

Abschlussbericht

Förderprojekt „Reliability Design“ –

Teilprojekt: Folienkondensatoren

Berichtszeitraum: 01.04.2020 – 31.12.2023

Zuwendungsempfänger: ELECTRONICON Kondensatoren GmbH

Förderkennzeichen: 03EE1054E

Autor: Jan Knoch

Firma: ELECTRONICON Kondensatoren GmbH

Berichtszeitpunkt: Juni 2024

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Kontakt Daten der Verbundpartner			
Verbundpartner	Anschrift	Ansprechpartner	Abkürzung
SMA Solar Technology AG Koordinator	Sonnenallee 1 34266 Niestetal www.SMA.de	Dr. Oliver Führer Tel. +49 561 9522 4179 Oliver.Fuehrer@SMA.de Daniel Clemens Tel. +49 561 9522-423054 Daniel.Clemens@SMA.de	SMA
ELECTRONICON Kondensatoren GmbH	Keplerstrasse 2 07549 Gera www.electronicon.com	Jan Knoch Tel. +49 365 7346 492 J.Knoch@electronicon.com	EKG
MERZ Schaltgeräte GMBH + CO KG	Kernerstrasse 15 74405 Gaildorf www.schaltgeraete.merz-elektro.de	Dr. Gerald André Tel. +49 7971 252 480 gerald.andre@merz-elektro.de	MERZ
Fraunhofer IMWS Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen	Walter-Hülse-Straße 1 06120 Halle www.imws.fraunhofer.de	Bianca Böttge Tel. +49 345 5589 224 bianca.boettge@imws.fraunhofer.de	IMWS
Universität Stuttgart Prof. Bernd Bertsche	Pfaffenwaldring 9 70569 Stuttgart www.uni-stuttgart.de	Martin Dazer Tel. +49 711 685 66164 Martin.Dazer@ima.uni-stuttgart.de	IMA

1 Aufgabenstellung

Ziel des Teilprojektes „Folienkondensatoren“ war die Verbesserung der Lebensdauervorhersage, für diese wichtige Wechselrichterkomponente. Dazu sollten Standardfolienkondensatoren, wie sie im Solarbereich zum Einsatz kommen, unter verschiedenen Belastungen bis zum Ausfall gestresst werden. Die Hauptfragestellung war hierbei der Einfluss von Feuchtebelastungen und zyklischen Temperaturbelastungen, mit Fokus insbesondere auf AC-Filterkondensatoren, wie sie AC-ausgangsseitig in Solarwechselrichtern zum Einsatz kommen.

Im Zuge der Zusammenarbeit mit den anderen Partnern wollte ELECTRONICON sein vorhandenes Wissen zu Alterungs- und Ausfallmechanismen erweitern, sowie zusätzliche Kompetenzen erwerben in der Planung und Durchführung von Testverfahren zur beschleunigten Alterung von Folienkondensatoren und der Anwendung von Alterungsmodellen.

Letztlich sollte dies ermöglichen nachweisbar zutreffende Lebensdauervorhersagen zu machen und nachzuweisen. Dadurch können Risiken frühzeitig im Entwicklungsprozess oder bei Änderungen aufgedeckt und infolgedessen vermieden werden. Im Ergebnis sollten dadurch die Kondensatoren genauer an die Einsatzerfordernisse angepasst werden können und damit u. U. zu niedrigeren Kosten herstellbar sein.

2 Voraussetzungen des Vorhabens

Die ELECTRONICON Kondensatoren GmbH stellt seit den frühen vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts Kondensatoren in Gera her. Grundlage der Firmenphilosophie war schon immer der Anspruch höchste Qualität und Zuverlässigkeit liefern zu wollen. Von Beginn an ist ELECTRONICON in der Lage, ihre dielektrischen Materialien mit modernsten Technologien selbst zu metallisieren. Dementsprechend wird die komplette Wertschöpfungskette von der Metallisierung der Rohfolie bis zum fertigen Kondensator beherrscht, wobei die Entwicklung und Produktion vollständig in Deutschland erfolgen.

Nach der Ausgründung aus dem ehemaligen VEB ELEKTRONIK Gera, im Herbst 1992, ist es ELECTRONICON gelungen unter die führenden Kondensatorhersteller Europas aufzusteigen. Ca. 500 qualifizierte Ingenieure und Facharbeiter stellen heute Leistungskondensatoren für die Antriebstechnik, Leistungs-elektronik, sowie die Blindleistungskompensation her. Zusätzlich hat sich ELECTRONICON in den letzten Jahren zum führenden europäischen Hersteller von Kondensatoren für Hochspannungsgleichstrom-übertragungsanlagen entwickelt. Unter anderem aufgrund ihrer Größe und geforderten Lebensdauer stellen diese Kondensatoren besondere Ansprüche an Qualität und Zuverlässigkeit.

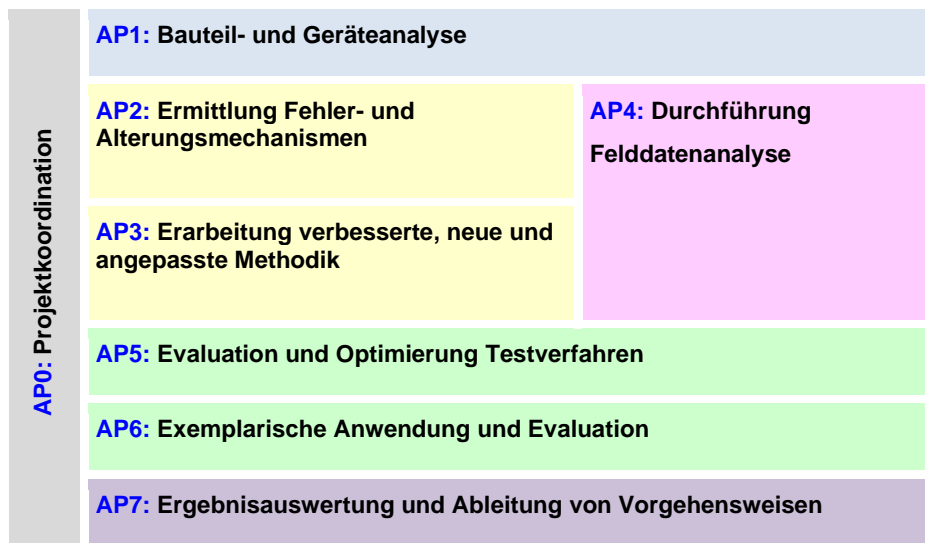
Der Begriff der Leistungskondensatoren beschreibt hierbei Kondensatoren mit DC-Spannungen im Bereich zwischen 600 und einigen tausend Volt oder AC-Spannungen ab 250 Vrms. Ihre Kapazitäten liegen im Bereich einiger Microfarad bis zu einigen Millifarad und die Baugrößen zwischen einigen hundert Gramm und einigen hundert Kilogramm. Diese sind zwingend zu unterscheiden von Folienkondensatoren wie sie auf insbesondere Leiterplatten eingesetzt werden und werden auch entsprechend in den geltenden Normen abgegrenzt.

ELECTRONICON nutzt für seine Leistungskondensatoren metallisierte Kunststofffolien auf Basis von biaxial verstrecktem Polypropylen (BOPP). Daher wird hier auch die Bezeichnung „Kondensatoren in MKP-Technologie“ verwendet. Diese Technologie bietet den besten Eigenschaftsmix für den Spannungs-, Strom- und Kapazitätsbereich der Leistungskondensaten, welchen ELECTRONICON bedient.

3 Planung und Ablauf

3.1 Arbeitspakete

Die Projektstruktur ist in der folgenden Darstellung vereinfacht abgebildet.



Vereinfachte Darstellung der Projektstruktur / Arbeitsplanübersicht

Der Fokus wurde bereits in der Planung des Projekts insbesondere auf AC-Filterkondensatoren gelegt, wie sie AC-ausgangsseitig in Solarwechselrichtern zum Einsatz kommen. Weshalb insbesondere diese bei den folgenden Arbeitspakete betrachtet wurden.

Die Arbeitspakete (AP) und ihre Inhalte schlüsseln sich dann wie folgt auf, wobei nur die AP gelistet bei denen ELECTRONICON wesentliche eigene Beiträge erbracht hat.

AP1: Bauteil- und Geräteanalyse

In diesem Rahmen hat ELECTRONICON zusammen mit dem Partner IMA die Systemarchitektur der Kondensatoren analysiert. Zusätzlich wurden die üblichen Einsatz- und Designgrenzen der typischen Kondensatorparameter bzw. der auftretenden Belastungen erfasst. Auf dieser Basis und den Erkenntnissen im Zuge des AP 2.1 hat der Partner IMA dann Vorschläge für DOEs (Design-of-Experiment) erarbeitet und die durchzuführenden Versuchsreihen definiert. Diese wurden gemeinsam auf Machbarkeit bewertet und in mehreren Versuchsplänen finalisiert, welche als Input für die Tätigkeiten im Zuge des AP 2.3 dienen.

AP2: Ermittlung Fehler- und Alterungsmechanismen

AP2.1: Fehler- & Alterungsmechanismen der kritischen Bauteile

In diesem Rahmen hat ELECTRONICON grundlegendes Wissen zu Kondensatoren, ihrem Aufbau und den bekannten Alterungsmechanismen mit den anderen Partnern geteilt. Dies diente als notwendiger Input für die Literaturrecherchen des IMWS und dessen Analysen von geschädigten Kondensatoren, welche durch diesen Partner im Projektverlauf durchgeführt wurden. Zusätzlich war es notwendig für die Gewichtung der möglichen Ausfallmechanismen in Zusammenarbeit mit dem IMA und die Erarbeitung der DOEs durch das IMA.

