ein Vorgehensmodell entwickelt, welches durch eine theoretische Betrachtung der Zusammenhänge zwischen Fehlermechanismus und Fehlerauswirkung auf Systemebene eine zeiteffiziente Fehleridentifikation und deren Verifikation bei Auffälligkeiten ermöglicht.

Als innovativer Beitrag zur entwicklungsbegleitenden Robustheitsbewertung in den frühen Konzept- und Designphasen wurde der Einsatz simulativer Verfahren bewertet und verifiziert. Durch eine modellbasierte Simulation des thermischen Verhaltens unter realen Testbedingungen ist eine Identifikation betauungskritischer Layoutbereiche auf elektronischen Baugruppen möglich. Experimentelle Untersuchungen in Form von Klimakammerversuchen und thermografischen Analysen haben die Einsatzmöglichkeit der Simulation bestätigt.

Die vorliegende Arbeit liefert einen wichtigen Beitrag im Bereich der entwicklungsbegleitenden Robustheitsabsicherung elektronischer Baugruppen gegen den Effekt der Betaung. Diese in der Qualifizierungsphase abgesicherte Zuverlässigkeit, gilt es in einer Serienfertigung kontinuierlich aufrecht zu erhalten. Bisher existieren keine serienbegleitenden Verfahren, die eine zuverlässige Aussage über eine Betaungsrobustheit gefertigter elektronischer Systeme erlauben. Hierzu bedarf es der Entwicklung integrativer Prüfkonzepte, welche Aussagen über die Qualität des Fertigungsprozesses und die dabei eingesetzten Bauelemente liefern.

Literaturverzeichnis

- [1] Ackermann, G.; Jugelt, W.; Möbius, H.-H.; Suschke, H. D.; Werner, G.: Elektrolytgleichgewichte und Elektrochemie. 1. Auflage, Verlag Chemie GmbH, Weinheim, 1975.
- [2] Albers, A.; Nowicki, L.: Integration der Simulation in die Produktentwicklung- Neue Möglichkeiten zur Steigerung der Qualität und Effizienz in der Produktentwicklung. In Tagungsband: Simulation in der Produkt- und Prozessentwicklung, Bremen, 2003, 141-147.
- [3] Ambat, R.; Jensen, S., G.; Moller, P.: Corrosion reliability of electronic systems. In: ECS The Electrochemical Society: Corrosion (General), Vol. 6, No.24, New Jersey, 2008, 17-28.
- [4] Benson, R. C.; Romenesko, B. M.; Weiner, J. A.; Nall, B. H.; Charles, H. K. Jr.: Metal electromigration induced by solder flux residue in hybrid microcircuits. In: IEEE Transactions on components, hybrids and manufacturing technology, Vol. 11, No. 4, 1988, 363-370.
- [5] Beucher, O.: Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik mit Matlab-Anwendungsorientierte Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007.
- [6] Bojta, P.; Németh, P.; Harsányi, G.: Searching for appropriate humidity accelerated migration reliability tests methods. In: Microelectronics Reliability, Vol. 42, Elsevier Science Ltd. (Hrsg.), 2002, 1213-1218.
- [7] Böge, W; Plassmann, W.: Vieweg Handbuch Elektrotechnik-Grundlagen und Anwendungen für Elektrotechniker. 4. Auflage, Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [8] Briehl, H.: Chemie der Werkstoffe. 2. Auflage, Teubner Verlag, Wiesbaden, 2008.
- [9] Brinkmann, C.: Die Isolierstoffe der Elektrotechnik. 1.Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 1975.
- [10] Bumiller, E.; Hillman, C.: A Review of Models for Time-to-Failure Due to Metallic Migration Mechanisms. DfR Solutions (Hrsg.), Datei: http://www.dfrsolutions.com/uploads/white-papers/Time-to-Failure_Metallic_Migration.pdf, Zugriff am 06.12.2009.
- [11] Bumiller, E.; Pecht, M.; Hillman, C.: Electrochemical Migration on HASL-Plated FR4 Printed Circuit Boards. Journal of Surface Mount Technology, Vol. 17, No. 2, 2004, 37-41.

-
- [12] Cammann, K.; Galster, H.: Das Arbeiten mit ionenselektiven Elektroden: Eine Einführung für Praktiker. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg/New York, 1996.
- [13] Caruso, H.; Dasgupta, A.: A fundamental Overview of Accelerated-Testing-Analytic Models. In: Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, New York, 1998, 389-393.
- [14] Cäsar, J., Braunmiller, U.: Betaung- Die unbekannte Größe. In: Tagungsband: 33. Jahrestagung- Umwelteinflüsse erfassen, simulieren, bewerten. Gesellschaft für Umweltsimulation (Hrsg.), Pfinztal, 2004, 177-198.
- [15] CD adapco: User Manual STAR-CCM+ V5. <http://www.cd-adapco.com/>, Zugriff am 22.03.2010.
- [16] Condra, L.W.: Reliability improvement with design of experiments. 2. Auflage, Marcel Dekker Inc., New York, 2001.
- [17] Cramer, E.; Kamps, U.: Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik-Ein Skript für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften. 2. Auflage, Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2008.
- [18] Cullen, D. P.; O'Brien, G.: Implementation of immersion silver PCB surface finish in compliance with Underwriters Laboratories. In: Proceedings of IPC Printed Circuit Expo SMEMA Council APEX Designers Summit 2004, Anaheim, 2004, S10-5-1 – S10-5-10.
- [19] Cullen, D.: Preventing Corrosion of PCB Assemblies. In: OnBoard Technology-October 2008, 2008, 52-57.
- [20] Czeslik, C.; Seemann, H.; Winter, R.: Basiswissen Physikalische Chemie. Vieweg Teubner Verlag, Wiesbaden, 2009.
- [21] Datenblatt LM48100Q: Mono, 1,3W Audio Amplifier with Output Fault Detection and Volume Control. National Semiconductor, 12/2008.
- [22] Datenblatt LTC3827-1: Low IQ, Dual, 2-Phase Synchronous Step-Down Controller. Linear Technology, Milpitas (CA), 2005.
- [23] Delonga, M.: Zuverlässigkeitsmanagement auf Basis von Felddaten. Dissertation, Universität Stuttgart, 2007.
- [24] Deutscher Wetterdienst: Wetter und Klima- Deutscher Wetterdienst. <http://www.dwd.de>, Zugriff am 29.01.2010.

-
- [25] Di Giacomo, G.: Corrosion Model for Plastic encapsulated and hermetic Modules. In: Proceedings of 18th Reliability Physics Symposium, Las Vegas, 1980, 275-281.
- [26] Doering, E.; Schedwill, H.; Dehli, M.: Grundlagen der Technischen Thermodynamik. 5. Auflage, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 2005.
- [27] Dodson, B.: The Weibull Analysis Handbook. Band 2, ASQ Quality Press (Hrsg.), Milwaukee, 2006.
- [28] Dudenhöfer, F.; Krüger, M.: Ausfallrate durch Elektronik: Ausfallrate durch Elektrik/Elektronik steigt weiter an. In: Automobiltechnische Zeitung, Jahrgang 106, GWV Media, Wiesbaden, 2004, 1022-1024.
- [29] Edson, L.: The GMW3172 Users Guide- Electrical Component Testing. General Motors Corp. (Hrsg.), Revision 12, 2006.
- [30] Eichler, H. J.; Kronfeldt, H.-D.; Sahm, J.: Neue Physikalische Grundpraktikum, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2006.
- [31] Ellis B.N.: Reinigen in der Elektronik. Eugen G. Leuze Verlag, Saulgau/Württ, 1989.
- [32] Feldmann, K.; Matzner, C.; Schimpf, C.: Kondensation auf Elektronikbaugruppen. In: wt Werkstattstechnik online Jahrgang 97, Heft 11/12, 2007, 873-878.
- [33] Feldmann, K.; Matzner, C.; Schimpf, C.; Steinke, A.: Ausfallverhalten elektronischer Baugruppen unter Betauungseinfluss. In: Tagungsband: Elektronische Baugruppen und Leiterplatten EBL 2008 - Systemintegration und Zuverlässigkeit, Fellbach, 13.-14.02.2008, CD-ROM.
- [34] Fiedler, V.: Atmospheric SO₂: Global Measurements using Aircraft-Based CIMS. Dissertation, Universität Heidelberg, 2007.
- [35] Forkel M.: Genetische Klimaklassifikationen. Datei: <http://klima-der-erde.de/flohn.html>, Zugriff am 13.02.2010.
- [36] Foucher, B.; Boulliè J.; Meslet B.; Das, D.: A review of reliability prediction methods for electronic devices. In: Microelectronics Reliability, Vol.42, Elsevier Science Ltd. (Hrsg.), 2002, 1155–1162.
- [37] Franke, H.J.; Gausemeier, J.; Krause F.L.: Innovationspotenziale in der Produktentwicklung. Carl Hanser Verlag, München/Wien, 2007.
- [38] Fuchs, N.: Über die Taubildung. In: Colloid & Polymer Science, Volume 71, Nr. 2, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 1935.