AP2.2: Untersuchungen an geschädigten Bauteilen & Wechselrichtern

ELECTRONICON hat in diesem Rahmen im Wesentlichen mit dem IMWS zusammengearbeitet. Zu Anfang des Projekts wurde mit dem IMWS ein Analyseablauf für die Untersuchung von Kondensatoren erarbeitet. Dafür hat ELECTRONICON Wissen weitergegeben zu bekannten Methoden, üblichen Vorgehensweisen, Risiken und Sicherheitsmaßnahmen. Im weiteren Projektverlauf wurden die Kondensatoranalysen dann im Wesentlichen vom IMWS durchgeführt. ELECTRONICON hat dann die Ergebnisse mit dem Partner bewertet und diese insbesondere für seine Arbeiten im Zuge des AP 2.3 verwendet. In Einzelfällen wurden Kondensatoren durch ELECTRONICON selbst geöffnet und untersucht.

AP2.3: Experimentelle Untersuchungen Folienkondensatoren

In diesem Arbeitspunkt wurden die Hauptarbeiten des Projekts geleistet. Dieser umfasst die Definition und Herstellung der notwendigen Kondensatorbauformen, entsprechend den in AP1 erarbeiteten DOEs, gefolgt von der Durchführung der in den DOEs definierten Belastungstests. Im Rahmen dieser Belastungstests wurden die Kondensatoren regelmäßig für Zwischenmessungen aus den Prüfkammern entnommen und die Werte der Kapazität und des Verlustfaktors (Tan) bestimmt. Auf dieser Basis konnte die Degradation dieser Parameter bewertet werden. Die zugehörigen Daten wurden zur Modellbildung an das IMA weitergegeben. Die entwickelten Modelle wurden dann gemeinsam diskutiert.

Neben der parametrischen Degradation wurden auch die Ausfallzeiten der Kondensatoren erfasst, wobei Ausfall in diesem Fall „funktionelles Versagen aufgrund von Selbstheilungsversagen“ bedeutet. Zur sicheren Klassifikation dieses Ausfallmodus wurden auch Untersuchungsergebnisse des IMWS herangezogen. Auf Basis der Ausfallzeiten der Kondensatoren wurden dann die Ausfallverteilungen der jeweiligen Versuchsgruppen bestimmt und deren Kennzahlen dann in der Modellbildung für das Alterungsmodell verwendet. Bei diesen Arbeiten wurde immer wieder auf die Erfahrung des IMA mit dieser Materie zurückgegriffen, auch um daraus neue Erkenntnisse für AP3 ableiten zu können und an Methodenkompetenz zu gewinnen.

Die durchgeführten Testreihen fokussierten sich im Wesentlichen auf AC-Kondensatoren unter Temperatur- und Spannungslasten und auf die Effekte durch Feuchtebelastungen, da diese im Rahmen der Vorarbeiten in AP1 und AP2.1 als die kritischen Faktoren identifiziert wurden. Zusätzlich konnte der Versuchsraum vereinfacht werden aufgrund der Ergebnisse aus den Vorversuchen an AC-Kondensatoren unter Feuchtebelastungen. Eine Untersuchung von Effekten zyklischer Temperaturwechsellasten erfolgte nicht, da die Verzögerungen beim Projektanlauf es erforderlich machten den Projektumfang zu vereinfachen. In

diesem Zuge wurden die davor erstellten Versuchspläne noch einmal überarbeitet und auf Basis der Erkenntnisse in AP1 und AP2.1 entschieden Test zu Temperaturwechsellasten zu streichen, da diese als am wenigsten relevant für das Alterungs- und Ausfallverhalten von MKP-Kondensatoren erschienen. Zusätzlich erschien es am Schwierigsten für diesen Stressor allgemeingültige Aussagen zu gewinnen, denn diese Belastungsform kann sich abhängig von der Bauform (Größen, Gehäuse, Materialien, ...) extrem unterschiedlich auswirken, weshalb der zu betreibende Aufwand für eine verwendbare Modellbildung besonders groß ist.

AP3: Erarbeitung verbesserte, neue und angepasste Methodik

AP3.1: Messverfahren für die Bauteil-Parameterbestimmung

Auf Basis der Arbeiten an AP2.3.1 Vorversuche – Dünne Folien ergaben sich hier Erkenntnisse zum Einfluss von parasitären Leckströmen.

AP3.3: Methodik zur Bauteil-Lebensdauervorhersage

ELECTRONICON hat in diesem Zuge zusätzliche Methoden entwickelt um auch dann Zuverlässigkeitsaussagen zu generieren, wenn Versuchsgruppen keine funktionellen Ausfälle aufweisen. Außerdem wurde mit den anderen Partnern z.B. bei der Simulation des Feuchtetransports im Kondensatoren zusammengearbeitet.

AP4: Durchführung Felddatenanalyse

AP4.3: Analyse von Ausfalldaten und Fehleranalysen

ELECTRONICON hat im Rahmen dieses Unterpunktes AC- und DC-Kondensatoren gemessen und untersucht, welche bis zu 11 Jahre im Feldeinsatz waren. Einzelne dieser Kondensatoren wurden an das IMWS übergeben zur weiteren Untersuchung.

AP5: Evaluation und Optimierung Testverfahren

AP5.2: Bauteil-Testverfahren

In diesem Arbeitspunkt wurde zusammen mit den Partnern bewertet ob und in wie weit die existierenden Bauteiltestverfahren für Kondensatoren angepasst werden sollten, bzw. welche Aussagekraft sie haben könnten.

AP7: Ergebnisauswertung und Ableitung von Vorgehensweisen

In diesem Arbeitspunkt wurde die Ableitung strategischer Vorgehensweisen bzw. Anpassungen der Designregeln zusammengefasst.

AP0: Projektkoordination

In diesem Arbeitspaket sind alle Aktivitäten des Projektmanagements zusammengefasst

4 Wissenschaftlich-technischer Stand

Entsprechend der langen Produktionserfahrung gab es auf Seiten ELECTRONICONS bereits ein erhebliches Vorwissen zu verschiedenen Ausfallrisiken und Fehlermechanismen. Dieses basiert unter anderem auf eigenen Untersuchungen und Versuchen und der gemachten Felderfahrung. Daneben gibt es diverse Veröffentlichungen mit Bezug zur Zuverlässigkeit und Alterung von Kondensatoren. Die wichtigsten und systematischsten dieser Veröffentlichungen stammen allerdings aus den 1970er und 1980er Jahren (Heywangⁱ, Taylorⁱⁱ and Cyganⁱⁱⁱ). Viele der damaligen Herstellverfahren und Materialien werden so heute nicht mehr verwendet. Zum Beispiel wurde Kondensatorpapier durch das biaxialverstrecktes Polypropylen (BOPP) als Standardmaterial für Folienkondensatoren abgelöst. Dementsprechend haben sich seitdem auch die Designregeln verändert wie z.B. die Auslegungsfeldstärke, welche deutlich gestiegen ist. Zusätzlich sind die Größe der Kondensatoren und die in sie eingehenden Folienflächen im letzten Jahrzehnt stark angewachsen. Infolgedessen muss davon ausgegangen werden, dass die alten Ergebnisse nicht zu Einhundert Prozent auf die aktuellen Bedingungen übertragbar sind.

Zusätzlich war die wissenschaftliche Begleitung dieser Entwicklung in den letzten drei Jahrzehnten eher wenig systematisch. Insbesondere fehlte der Fokus auf die Zuverlässigkeit und Alterung von Kondensatoren. Der Großteil der diesbezüglichen Weiterentwicklung erfolgte hinter den Werkstoren der Industrie, zumal jeder Hersteller davon ausgehen sollte, dass die eigenen Design- und Herstellphilosophien einen deutlichen Einfluss auf die Zuverlässigkeit und das Alterungsverhalten der Produkte haben.

Der Hauptfokus der Normen für Leistungskondensatoren (z.B. IEC 61071, IEC 61881 oder DIN EN 61049) liegt auf der Zuverlässigkeit und Alterung unter Temperatur- und Spannungsbelastungen. Dementsprechend fokussiert sich der gesamte Industriebereich der Leistungskondensatoren in seiner Zuverlässigkeitsauslegung hauptsächlich auf diese beiden Belastungsformen. Feuchte- oder zyklischer Temperaturbelastungen werden dagegen eher nicht betrachtet im Rahmen der Zuverlässigkeitsauslegung auf Basis von Alterungsmodellen, auch weil es für Leistungskondensatoren keine verifizierten Alterungsmodelle für diese beiden Alterungseinflüsse gibt. Genauso gibt es für diese Klasse von Kondensatoren keine Norm welche Anforderungen an die Dauerfestigkeit unter Feuchte- oder zyklischer Temperaturbelastungen stellt bzw. Nachweisprüfungen festlegt.

Aufgrund eigener Versuche und Felderfahrung ist sich die ELECTRONICON allerdings mehr als bewusst, dass eine hohe Umgebungsfeuchte ein Problem für Kondensatoren darstellen kann. In den hauseigenen Designrichtlinien und Klimaklassenvorgaben wird das entsprechend berücksichtigt. Allerdings existiert kein Modell zur Prognose der Alterung oder der Dauerfestigkeit unter Feuchtebelastungen.

Für eine zyklische Temperaturbelastung gibt es noch weniger Vorwissen auch weil Folienkondensatoren im Allgemeinen sehr träge auf eine Änderung der Umgebungstemperatur reagieren, da Polypropylen ein schlechter Wärmeleiter ist. Dies ist einerseits von Vorteil, da dies Temperaturänderung verlangsamt und damit den Stress auf die Materialien verringert. Andererseits kann es unter Umständen zu hohen Belastungen an den Grenzflächen zwischen dem langsam reagierenden Kondensatorwickel und den Metallen der internen Verschaltung führen, da die letzteren einer schnellen Temperaturänderung folgen können. Dementsprechend kann der Einfluss von zyklischen Temperaturbelastungen sehr komplex sein, denn Rampengeschwindigkeiten, Haltezeiten, die Höhe der Temperaturhüben, die maximale Temperatur und Arbeitsspielen können zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen führen. Dementsprechend gibt es hier, bis auf vereinzelte Versuche, keine systematischen Voruntersuchungen zu der Sensibilität von Leistungskondensatoren auf diese Belastungsform

Die systematische und vollständige Parametrisierung der entsprechenden Alterungsmodelle stellt für jeden Hersteller eine Mammutaufgabe dar, insbesondere wenn die mögliche Vielfalt der Designparameter wie Foliendicke, Baugrößen, interne Aufbauvarianten, Gehäuseformen und Materialvielfalt mit abgedeckt werden soll. Dementsprechend ist es zwingend notwendig sich auf einen Ausschnitt der möglichen Vielfalt zu fokussieren und diese zu vereinfachen wo machbar.

5 Zusammenarbeit der Partner

Im Rahmen des Projektes wurde intensiv mit den Verbundpartnern zusammengearbeitet. Jeder Partner hat sich einerseits mit einem speziellen Kompetenzschwerpunkt eingebracht und andererseits eine klare komplementäre Arbeitsaufgabe wahrgenommen:

- Neben der Verbundkoordination hat SMA vor allem ihre solar- und wechselrichtertechnische Expertise ins Konsortium eingebracht und die Untersuchungen zum Gesamt-Wechselrichtergerät übernommen.
- Aufgabe und Rolle von ELECTRONICON im Konsortium war vor allem die Aufklärung und Beschreibung der Alterungsvorgänge in Folienkondensatoren.
- MERZ Schaltgeräte hat sich im Konsortium vor allem den elektromechanischen Schaltern gewidmet und die entsprechenden Fehlermechanismen und Alterungsvorgänge wissenschaftlich aufgearbeitet und beschrieben.
- Das Fraunhofer IMWS hat sich mit der vertieften physikalischen und chemischen Analyse und Modellierung der Defektursachen und Zuverlässigkeitsrisiken sowie der Weiterentwicklung der dafür benötigten Verfahren insbesondere für die Komponenten Gesamtgerät, Kondensatoren, Drosseln und Schaltgeräte beschäftigt.
- Aufgabe und Rolle der Uni Stuttgart waren vor allem die Grundlagen zur Zuverlässigkeits- und Testdesign-Methodik und die Übertragung der Erfahrungen und Vorgehensweisen aus anderen Branchen und Fachdisziplinen.

Es wurden im Teilvorhaben keine Unterbeauftragungen an Dritte vergeben

ELECTRONICON hat im Rahmen seiner Arbeitspakete besonders eng mit den Partnern vom IMA und dem IMWS interagiert. Mit dem IMA wurden als wesentliche Arbeiten die Systemanalyse, die Betrachtung der Fehlermoden und Ausfallmechanismen sowie die Erarbeitung der Versuchspläne vorgenommen. Zusätzlich wurde die Analyse des Degradationsverhaltens, der Ausfallverteilungen und der Modellbildung für die Alterung in wechselseitiger Abstimmung durchgeführt, wobei ELECTRONICON methodisch viel Partnern lernen konnte. Mit dem IMWS wurde ebenfalls eng zusammengearbeitet im Rahmen der Analyse der Kondensatoren. Die Erkenntnisse wurden gemeinsam bewertet und daraus Schlussfolgerungen gezogen.

An die SMA. Als Konsortialführer und Endnutzer der Komponenten, wurden insbesondere die Ergebnisse und die Zwischenstände der Diskussionen und des Erkenntnisprozesses kommuniziert. Gleichzeitig gab es eine Synergie durch die Untersuchungen der SMA an ihren Wickelgütern (Drosseln). Hier ab es teilweise ähnliche Beobachtungen.

Allgemein gab es auf allen Projektmeetings immer einen sehr regen und offenen Austausch, der sehr hilfreich war für den Erkenntnisprozess und die Erarbeitung der Ergebnisse.

6 Erzielte Ergebnisse

6.1 AP1 Analyse der Systemarchitektur

Die stark vereinfachte Systemarchitektur eines durchschnittlichen Folienkondensators wird in Abbildung 1 schematisch dargestellt. Die wichtigsten über die Lebensdauer abzusichernden Funktionen sind u. A. die Kapazität, die Spannungsfestigkeit. Daneben gibt es noch einige weitere Funktionen welche aus diversen

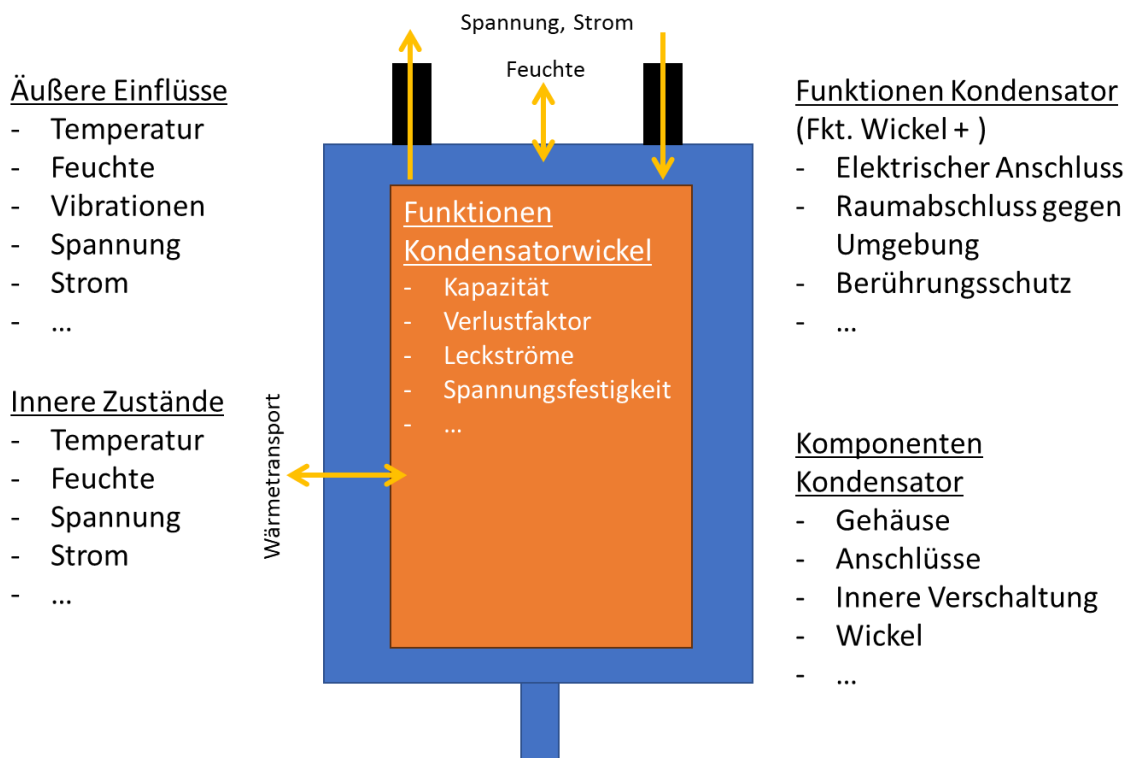


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Systemarchitektur

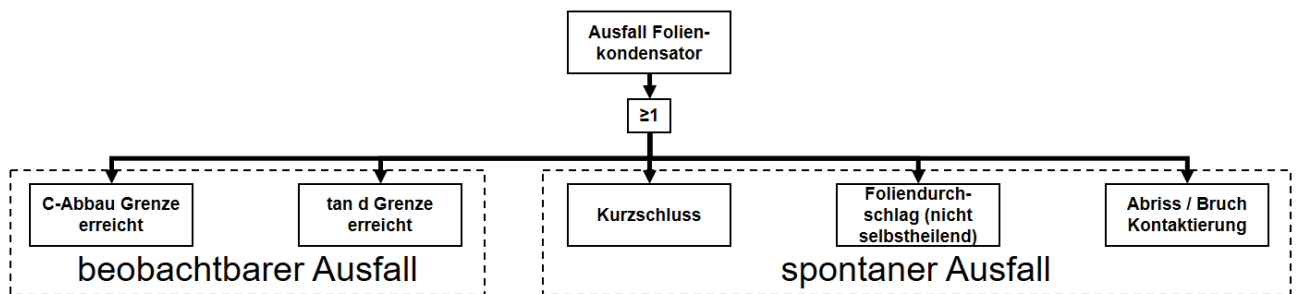


Abbildung 2: Fehlerbaumanalyse - Ausschnitt der wesentlichen Fehlermechanismen eines Folienkondensators.

Gründen abgesichert sein müssen. So zum Beispiel der Berührungsschutz, welche je nach Anwendungserfordernissen eine wichtige Anforderung der Betriebssicherheit darstellen kann.

Zur Bereitstellung und Absicherung dieser Funktionen hat jeder Kondensator diverse Komponenten, welche diesem Zweck dienen. Zum Beispiel ist der Kondensatorwickel das kapazitätstragende Element, welches zudem so designt sein muss, dass es über die gesamte Kondensatorlebensdauer sowohl die geforderte Kapazität bereitstellt als auch sicher unter den anliegenden Betriebsspannungen funktioniert. Dagegen ist das Gehäuse die Komponente welche u.a. den Raumabschluss gegen die Umgebung absichert. Die Anschlüsse stellen dagegen das Mittel dar mit welchem der Kondensator elektrisch in das Applikationssystem, z.B. einen Solarwechselrichter, eingebunden wird. Selbst der Bodenbolzen eines zylindrischen Kondensators, welcher in Abbildung 1 nicht gelistet ist, sichert eine Funktion ab. Er dient der mechanischen Befestigung des Kondensators und in manchen Systemen auch der elektrischen Erdung.