-
- [39] Fuchs, O.: Physikalische Chemie als Einführung in die chemische Technik. H.R. Sauerländer & Co. Aarau, Frankfurt am Main, 1957.
- [40] Ganesan, S.; Pecht, M.: Lead-free electronics. John Wiley & Sons, Inv., New Jersey, 2006.
- [41] Geschke, D.: Physikalisches Praktikum- Mit multimedialen Ergänzungen. 12. Auflage, B.G. Teubner Verlag, Stuttgart, 2001.
- [42] Geller, W.: Thermodynamik für Maschinenbauer. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2005.
- [43] Georgi, C.: Interdisziplinäres Grundpraktikum: Mechanische Eigenschaften-Biegefestigkeit von Keramiken/Weibull Statistik. Technische Universität Illmenau, Institut für Werkstofftechnik, 2008.
- [44] Girgsdies, U.; Hellenthal, B.; Schneider, K.: Robust und Zuverlässig-Präventive Entwicklungs- und Verifikationsmethoden zur Absicherung von Mechatroniksystemen. In: Elektronik automotive, Sonderausgabe Audi A8, WEKA Fachmedien GmbH (Hrsg.), 2010, 112-117.
- [45] Grote K.-H; Feldhusen, J.: Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007.
- [46] Habaki, H.; Yamasaka, T.; Iwakabe, K.; Kawasaki, J.: Dendrite Formation by Copper Ion Migration in Printed Wiring Board. In: Thammasat International Journal of Science and Technology, Vol.13, 2008, 6-10.
- [47] Hahn, L.; Munke, I.: Werkstoffkunde für die Elektrotechnik und Elektronik. 3. Auflage, VEB Verlag, Berlin, 1973.
- [48] Hallberg, Ö.; Peck, D. S.: Recent Humidity Accelerators, A Base For Testing Standards. In: Quality and Reliability Engineering International, Vol. 7, 1991, 169-180.
- [49] Hallberg, Ö.: Acceleration Factors for Temperature-Humidity Testing of Al-Metallized Semiconductors. Presented at SINTOM-seminar, Elektronik-centralen, Kopenhagen. 4.-6.09.1979.
- [50] Hamann C. H.; Vielstich, W.: Elektrochemie. 4. Auflage, Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2005.
- [51] Haynes, G; Baboian, R.: Copper corrosion product on Creep on stainless steels. In: Proceedings of the third international symposium on Corrosion and reliability of electronic materials and devices, New Jersey, 1994, 88-93.
- [52] Harsányi G.: Electrochemical Processes Resulting in Migrated Short Failures in Microcircuits. In: IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology-part A, Vol. 18, No. 3, 1995, 602-610.

- [53] Harsányi G.: Irregular effect of chloride impurities on migration failure reliability: contradictions or understandable? In: Microelectronics Reliability, Vol. 39, Elsevier Science Ltd. (Hrsg.), 1999, 1407-1411.
- [54] Harsányi, G.; Illyefalvi-Vitèz, Z.: Correlation between material composition, processing, chemical bonding state, and electrochemical migration failure rate in isolating compounds of high density microelectronics systems. In: Proceedings of 48th IEEE Electronic components and technology conference, Orlando, 1996, 765-771.
- [55] Harten, U.: Physik-Einführung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007.
- [56] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. 9. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2004.
- [57] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. 10. Auflage, Springer Verlag, Berlin/Heidelberg, 2007.
- [58] Hering, R.; Martin, R.; Stohrer, M.: Taschenbuch der Mathematik und Physik. 5. Auflage, Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2009.
- [59] Hermann, A.; Kind, M.; Stichlmair, J.: Thermische Verfahrenstechnik. 2. Auflage, Springer Verlag, Heidelberg, 2005.
- [60] Harrison, R. M.: Sources of air pollution. In: Air Quality Guidelines-Global Update 2005, WHO- World Health organisation (Hrsg.), Copenhagen, 2006.
- [61] Hertel, G.: Mercer-Studie Autoelektronik. In: Automobil-Elektronik, Verlag Hüthig GmbH, Heidelberg, 2006.
- [62] Holze R.: Leitfaden der Elektrochemie. Teubner Verlag, Stuttgart/Leipzig, 1998.
- [63] Howard, R. T.: Electrochemical Model for Corrosion of Conductors on Ceramic Substrates. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Vol. CHMT-4, No.4, 1981, 520-525.
- [64] Jahn, W.; Braun, L.: Praxisleitfaden Qualität- Prozessoptimierungen mit multivariater Statistik in 150 Beispielen. Carl Hanser Verlag, München, 2006.
- [65] Janouch, S.: In der Qualitäts-Sackgasse: Zerstörung als Methode einer nachhaltigen Qualitätssicherung. In: Elektronik automotive, WEKA Fachmedien GmbH (Hrsg.), 2006, 79-81.
- [66] Kaesche, H.: Die Korrosion der Metalle. 3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1990.