Dementsprechend haben alle diese Komponenten gewisse Anforderungen an ihre Funktion zu erfüllen, die je nach Applikationsanforderungen vordefiniert sind. Die Sicherheit dieser Funktionen muss über die gesamte Lebensdauer gewährleistet sein.

6.2 AP2.1 Fehler- & Alterungsmechanismen von Folienkondensatoren

Zusammen mit dem IMA wurden die bekannten sowie die theoretisch möglichen Fehlerarten eines Folienkondensators erfasst und mittels der Fehlerbaumanalyse bis auf die möglichen Treiber des Ausfalls heruntergebrochen. In diesem Rahmen sind Abbildung 2 und Abbildung 3 entstanden. Die Erstere zeigt einen Ausschnitt der obersten Ebene der Fehlerbaumanalyse in dem die wesentlichen Ausfallarten erfasst wurden. Jeder dieser Ausfallarten wurden dann Ausfall- bzw. Alterungsmechanismen zugeordnet und für diese die denkbaren Einflussparameter gelistet, was beispielhaft in Abbildung 3 für die Ausfallart „C-Abbau Grenze erreicht“ dargestellt ist. Auf Basis dieser Systematisierung wurde dann gewichtet und entschieden welche Ausfallarten untersucht werden sollen und welche Einflussparameter in diesem Rahmen zu variieren sind. Im nächsten Schritt wurden die für die Versuchsdurchführung interessanten Bereiche dieser Parameter eingegrenzt. Auf dieser Basis wurde ein erster Versuchsplan erstellt und auf Machbarkeit geprüft, da die existierende Bauteilauswahl und die vorhandenen technischen Möglichkeiten beachtet werden mussten. Am Ende dieses Prozesses stand ein vorläufiger Versuchsplan mit verschiedenen Vorversuchsreihen und einem

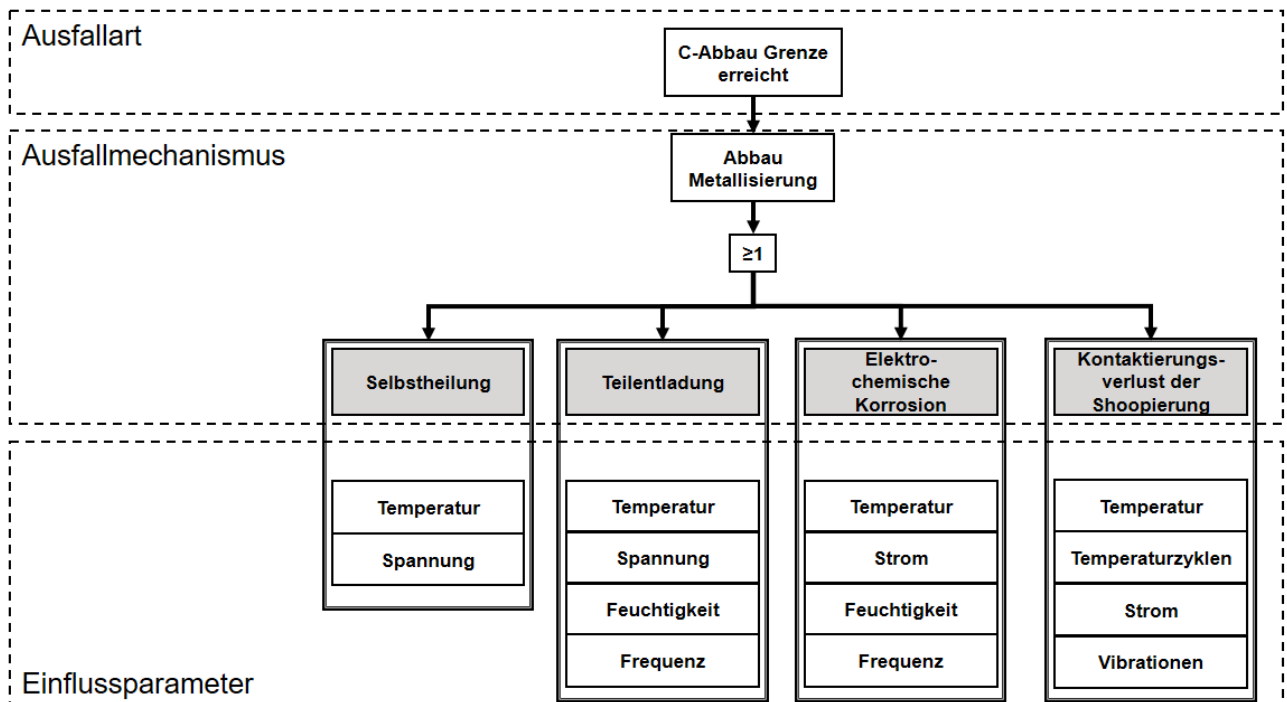


Abbildung 3: Fehlerbaumanalyse - Verknüpfung der Ausfallart mit den möglichen Treibern des Ausfallmechanismus

Plan für die Hauptversuchsreihen welcher nach DOE-Methodik erstellt wurde. Dieser Plan wurde im Laufe des Projekts noch einmal überarbeitet und vereinfacht aufgrund neuer Erkenntnisse und veränderter Rahmenbedingungen.

Die durchgeführten Versuchsgruppen und ihre Ziele lassen sich wie folgt klassifizieren

1) Vorversuche – Dünne Folien

Hier war das Hauptziel die Belastungsgrenze zu finden, wobei dünne Folien eine besonders empfindliche Ecke des Designraums darstellen. In diesen Versuchsgruppen wurde insbesondere mit Temperaturen an und über der bekannten Belastungsgrenze für BOPP gearbeitet und diese mit hohen Spannungsüberlasten kombiniert.

2) Vorversuche – DC-Kondensatoren unter Feuchtebelastungen

Mit dieser Gruppe von Versuchen wurde die Feuchteempfindlichkeit von diffusionsoffenen DC-Kondensatoren untersucht, wie sie als DC-Linkkondensatoren in Solarwechselrichtern werden. Auch hier sollte die Belastungsgrenze zum Überlastfall gefunden werden. Dementsprechend wurde mit hohen Temperaturen und Spannungsüberlasten gearbeitet und die Feuchtwerte variiert.

3) Vorversuche – AC-Kondensatoren unter Feuchtebelastungen

In diesem Versuch wurde getestet ob und wie empfindlich AC-Kondensatoren mit hermetisch dichten Bauformen auf hohe äußere Feuchtelasten reagieren.

4) Vorversuche – AC-Kondensatoren bei unterschiedlichen Temperaturen

In dieser Versuchsreihe im Perlenkettendesign wurden hermetisch dichte AC-Kondensatoren unter hohen Spannungsüberlasten bei verschiedenen Temperaturen betrieben. Die Temperaturen variierten zwischen der oberen und der unteren Einsatzgrenze. Damit sollte die Temperaturabhängigkeit der Degradation und der Ausfallzeiten untersucht werden. Die entsprechenden Daten stellten die Basis dar für die Erarbeitung einer verallgemeinerten Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Degradation auf Seiten des IMA im Rahmen des AP3. Auf Basis der Ausfallzeiten wurde eine Aktivierungsenergie für das entsprechenden Alterungsgesetzes bestimmt.

5) Hauptversuche – DOE für AC-Kondensatoren

In diesem Rahmen wurden insgesamt 17 Versuchsgruppen entsprechend dem in AP1 und AP2.3 erarbeiteten DOE gefahren. Die variierten Belastungsparameter waren die Temperatur und das Spannungsniveau. Daneben wurde noch die Foliendicke variiert, da der DOE relativ einfach gehalten werden musste, aufgrund der erwarteten Versuchsdauer der einzelnen Gruppen und der Verzögerungen im Projektanlauf. Es ist wichtig anzumerken, dass die Variation des Spannungsniveaus gleichbedeutend ist mit einer Variation des Überspannungsfaktor oder der Elektrische Feldstärke, wobei bei der Letzteren die Foliendicke berücksichtigt ist.

Als weiterer Punkt wurden in diesem Arbeitspaket die konkreten Ausfallkriterien für die verschiedenen Ausfallarten festgelegt. Die spontanen Ausfälle wie das Versagen der Selbstheilung waren hier durch ihr Auftreten charakterisiert, da sie funktioneller Art waren. Es ist dabei klar, dass sie gegebenenfalls durch eine Forensik an den Kondensatoren zu klären sind. Im Gegensatz dazu mussten End-of-Life-Kriterien (EOL) definiert werden für die parametrischen Ausfallarten. Für den C-Abbau wurde die Grenze auf -10% relativ zum Startwert des Kondensators festgelegt. Für den Tan-Anstieg wurde keine Grenze im Voraus festgelegt, da es an verlässlichen Daten und Kriterien fehlt um diesen sauber zu definieren.

6.3 AP2.2: Untersuchungen an geschädigten Folienkondensatoren

ELECTRONICON hat in diesem Rahmen eng mit dem IMWS zusammengearbeitet. Zu Anfang des Projekts wurde mit dem IMWS ein Analyseablauf für die Untersuchung von Kondensatoren erarbeitet. Dafür hat ELECTRONICON Wissen weitergegeben zu bekannten Methoden, üblichen Vorgehensweisen, Risiken und Sicherheitsmaßnahmen. Im weiteren Projektverlauf wurden die Kondensatoranalysen dann im Wesentlichen vom IMWS durchgeführt.

Die detailliertere Dokumentation der betreffenden Untersuchungen findet sich im Abschlussbericht des IMWS. Hier sollen nur die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst werden.

1) Feuchteinfluss auf diffusionsoffene DC-Linkkondensatoren:

Hier wurden Kondensatoren aus der Vorversuchsreihe 2 „DC-Kondensatoren unter Feuchtebelastungen“ (siehe auch AP2.3 Abschnitt 6.4.2) verglichen mit solchen die mehrere Jahre im Feld standen (siehe Abschnitt 6.7). Es wurde festgestellt, dass die Labortests die Kondensatoren deutlich überstressen im

Vergleich zu den sichtbaren Alterungszuständen von Feldteilen. Dies wird unter AP5.2 (siehe Abschnitt 6.8) als Input für die Bewertung von Feuchtetests berücksichtigt.

Die Kombination hoher Temperaturen mit hohen Feuchten in diesen Labortests, z.B. 85°C bei 85RH% kombiniert mit Nennspannung oder 90°C bei $\geq 70\text{RH}\%$ und Überspannungen bewirken ein Zersetzen des in diesen Bauformen üblicherweise verwendeten Polyurethanverguss (PU). Zusätzlich greifen die Zersetzungsprodukte die Schoopierung der Kondensatorwickel an und schwächen diese. Hierbei beschleunigt die Temperatur die Feuchtediffusion ins Material und die Reaktionskinetik, während die Feuchtigkeit an den chemischen Reaktionen beteiligt ist.

2) Eindeutig definierte Ausfallmoden für alle Versuchsreihen

Im Rahmen der Versuchsreihen gab es immer wieder Kondensatoren, deren Ausfallklassifizierung schwierig war. Zum Beispiel gab es Kondensatoren, welche durch einen plötzlichen, starken C-Abbau auffielen, in ihren Verlustfaktoren unauffällig waren und keine Anzeichen von einem Versagen der Selbstheilung und Pyrolyse zeigten. In diesen Fällen war es wichtig zu klären ob diese Kondensatoren parametrisch ausgefallen waren indem sie das EOL-Kriterium von -10% Kapazitätsabbau erreicht hatten oder sie funktionell versagt hatten zum Beispiel durch Pyrolyse. In diesen Fällen haben die Untersuchungen am IMWS geholfen eine eindeutige Klassifizierung zu finden.



Abbildung 4: Röntgenbild eines Kondensators mit starkem C-Abbau, Aufnahme des unteren Kondensatorbereichs

Als Beispiel kann hier die Untersuchung von Kondensatoren mit starkem C-Abbau dienen. In den bisherigen, industrieüblichen Verfahren wären die Kondensatoren zerstörend geöffnet worden, wie auch die Wickel entweder zersägt oder händisch abgewickelt worden wären. Am IMWS wurden die Kondensatoren nichtzerstörend mittels Röntgen untersucht.

Auf den entsprechenden Aufnahmen (siehe Abbildung 4) kann man gut erkennen wie die Stirnfläche des Kondensatorwickel verformt ist, was auf eine große Hitzeeinwirkung schließen lässt. Daneben sieht man gestörte Bereiche im Kondensatorwickel selbst. Diese weisen auf einen lokalen Masseverlust durch Pyrolyse hin. Ähnliche Störungen im Wickel hat man auch bei anderen Kondensatoren sehen können, ohne dass die Stirnfläche der Kondensatorwickel sichtbar deformiert war. Daher wurde alle Kondensatoren mit diesen

erkennbaren Störungen im Wickel als Ausfall durch Versagen der Selbstheilung klassifiziert. Zusätzlich gab es eine starke Korrelation mit dem beobachteten C-Abbauverhalten, da solche Bilder bei allen untersuchten Kondensatoren mit einem plötzlichen starken C-Abbau gefunden wurden. Daher war es möglich dieses C-Abbauverhalten als wahrscheinliches Anzeichen für eine auftretende starke Schädigung im Wickelinneren durch Pyrolyse zu identifizieren. Dementsprechend stellt dies eine wichtige methodische Weiterentwicklung dar, welche in AP5.2 (siehe Abschnitt 6.8) aufgenommen wurde.

6.4 AP2.3: Experimentelle Untersuchungen Folienkondensatoren

Dieses Kapitel ist untergliedert entsprechend den einzelnen Versuchsreihen, wie unter AP2.1 beschrieben.

6.4.1 Vorversuche 1 – Dünne Folien

Hier war das Hauptziel die Belastungsgrenze zu finden, wobei dünne Folien mit 3 µm Nenndicke eine besonders empfindliche Ecke des Designraums darstellen. In diesen Versuchsgruppen zu je 50 Kondensatoren wurde mit Temperaturen an der bekannten Belastungsgrenze für BOPP gearbeitet und ausprobiert wie hoch die maximal machbaren Spannungsüberlasten sein könnten.

Hierzu wurde zum einen drei Testgruppen bei der üblichen Testtemperatur von 85°C gestartet, wobei die anfänglich anvisierten Überspannungsfaktoren viel zu hoch waren, da es beim Überschreiten einer kritischen Grenze in allen drei Gruppen sofort zu ersten Ausfällen kam. Daraufhin wurden die Überspannungen auf ein

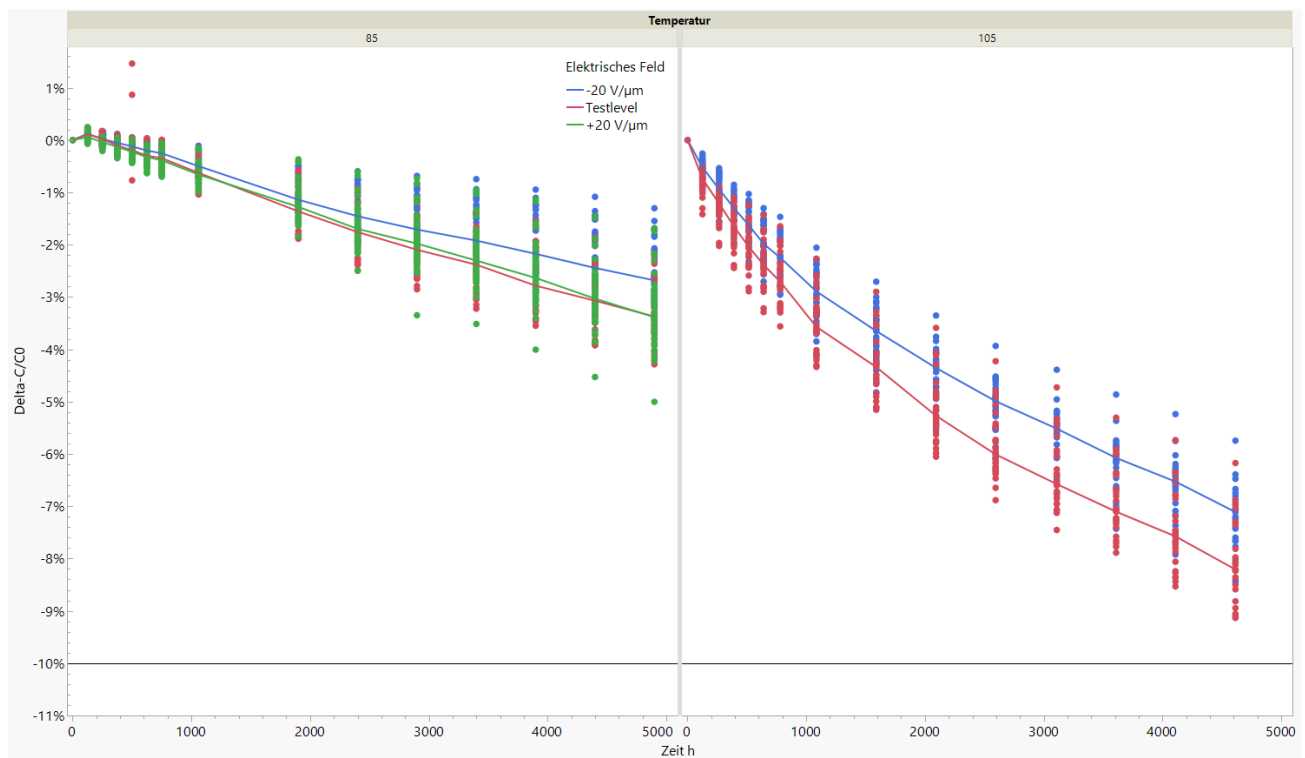


Abbildung 5: Kapazitätsdegradation von DC-Kondensatoren mit dünnen Filmen unter unterschiedlichen Temperaturbelastungen und hohen Spannungsüberlasten

verträgliches Maß reduziert. Danach kam es noch zu sehr wenigen Ausfällen, von wahrscheinlich überstressten Teilen, innerhalb der ersten ca. 200 h (vergleiche auch Abbildung 7).

Zum anderen wurden zwei Gruppen bei 105°C gestartet, mit Überspannungen wie bei den beiden unteren Testlevel der 85°C-Gruppen. Diese Gruppen zeigten keine sofortigen Ausfälle beim Überschreiten eines bestimmten Spannungslevels. Dennoch stellt diese Lastkombination den Überlastfall für die Kondensatoren dar, wie im Weiteren ausgeführt werden wird.

Die Degradation der Kapazität der entsprechenden Testgruppen ist in Abbildung 5 dargestellt. Man sieht deutlich, dass die Änderung der Temperatur von 85°C auf 105°C einen massiven Anstieg der Abbaurrate bewirkt, während die Erhöhung der elektrischen Belastung um 20 V/µm einen wesentlich geringeren Effekt hat. Ähnlich verhält es sich mit der Degradation der Verlustfaktoren (siehe Abbildung 6). Hier liegen die verschiedenen Spannungsgruppen übereinander, während die Erhöhung der Temperatur einen massiven Anstieg der Degradation bewirkt.