- [67] Koelmans, H.: Metallization Corrosion in Silicon Devices by Moisture-Induced Electrolysis. In: Proceedings of 12th Annual Reliability Physics Symposium, New York, 1974, 168-171.
- [68] Konzernnorm Volkswagen AG: VW 80101 Mrz. 2003: Elektrische und elektronische Baugruppen in Kraftfahrzeugen- Allgemeine Prüfbedingungen.
- [69] Kottek, M.; Grieser, J.; Beck, C.; Rudolf, B.; Rubel, F.: World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. Meteorologische Zeitschrift, Vol.15, No.3, 2006, 259-263.
- [70] Kramme, R.: Medizintechnik: Verfahren- Systeme- Informationsverarbeitung. 3. Auflage, Springer Medizin Verlag, Heidelberg, 2007.
- [71] Krumbein, S.J.: Metallic Electromigration Phenomena. In: IEEE Transactions on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, Volume 11, Issue1, 1988, 5-15.
- [72] Krückeberg, J.: Hochleistungs-Leds in der Praxis. Franzis Verlag GmbH, Poing, 2007.
- [73] Kurella, A.; Manukutla, A.; Lewis, J. S.: PCB related field failures with ImAg surface finishes. In: Proceedings of 3rd International Symposium for Testing and Failure Analysis, San Jose, 2007, 293-297.
- [74] Kurzweil, P.: Das Vieweg Formel-Lexikon: Basiswissen für Ingenieure, Naturwissenschaftler und Mediziner. 1. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden, 2002.
- [75] Lakshminarayanan, V.: Using Models to Predict Semiconductor Failures. In: Test & Measurement World, November Issue, Reed Business Information (Hrsg.), Waltham, 11/1/1999.
- [76] Lawson, R. W.: The Accelerated Testing of Plastic Encapsulated Semiconductor Components. In: Proceedings of 12th Annual Reliability Physics Symposium, New York, 1974, 243-249.
- [77] Lin, E.: Anti-CAF „Conductive Anodic Filament“ CCL Material. Datei: <http://www.npc.com.tw/emd-new/di1/share/c4-01-4.htm>, Zugriff am 23.09.2009.
- [78] Livingston, H.: SSB-1: Guidelines for using plastic encapsulated microcircuits and semiconductors in military, Aerospace, and other rugged applications. EIA Tech. Paper (Hrsg.), Datei: <http://nepp.nasa.gov/downloads/77082CF9-CD35-4B5F9CAE5004DE386E64/Guidelines%20for%20using%20PEMs.pdf>, Zugriff am 25.01.2010.

- [79] Liu, W.; Pecht, M.: IC Component Sockets. John Wiley & Sons Inc., New Jersey, 2004.
- [80] Matsumara, A.; Satake, M.; Noguchi, H.; Okada, S.: Analysis on Initiation Process of Ionic Migration of Ag and Cu with aid of Low Voltage. In: Journal of Japan Institute of Electronics Packaging, 2003, 546-549.
- [81] Matzner, C.: Bestimmung migrationsrelevanter Einflussfaktoren anhand von Teststrukturen. In Tagungsband: Schutzmaßnahmen zur Klimasicherheit elektronischer Baugruppen, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (Hrsg.), Regensburg, 2009, 139-151.
- [82] Matzner, C.; Feldmann, K.: Adapted strategies for dew condensation testing to evaluate the reliability of lead free surface finishes. In: Proceedings of 47th International Reliability Physics Symposium, Montreal, 2009, 343-349.
- [83] Matzner, C.; Franke, J.: Einfluss von Schadgasen auf die Klimabeständigkeit elektronischer Baugruppen. In Tagungsband: 2. Landshuter Symposium Mikrosystemtechnik, Landshut, 2010, 379-388.
- [84] McCluskey, F.P.; Kweon, Y.D.; Lee, H.J.; Kim, J.W.; Jeon, H.S.: Method for assessing remaining life in electronic assemblies. In: Microelectronics Reliability, Vol. 40, Elsevier Science Ltd. (Hrsg.), 2000, 293-306.
- [85] Michaelkiewicz, R.; Green, J.; Opperhauser, S.: Surface insulation resistance testing of soldering pastes and fluxes. In: Proceedings of Pan Pacific Microelectronics Symposium, Kauai, 2001, 505-514.
- [86] Minges, M. L.: Electronic Materials Handbook Volume 1: Packaging. ASM International Committee (Hrsg.), Materials Park (Ohio), 1989.
- [87] Mok, Y. L.; Ten, L.M.: A Review of Plastic Encapsulated Microcircuit Reliability Prediction Models. In: Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium, Los Angeles, 2000, 200-205.
- [88] Moulson, A. J.; Herbert, J. M.: Electroceramics: materials, properties, applications. 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., Southern Gate Chichester, 2003.
- [89] Naisbitt G.: Avoiding electro-chemical failure in a lead-free age. Gen3Systems (Hrsg.), Datei: <http://www.gen3systems.com/downloads/news/126.pdf>, Zugriff am 26.01.2010.
- [90] N.N.: About NCDC. National Climatic Data Center (Hrsg.), <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/about/about.html>, Zugriff am 29.01.2010.

-
- [91] N.N.: ADAC Pannenstatistik 2008. ADAC- Allgemeiner Deutscher Automobil-Club (Hrsg.), Datei: http://www1.adac.de/images/25797_tcm8-250130.pdf, Zugriff am 15.01.2010.
- [92] N.N.: Clean power from deserts. White Book, 4th Edition, Protext Verlag, Bonn, 2009.
- [93] N.N.: Handbook for Robustness Validation of Automotive Electrical/Electronic Modules. ZVEI- Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (Hrsg.), Frankfurt am Main, 2008.
- [94] N.N.: JEDEC Publication JEP148: Reliability Qualification of Semiconductor Devices Based on Physics of Failure Risk and Opportunity Assessment. JEDEC Solid State Technology Association (Hrsg.), Arlington, 2004.
- [95] N.N.: JEDEC Publication JEP122B: Failure mechanisms and models for semiconductor devices. JEDEC Solid State Technology Association (Hrsg.), Arlington, 2003.
- [96] N.N.: Information About Our Data. Weather Underground Inc. (Hrsg.), Datei: <http://www.wunderground.com/about/data.asp>, Zugriff am 15.01.2010.
- [97] N.N.: Life Data Analysis Reference On-Line-Help: Data Classification. ReliaSoft Corporation (Hrsg.), Datei: http://www.weibull.com/LifeDataWeb/data_classification.htm, Zugriff am 24.10.2009.
- [98] N.N.: Oliver Wyman Studie: Car Innovation 2015. In: Automobil Produktion-Sonderausgabe Innovationen, Verlag Moderne Industrie GmbH, Landsberg, 2008.
- [99] N.N.: Selektive Sprühlackierung Stream-Coat®. kc-Produkte (Hrsg.), Datei: <http://www.kc-produkte.com/produkte/streamcoat.html>, Zugriff am 06.11.2009.
- [100] Norm AEC-Q100 Rev-G Mai 2007: Failure mechanism based stress test qualification for Integrated Circuits.
- [101] Norm AEC-Q200 Rev-C Jun. 2005: Stress Test Qualification For Passive Components.
- [102] Norm ASTM B 845-97 Jun. 2003: Standard Guide for Mixed Flowing Gas (MFG) Tests for Electrical Contacts.
- [103] Norm Bellcore GR-78-CORE Sep. 1997: Generic Requirements for the Physical Design and Manufacture of Telecommunications Products and Equipment.
- [104] Norm DIN EN ISO 4618 Mrz. 2007: Beschichtungsstoffe- Begriffe.