Die Ausfallraten (siehe Abbildung 7) waren ebenfalls sehr unterschiedlich zwischen den beiden Temperaturbelastungsgruppen. Die 85°C-Gruppen zeigen die anfänglichen zwei bis drei Ausfälle, aufgrund der ursprünglich zu hoch gewählten Zielbelastungen. Nach diesen folgten die nächsten Ausfälle erst nach sehr großen Zeiten, wobei die Sortierung prinzipiell zur Sortierung der Belastungsstufen passt. Bei der niedrigsten Belastungsstufe sind gar keine weiteren Ausfälle innerhalb der Testzeit zu beobachten, während bei der mittleren Belastungsstufe die nächsten Ausfälle bei ca. 4000 h Prüfzeit auftreten und dies bei der höchsten Belastungsstufe bereits bei 2000 h Prüfzeit der Fall war. Die Testgruppen wurden allerdings nach ca. 5000 h

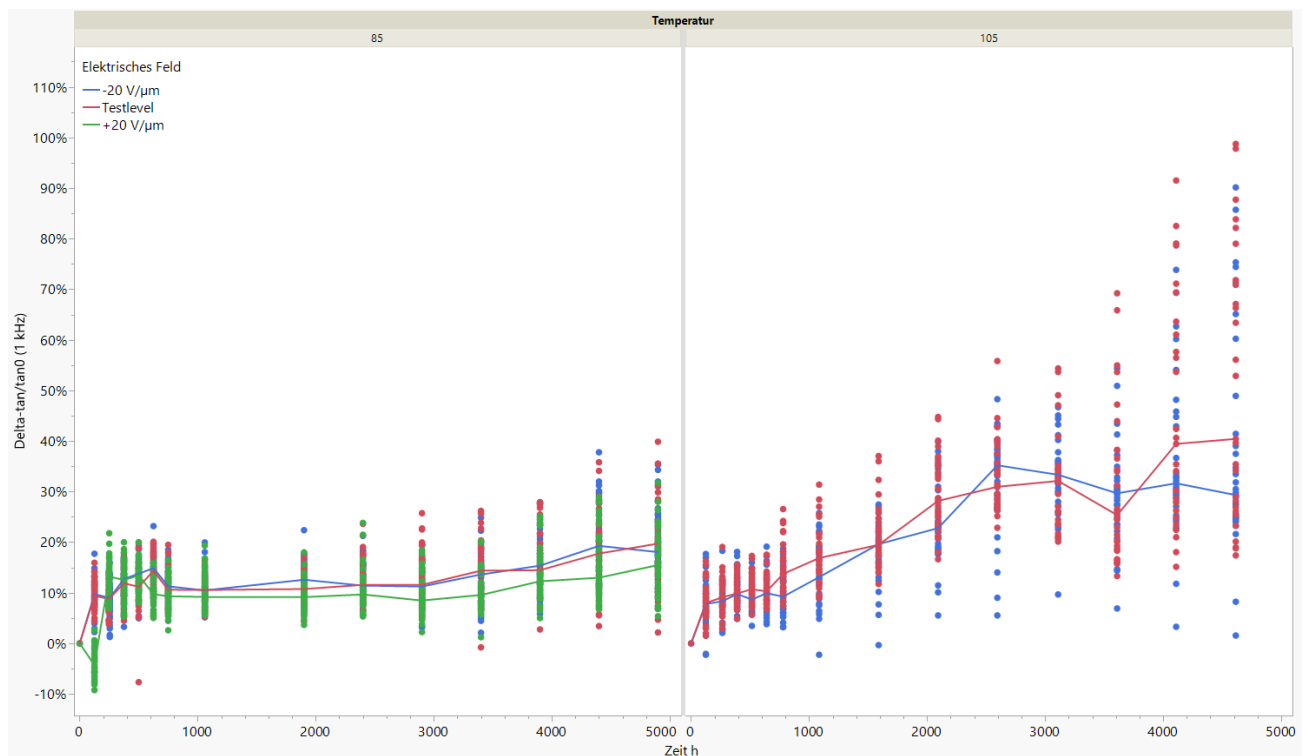


Abbildung 6: Degradation des Verlustfaktors bei 1 kHz von DC-Kondensatoren mit dünnen Filmen unter unterschiedlichen Temperaturbelastungen und hohen Spannungsüberlasten

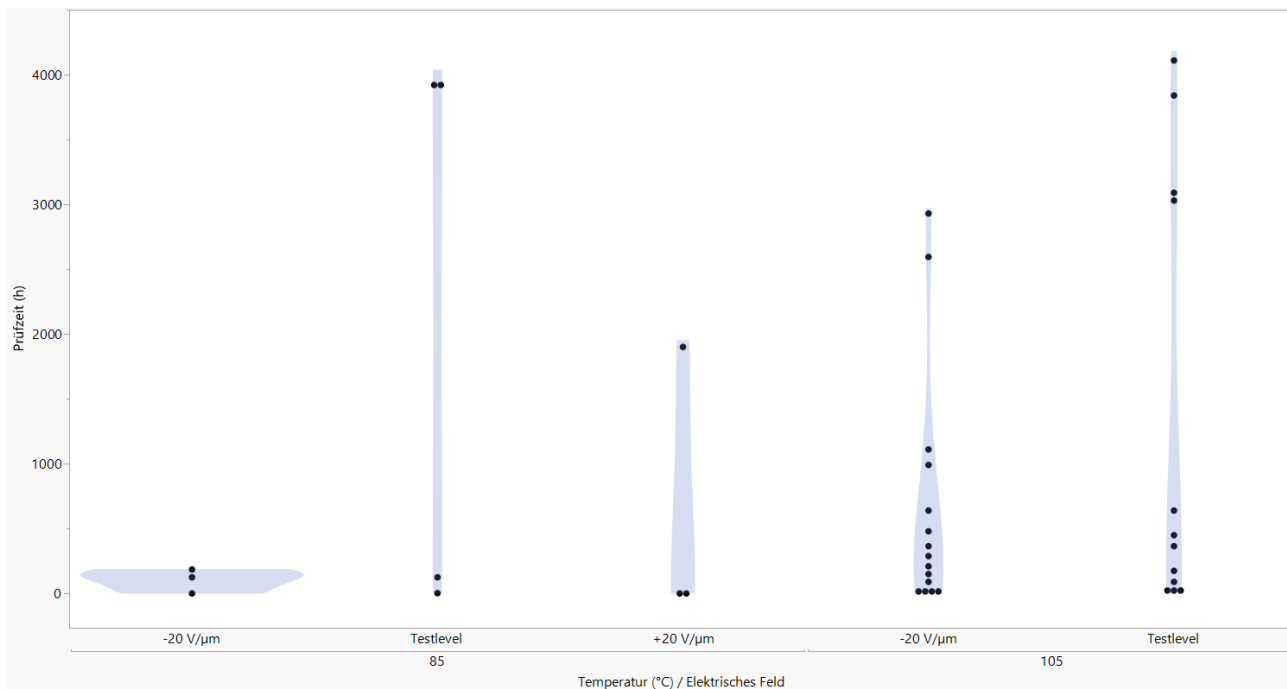


Abbildung 7: Ausfallzeitpunkte der verschiedenen Testgruppen

beendet, da dies bereits ein wesentlich längerer Zeitraum war als für diesen Vorversuch vorgesehen war. Damit ist die Anzahl der beobachteten „echten“ Ausfälle zu gering um eine Ausfallverteilung aufstellen und auswerten zu können.

Dies verhält sich anders im Fall der 105°C Gruppen. Diese zeigten keine sofortigen Ausfälle bei Überschreiten einer bestimmten Überspannung, sondern ein stetiges, sehr früh einsetzendes Ausfallverhalten. Dieses weist die größten Ausfallraten bei kleinen Zeiten auf, welche danach abnimmt. Dies ist die typische Signatur einer Frühausfallverhaltensweise, was auch durch die Auswertung der Ausfallverteilung bestätigt werden konnte. Diese konnten gut durch eine Weibullverteilung beschrieben werden, wie sie typischerweise auf das Ausfallverhalten von Dielektrika angewendet werden kann. Der β -Parameter der Weibullverteilungen dieser beiden Prüfgruppen betrug ca. 0,5, womit bestätigt ist, dass diese Gruppen ein Frühausfallverhalten zeigen mit abnehmenden Fehlerraten. Für einen intrinsischen Fehlermodus wäre ein $\beta > 1$ erwartet worden, was eine Ausfallverteilung mit steigenden Ausfallraten beschreibt. Dies ist nicht der Fall, weshalb diese Belastungskombination (105°C + hohe Spannungsüberlastfaktoren) als Überlastungsfall angesehen. Auf Basis weiterer begleitender Untersuchungen wurde verstanden, dass es bei dieser Lastkombination zu signifikanten parasitären Leckströmen kommt, welche einen signifikanten zusätzlichen Eigenerwärmungsbeitrag erzeugen. Die zusätzliche Erwärmung erhöht die Leckströme weiter, was letztlich zu einem thermischen Runaway führen kann. Daneben provoziert das erhöhte Temperaturniveau mehr Durchschläge und Selbstheilungsbedarf im Dielektrikum, weshalb die Ausfallwahrscheinlichkeit stark steigt.

Diese Ergebnisse haben damit erstmal den bisherigen internen Deratingansatz für hohe Einsatztemperaturen und dünne Folien bestätigt. Dennoch geben sie interessante Ansätze um den Temperaturbereich unterhalb

der 105°C und insbesondere um 85°C weiter zu untersuchen. Die maximal machbaren Spannungsüberlasten sind hier allerdings hart nach oben begrenzt und der nutzbare Überlastbereich ist wesentlich kleiner als erhofft. Die machbaren Testbeschleunigungen wurden auf Raffungswerten im Bereich von 50 bis ca. 150 abgeschätzt, welche groß erscheinen aber immer noch recht klein in Anbetracht der designten charakteristischen Lebensdauern von Leistungskondensatoren. Diese können im Bereich von einer Millionen Betriebsstunden oder 100 h Jahren liegen, da die abzusichernden B2-Lebensdauern im Bereich von 100.000 bis 300.000 h liegen.