-
- [105] Norm DIN 32513 Jan. 2005: Weichlotpasten- Teil 1: Zusammensetzung, Technische Lieferbedingungen.
- [106] Norm DIN EN 60068-2-6 Okt. 2008: Umgebungseinflüsse- Teil 2-6: Prüfverfahren - Prüfung Fc: Schwingen (sinusförmig) (IEC 60068-2-6:2007).
- [107] Norm DIN EN 60068-2-14 Aug. 2000: Umgebungseinflüsse- Teil 2-14: Prüfverfahren - Prüfung N: Temperaturwechsel (IEC 104/446/CDV:2007).
- [108] Norm DIN EN 60068-2-30 Jun. 2006: Umgebungseinflüsse- Teil 2-30: Prüfverfahren- Prüfung Db: Feuchte Wärme, zyklisch (12 + 12 Stunden) (IEC 60068-2-30:2005).
- [109] Norm DIN EN 60068-2-38 Feb. 2000: Umgebungseinflüsse- Teil 2-38: Prüfverfahren- Prüfung Z/AD: Zusammengesetzte Prüfung, Temperatur/Feuchte, zyklisch (IEC 104/426/CD:2007).
- [110] Norm DIN EN 60068-2-60 Sep. 1996: Umweltprüfungen- Teil 2: Prüfungen - Prüfung Ke: Korrosionsprüfung mit strömendem Mischgas (IEC 60068-2-60:1995).
- [111] Norm DIN EN 60068-2-64 Apr. 2009: Umgebungseinflüsse- Teil 2-64: Prüfverfahren - Prüfung Fh: Schwingen, Breitbandrauschen (digital geregelt) und Leitfaden (IEC 60068-2-64:2008).
- [112] Norm DIN EN 60068-2-78 Sep. 2002: Umweltprüfungen- Teil 2-78: Prüfungen; Prüfung Cab: Feuchte Wärme, konstant (IEC 60068-2-78:2001).
- [113] Norm DIN EN 61190-1-1 Jan. 2003: Verbindungsmaterialien für Baugruppen der Elektronik- Teil 1-1: Anforderungen an Weichlöt-Flussmittel für hochwertige Verbindungen in der Elektronikmontage (IEC 61190-1-1:2002).
- [114] Norm DIN 75220 Nov. 1992: Alterung von Kfz-Bauteilen in Sonnensimulationsanlagen.
- [115] Norm IPC J-STD-004A Jan. 2004: Requirements for Soldering Fluxes.
- [116] Norm IPC TM-650 2.6.3.1E Mrz. 2007: Solder Mask- Moisture and Insulation Resistance.
- [117] Norm IPC TM-650 2.6.3.3B Jun. 2004: Surface Insulation Resistance, Fluxes.
- [118] Norm IPC TM-650 2.6.25 Okt. 2005: Conductive Anodic Filament (CAF) Resistance Test.

- [119] Norm IEC 61189-5 Ed. 1 Jun. 2002: Test methods for electrical materials, interconnection structures and assemblies. Part 5: Test methods for printed board assemblies.
- [120] Norm IPC-9201A Sep. 2007: Surface Insulation Resistance Handbook.
- [121] Norm IPC-CC-830B Aug. 2002: Qualification and Performance of Electrical Insulating Compound for Printed Wiring Assemblies.
- [122] Norm IPC-HDBK-830 Okt. 2002: Guidelines for Design, Selection and Application of Conformal Coatings.
- [123] Norm ISO 16750 Apr. 2007: Road vehicles- Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment.
- [124] Norm JIS Z 3197 Jan. 1999: Testing methods for soldering fluxes.
- [125] Norm JIS Z 3284 Jan. 1994: Solder Paste.
- [126] Norm MIL-I-46058C Jul. 1972: Insulating Compound, Electrical (for Coating Printed Circuit Assemblies).
- [127] Pauls, D.; Collins, R.; Slach C.; Davore, N.: Process Qualification Using the IPC-B-52 Standard Test Assembly. In: Proceedings of IPC Printed Circuit Expo SMEMA Council APEX Designers Summit 2006, Anaheim, 2006, S40-02-1 - S40-02-39.
- [128] Pecht, M.: Criteria for the assessment of reliability models. In: IEEE Transactions on components, packaging and manufacturing technology, Vol. 20, No. 3, 1997, 229-234.
- [129] Pecht, M.; Hillman, C.; Rogers, K.: Conductive Filament Formation: A Potential Reliability Issue in Laminated Printed Circuit Cards with Hollow Fibers. In: IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, Vol. 22, No. 1; 1999, 80-84.
- [130] Pecht, M.; Zhou, Y.: Investigation on mechanism of creep corrosion of immersion silver finished printed circuit board by clay test. In: Proceedings of 55th Holm Conference on Electrical Contacts, Vancouver, 2009, 321-330.
- [131] Peck, D. S.: Comprehensive Model for humidity testing correlation. In: Proceedings of the 24th International Reliability Physics Symposium, Anaheim, 1986, 44-50.
- [132] Peel, M. C.; Finlayson, B. L.; McMahon, T. A.: Updated world map of Köppen-Geiger climate classification. In: Hydrology Earth System Science, Vol. 11, 2007, 1633-1644.

- [133] Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement- Strategien, Methoden, Techniken. 3. Auflage, Carl Hanser Verlag, München/Wien, 2001.
- [134] Pham, H.: Springer handbook of engineering statistics. Springer Verlag, London, 2006.
- [135] Ready. W. J.; Turbini L. J.: A comparison of hourly versus daily testing methods for evaluating the reliability of water soluble fluxes. In: IEEE Transactions on advanced Packaging, Vol. 23, No. 2, 2000, 285-292.
- [136] Ready. W. J., Turbini L. J; Nickel, R.; Fischer, J.: A novel test circuit for automatically detecting electrochemical migration and conductive anodic filament formation. In: Journal of Electronic Materials, Vol. 28, No.11, 1999, 1158-1163.
- [137] Reich, B.; Hakim, E. B.: Environmental Factors Governing Field Reliability of Plastic Transistors and Integrated Circuits. In: Proceedings of the 12th International Reliability Physics Symposium, Las Vegas, 1974, 82-87.
- [138] Repp, S.; Schweigart, H.: Oberflächenreinheit bei Bond- und Coating-Prozessen. JOT 11/2003, 35-38.
- [139] Riedel, E.: Anorganische Chemie. 6. Auflage, Walter de Gruyter GmbH & Co. KG, Berlin, 2004.
- [140] Roberge P. R.: Corrosion engineering: principles and practice. McGraw-Hill, New York, 2008.
- [141] Roberge P. R.: Handbook of corrosion engineering. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [142] Rogers, K. J.: An analytical and experimental investigation of filament formation in glass/epoxy composites. Dissertation, University of Maryland, 2005.
- [143] Rogers, K.; Hillman, C.; Pecht, M.: Conductive Filament Formation Failure in a Printed Circuit Board. In: Circuit World, Vol. 25, 1999, 6-8.
- [144] ROTRONIC Messgeräte GmbH: Produktinformation HygroLog NT1-D. Datei: http://www.rotronic.de/content/humidity_feuchte/network_products_with_logging.php?productid=65, Zugriff am 13.01 2010.
- [145] Sameh, S.A.; Salih, I. K.; Alwash, S. H.; Waisty, A.: Corrosion of Copper in Deaerated and Oxygenated 0.1M H₂SO₄ Solution under Controlled Conditions of Mass Transfer. In: Eng. & Tech. Journal, Vol. 27, No. 5, 2009, 993-1000.
- [146] Scherl, R.: Klimatische Anforderungen und Prüfungen im Automobilbereich für Elektronik, In Tagungsband: Schutzmaßnahmen zur Klimasicherheit

- elektronischer Baugruppen, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (Hrsg.), Regensburg, 2008, 209-235.
- [147] Schimpf, C.: Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2009.
- [148] Schimpf, C.; Feldmann, K.; Matzner, C.; Steinke, A.: Failure of electronic devices due to condensation. In: *Microsystem Technologies*, Volume 15, No 1, 2009, 123-127.
- [149] Schmidt, V. M.: *Elektrochemische Verfahrenstechnik: Grundlagen, Reaktionstechnik, Prozessoptimierung*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2003.
- [150] Schmitt S. L.: Einfluss von Betauung und Feuchteadsorption auf die Zuverlässigkeit elektronischer Baugruppen. Dissertation, Technische Universität München, 1999.
- [151] Schmitt-Thomas Kh. G.; Wege S.; Schweigart H.: Elektrochemische Migration- eine typische Korrosionserscheinung in der Mikroelektronik. In: *Materials and Corrosion*, Vol. 46, Issue 6, 2004, 366-369.
- [152] Schneider, K.; Girgsdies U.: Methoden zur Robustheitssteigerung von Elektronikkomponenten. In *Tagungsband: 13. Internationaler Kongress-Elektronik im Kraftfahrzeug*, Baden-Baden, 10.-11. Oktober 2007, 619-630.
- [153] Schueller, R.: Creep corrosion on lead-free printed circuit boards in high sulphur environments. In: *Proceedings of SMTA International Conference*, Orlando, 2007, 643-654.
- [154] Schweigart, H.; Guttman, M.: *Leitfaden für die Anwendung und Verarbeitung von Schutzlacken für elektronische Baugruppen*, 2. Auflage, GfKORR- Gesellschaft für Korrosionsschutz e.V. (Hrsg.), Frankfurt, 2007.
- [155] Schweigart, H.: Funktionssicherheit schutzlackierter elektronischer Baugruppen bei Feuchtklimabeanspruchung. Dissertation, Technische Universität München, 1997.
- [156] Schweigart, H.: Fehlerursachen klimatisch beanspruchter Elektronikschaltungen. In: *SMT Reinigung*, 4/2001, 18-20.
- [157] Sivertsen, B.: Global ambient air pollution concentrations and trend. In: *Air Quality Guidelines-Global Update 2005*. WHO: World Health Organisation (Hrsg.), Dänemark, 2005, 31-59.
- [158] Slade, P. G.: *Electrical contacts- Principles and applications*. Mercer Dekker Inc., New York/Basel, 1999.