Diese Limitierung bei gleichzeitig sehr hohen Lebensdauern hat beträchtliche Auswirkungen auf die realistischerweise machbare Teststrategie sowie die Überprüfung von Beschleunigungsmodellen. Diese Auswirkungen auf die Teststrategie werden unter AP5.2 (siehe Abschnitt 6.8) diskutiert.

6.4.2 Vorversuche 2 – DC-Kondensatoren unter Feuchtebelastungen

Mit dieser Gruppe von Versuchen wurde die Feuchteempfindlichkeit von diffusionsoffenen DC-Kondensatoren untersucht, wie sie als DC-Linkkondensatoren in Solarwechselrichtern eingesetzt werden. Auch hier sollte die Belastungsgrenze zum Überlastfall gefunden werden. Dementsprechend wurde mit hohen Temperaturen und Spannungsüberlasten gearbeitet und die Feuchtwerte variiert.

Bei den eingesetzten Kondensatoren handelte es sich um typische zylindrische DC-Kondensatoren für den Solarbereich mit Kapazitäten von einigen hundert Microfarad. Die Prüflasten sind in Tabelle 1 gelistet. Wie man sieht, wird die Temperatur mit 90°C konstant gelassen liegt aber sehr hoch. Dagegen wurden die relative Feuchte und die angelegten Überspannungen variiert. In den Testläufen wurden dann jeweils die Gruppen mit denselben Feuchten gemeinsam im Klimaschrank gefahren, wobei jede Gruppe ihre eigene Spannungsversorgung hatte.

Bei den Gruppen mit der niedrigsten Feuchtebelastung kam es in der Ausführung zu diversen Problemen. Beim ersten Versuchslauf dieser Gruppen wurden die Parameter für Feuchte und Temperatur vertauscht und

Tabelle 1: Liste der Versuchsgruppen und zugehörige Belastungen

Feuchte	Temp.	Überspannung	Notiz
98 RH%	90°C	+100 V/µm	
		+50 V/µm	
		Testlevel	
70 RH%		+100 V/µm	
		+50 V/µm	
		Testlevel	
40 RH%		+100 V/µm	1. Versuch: massive Ausfälle wegen falscher Belastung (90 RH% / 40°C) 2. Versuch viele Frühausfälle wegen hoher Leckströme Danach abgebrochen
		+50 V/µm	
		Testlevel	

die Gruppen eine Woche lang unter Bedingungen wie bei einer feuchten Lagerung (40°C, 90RH%) gefahren. Nach der Zwischenmessung und dem Wiederanfahren mit den korrekten Parametern gab es mehrere explosive Kondensatorausfälle, welche erhebliche Zerstörungen an benachbarten Kondensatoren verursachten und auch die Klimakammer leicht beschädigten.

Ursächlich war, dass sich die Kondensatoren während der einen Woche unter den falschen Klimabedingungen wahrscheinlich so sehr mit Feuchtigkeit aufgeladen haben, dass es unter den relativ trockenen, aber wesentlich heißeren, korrekten Bedingungen vermutlich zu Kurzschlüssen kam. Dies passt auch zur Felderfahrung mit diffusionsoffenen Kondensatoren, die über längere Zeit falsch, nämlich ungeschützt gegen Feuchte, gelagert wurden.

Die betreffenden Testgruppen waren aufgrund der Schäden und falschen Konditionierung nicht mehr zu verwenden und wurden nachproduziert. Die nachproduzierten Kondensatoren fielen dann kurz nach dem Hochfahren reihenweise aus. Hier kam es zu einem thermal runaway, da die gewählten Lastparameter an der Grenze des Verträglichen gewählt waren und die Leckströme dieser zweiten Charge wohl höher gewesen sind vs. der ersten Charge. Daraufhin wurde keine weitere Charge hergestellt. Stattdessen wurde dieser Versuchsast abgebrochen.

Auch bei den beiden anderen Feuchten kam es zu deutlichen und neuen, so nicht erwarteten Effekten. Bei der höchsten Feuchte von 98RH% waren die Ausfälle teilweise sehr explosiv. Zum Beispiel wurden bei einigen Kondensatoren die Wickelkernrohr herausgeschossen und verursachten Beulen in den Innenwänden der Prüfkammer. Hier muss in kurzer Zeit sehr viel Pyrolysegas produziert worden sein, wofür die hohen Überspannungsfaktoren verantwortlich war in Kombination mit der hohen Gesamtkapazität der Gruppen, welche im Bereich einiger Millifarad lag, da die Einzelkondensatoren parallel geschaltet waren.

Zusätzlich wurden Schäden an der Kappe des Kondensators beobachtet (siehe Abbildung 8), die so noch nie aufgetreten sind. In der Mitte zwischen den beiden Terminals und an den Terminals kam es hier zu Aufschmelzungen der Plastikkappe. Hier muss sich ein parasitärer, hochohmiger Strompfad von Terminal zu Terminal gebildet haben. Ansonsten wären die thermischen Schäden in diesem Bereich nicht zu erklären. Die Feuchtaufnahme des Vergusses bzw. Veränderungen an dessen Grenzfläche zur Kappe muss hier ursächlich beteiligt gewesen sein. Diese Vermutung wurde durch die nachfolgenden Untersuchungen des

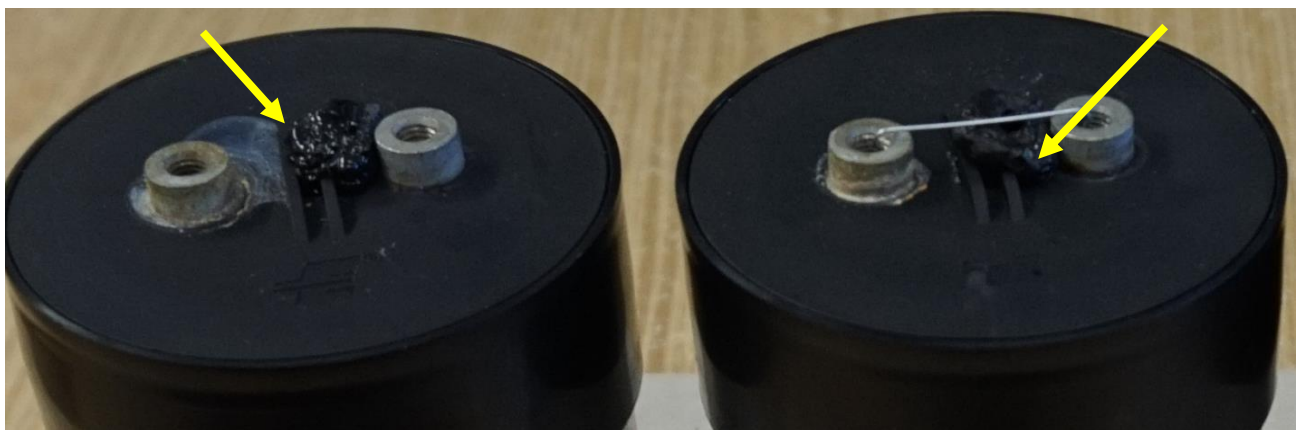


Abbildung 8: Schäden an Kappe der Kondensatoren aus den Gruppen mit der höchsten Feuchtebelastung von 98RH%



Abbildung 9: Geöffnete Kondensatoren, Blick auf den Verguss - Rechts jungfräulicher Kondensator mit der gelblichen Ausgangsfarbe - Links gestresster Kondensator mit dunkelbraunem Verguss

IMWS zur Zersetzung des Vergusses unter Feuchte (siehe auch AP2.2. in Abschnitt 6.3) sowie der Modellbildung des IMWS zum Feuchtetransport (siehe AP5.2 in Abschnitt 6.8) als höchst plausibel bestätigt. Diese Art des Schadens wurde so nur bei den Kondensatoren der Gruppen mit 98RH% beobachtet. Bei den Gruppen mit 70RH% trat das so noch nicht auf obwohl diese mehr als doppelt so lang belastet wurden (vergleiche auch Abbildung 13). Auch aus dem Feld ist dieses Fehlerbild so nicht bekannt. Dementsprechend werden diese Schadensarten als erster Hinweis gewertet, dass diese Feuchtebedingung für diese Kondensatoren den Überlastfall darstellt. Zusätzlich bestätigt dies die vorhandene Einstufung des getestete Kondensatortyps in eine Feuchtekategorie mit stark reduzierter Exposition (reduzierte absolute Feuchten, mittlere Feuchtebelastung $\leq 75RH\%$).

Die Gruppen mit Feuchten von 70RH% zeigten kein Aufschmelzen der Kappen und liefen deutlich länger als die entsprechenden Gruppen bei 98RH%. Mit der Zeit hat sich allerdings der Verguss stark verändert. Ein Farbveränderung des Vergusses (siehe Abbildung 9) ist normal für die angelegte Temperaturbelastung. Diese ist lang bekannt und wird tatsächlich im Rahmen der Forensik von ausgefallenen Feldkondensatoren mit begutachtet, da es ein Hinweis auf das Anliegen hoher Temperaturen über längere Zeiten ist. Neu war, dass sich der Verguss mit der Zeit sehr stark zersetzte. Mit der Belastungszeit wurde er immer weicher.



Abbildung 10: Querschnitt durch belasteten Kondensator - der Verguss ist stark zersetzt und schwammartig

Zuerst gummiartig, dann wie ein Schwamm (siehe Abbildung 10) um im weiteren Verlauf zähflüssig wie Honig zu werden, weshalb der Verguss dann auch aus den Kondensatoren herausfließen konnte, insofern sie liegend gelagert wurden. An dieser Stelle wurden die beiden verbliebenen Versuchsgruppen mit den niedrigeren Spannungslasten dann auch beendet, obwohl sie bis dahin kaum

funktional Ausfälle gezeigt hatten. Dieser Zustand war bei den ersten Kondensatoren nach einer Belastungszeit von etwas mehr als 2000 h erreicht (siehe auch Abbildung 13 und Abbildung 14).