- [159] Stephan, N.: Phänomenologische Untersuchungen zur Feuchteempfindlichkeit der elektrischen Eigenschaften von dünnen Polymerfilmen und deren Verwendung für neuartige Feuchtesensoren. Dissertation, Universität Potsdam, 2007.
- [160] Stiny, L.: Handbuch passiver elektronischer Bauelemente: Aufbau, Funktion, Eigenschaften, Dimensionierung und Anwendung. Franzis Verlag GmbH, Poing, 2007.
- [161] Suppa, M.: Schutzlackierungen für elektronische Baugruppen, In: Tagungsband: Schutzmaßnahmen zur Klimasicherheit elektronischer Baugruppen, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (Hrsg.), Regensburg, 2008, 57-81.
- [162] Takemoto T.; Latanision R. M.; Eagar T. E.; Matsunawa A.: Electrochemical migration tests of solder alloys in pure water. In: Corrosion Science, Vol. 39, No. 8, 1997, 1415-1430.
- [163] Tiederle, V.: Zuverlässigkeitsprognose von Bauelementen. Präsentiert am: 11. Europäisches Elektroniktechnologie-Kolleg. Colonia de Sant Jordi, 2008.
- [164] Turbini, L. J.; Jachim, J. A.; Freeman, G.B.; Lane, J.F.: Characterizing water soluble fluxes: Surface insulation resistance vs electrochemical migration. In: Proceedings of 13th IEEE/CHMT International Electronics Manufacturing Technology Symposium, Baltimore, 1992, 80-84.
- [165] Turbini, L. J.; Ready, W. J.: The effect of flux chemistry, applied voltage, conductor spacing, and temperature on Conductive Anodic Filament Formation. In: Journal of Electronic Materials, Vol. 31, No. 11, 2002, 1208-1224.
- [166] Turbini, L.; Ready, W. J.; Smith, B. A.: Conductive Anodic Filament (CAF) Formation: A potential reliability problem for fine line circuits. Presented at: Life Cycle Systems Engineering Workshop, Huntsville, 1997.
- [167] Viswanadham, P.; Singh, P.: Failure modes and mechanisms in electronic packages. 1. Auflage, Springer Netherlands, Dordrecht, 1997.
- [168] Vogl, G.: Umweltsimulation für Produkte- Zuverlässigkeit steigern, Qualität sichern. 1. Auflage, Vogl Buchverlag, Würzburg, 1999.
- [169] Walton, M.: The Deming Management Method. The Berkley Publishing Group, New York, 1986.
- [170] Wallentowitz, H.; Freialdenhoven, A.; Olschewski, I.: Strategien in der Automobilindustrie- Technologietrends und Marktentwicklungen. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2009.

- [171] Weather Underground: Historical Data, Datei: <http://www.wunderground.com/history/>, Zugriff am 29.01.2010.
- [172] Weigand, C.: Statistik mit und ohne Zufall- Eine anwendungsorientierte Einführung. Physica-Verlag, Heidelberg, 2006.
- [173] Wilker, H.: Weibull-Statistik in der Praxis. Band 3, Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2004.
- [174] Winter, R.; Fit for Application- Qualifikation von Automotive-Elektronikbauteilen. In: Qualität und Zuverlässigkeit, Jahrgang 53, Carl Hanser Verlag, München, 2008, 52-55.
- [175] Xu, C.; Franey, J.; Fleming, D.; Reents W.: Creep Corrosion on Lead-free PCBs. In: SMT- Surface Mount Technology- Tulsa, Vol. 23, No. 1, 2009, 18-20.
- [176] Yang S., Christou, A.: Failure Model for Silver Electrochemical Migration. In IEEE Transactions on device and materials reliability, Vol. 7, No. 1, 2007, 188-196.
- [177] Zahoransky, R. A.; Bollin, E.; Oehler, H.; Schelling, U.: Energietechnik. 3. Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag, Wiesbaden, 2007.
- [178] Zamanzadeh M.; Wynblatt P.; Warren G.: Electrochemical Migration of Copper in Adsorbed Moisture Layers. Journal of Corrosion Science and Engineering, Vol. 45, No. 8, 1989, 643-48.
- [179] Zhan, S.; Azarian, M.H.; Pecht, M.G.: Surface Insulation Resistance of Conformally Coated Printed Circuit Boards Processed With No-Clean Flux. In: IEEE Transactions on electronics packaging manufacturing, Vol. 29, No. 3, 2006, 217-223.
- [180] Zölzer, U.: Digitale Audiosignalverarbeitung. 3. Auflage, B.G. Teubner Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, 2005.