Die Zersetzung des Vergusses beschränkte sich bis zu diesem Zeitpunkt auf den Vergussbereich unter der Kappe (siehe Abbildung 10). In den forensischen Untersuchungen des IMWS wurde zusätzlich noch eine starke Schädigung der Schoopierung gefunden (siehe AP2.2 in Abschnitt 6.3 sowie Bericht des IMWS). Diese Beobachtung passt qualitativ hervorragend zur vom IMWS erstellten Simulation des Feuchtetransports (siehe Abbildung 11).

Auch dieser Effekt wurde als ein Überstressen der Kondensatoren bewertet, denn die vergleichenden Untersuchungen des IMWS haben gezeigt, dass Feldteile auch nach 10 Jahren im Einsatz keine solchen massiven Schädigungen aufweisen. Diese Bewertung bedeutet nicht, dass dieser Effekt im Feld gar nicht auftreten kann. Tatsächlich muss davon ausgegangen werden, dass diese Testbedingungen eine extrem hohe Raffung haben vs. den realen Feldbedingungen der untersuchten Feldkondensatoren.

Die Schlussfolgerung, dass es sich um einen extrem gerafften Zustand handelt beruhen darauf, dass die Feuchtetransportmessungen des IMWS zeigen, dass der Verguss die Feuchte relativ schnell aufnimmt allerdings auch sehr gut wieder abgeben kann. Deshalb ist davon auszugehen, dass das Vergussystem im Wesentlichen den äußeren Feuchten, mit Verzögerung, folgt. Daher müssen die hohen Feuchten konstant über längere Zeit (~ Tage) anliegen, damit die Feuchte den Verguss völlig durchdringt. Gleichzeitig ist die geprüfte Bauform nur für Klimabedingungen klassifiziert bei denen hohen Feuchtwerte nur an wenigen Tagen pro Jahr auftreten. Deshalb ist die eventuelle Schädigungsdauer pro Jahr stark (~ 1/100) eingeschränkt. Zusätzlich kann davon ausgegangen werden, dass die Zersetzung des Vergusses im Feld ebenfalls deutlich langsamer verläuft, da Reaktionsgeschwindigkeiten über das Arrheniusgesetz mit der Temperatur verknüpft sind und die mittleren Temperaturen im Feld niedriger sind als die konstant hohen Temperaturen im Test.

Dementsprechend kann man erwarten, dass Kondensatoren die sehr lange Zeit (30+ Jahre ?) klimaklassenkonform (hohe Feuchte = selten) im Einsatz waren u.U. erste Schädigungen erfahren haben, die für die Funktion allerdings unkritisch sind. Eine deutlich stärkere Schädigung ist zu erwarten, wenn die Feuchtelasten nicht mehr konform sind zur Klimaklasse der Kondensatoren z.B. aufgrund lokaler Umweltbedingungen die über längere Zeit hohen Feuchten verursachen können. Diese lokalen Umweltbedingungen können Leckagen in Gerätedichtungen sein, weshalb höhere Feuchten in eigentlich trockenen Geräteteilen auftreten. Genauso können bestimmte Aufstellorte (Flusstal, Meeresnähe, Industrieumgebung, ...) dauerhaft stark erhöhte äußere Feuchtebedingungen mit sich bringen. In diesen Fällen ist die Schädigung der Schoopierung der kritischere Effekt für die Funktion des Kondensators, denn im Einsatz muss die Lötstelle und die umgebende Schoopierung hohe Stromdichten tragen. Eine

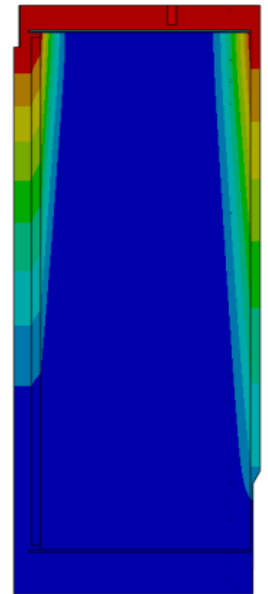


Abbildung 11:
Simulation des
Feuchtetransports nach
5000 h bei 85°C und
85RH% - aus Bericht
des IMWS

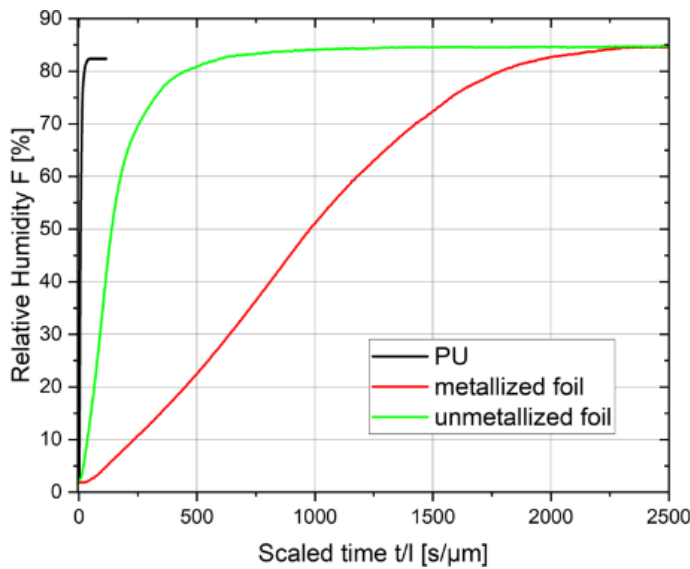


Abbildung 12: Zunahme der Feuchtigkeit in der Diffusionsmesszelle für die untersuchten Materialien bei 85°C / 85RH% - aus Bericht IMS

Beeinträchtigung der Stromtragfähigkeit durch eine geschädigte Schoopierung würde ein stärkeres Erhitzen der Umgebung der Lötstelle bewirken, was eine weitere Degradation derselben bewirkt. Im Endeffekt können solche Kondensatoren mit abgerissenen Lötstellen ausfallen. Daher stellt das Überstressen mit hohen Feuchten über lange Zeit ein Feldrisiko für diese Kondensatorbauformen dar (siehe auch AP4.3 in Abschnitt 6.7).

Die Verläufe der Kapazitäten und Verlustfaktorwerte für eine Messfrequenz von 1 kHz sind für die Versuchsgruppen der beiden anderen Feuchten in Abbildung 13 dargestellt.

Man sieht, dass der Effekt der unterschiedlichen

Feuchtelevel deutlich größer ist als die Unterschiede durch die Überspannung. Das höchste Überspannungslevel degradiert aber schneller und fiel auch deutlich früher komplett aus im Vergleich zu den beiden unteren Leveln.

Die Verläufe der Messkurven bei 70RH% sind ähnlich zu Messkurven von Prüflingen, die den gleichen Temperaturbedingungen und Überspannungen ausgesetzt wurden, allerdings ohne kontrollierte Feuchte. Für die Alterung der Wickel selbst dominieren hier also nicht die externe Feuchte, sondern die normalen Alterungseffekte (Selbstheilung) unter hohen Temperaturen und hohen Überspannungen. Anhand der

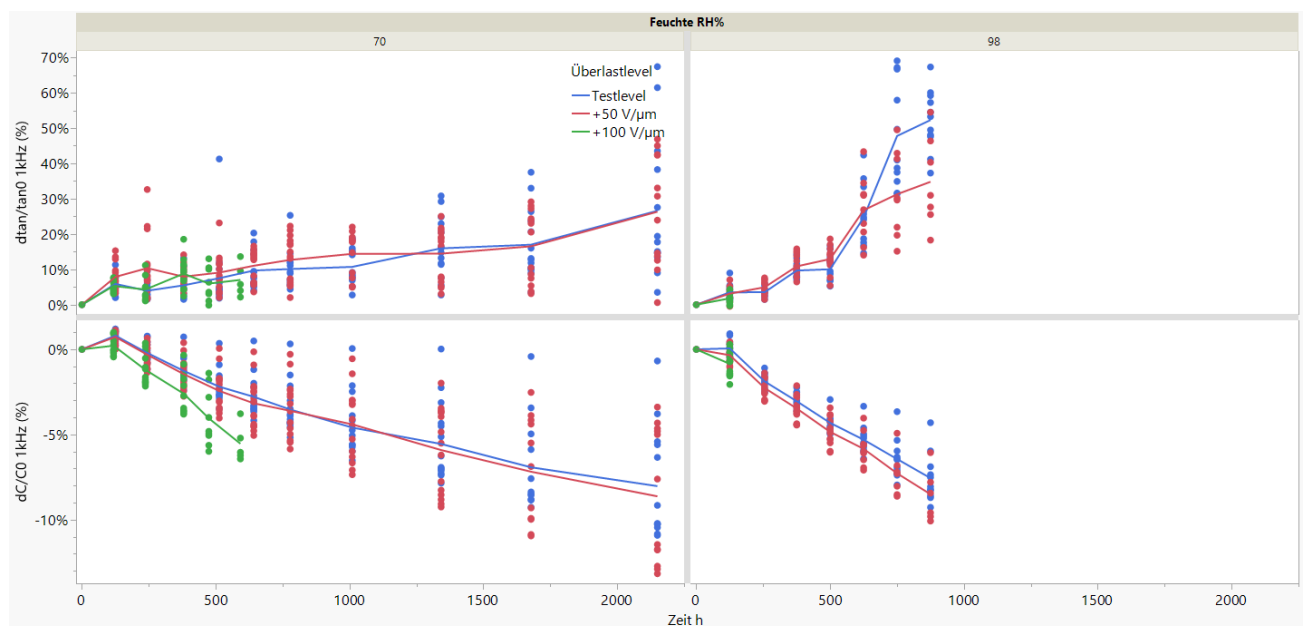


Abbildung 13: Kapazitäts- und Verlustfaktordegradation der Überlastgruppen bei den beiden Feuchtwerte 70RH% und 98RH%

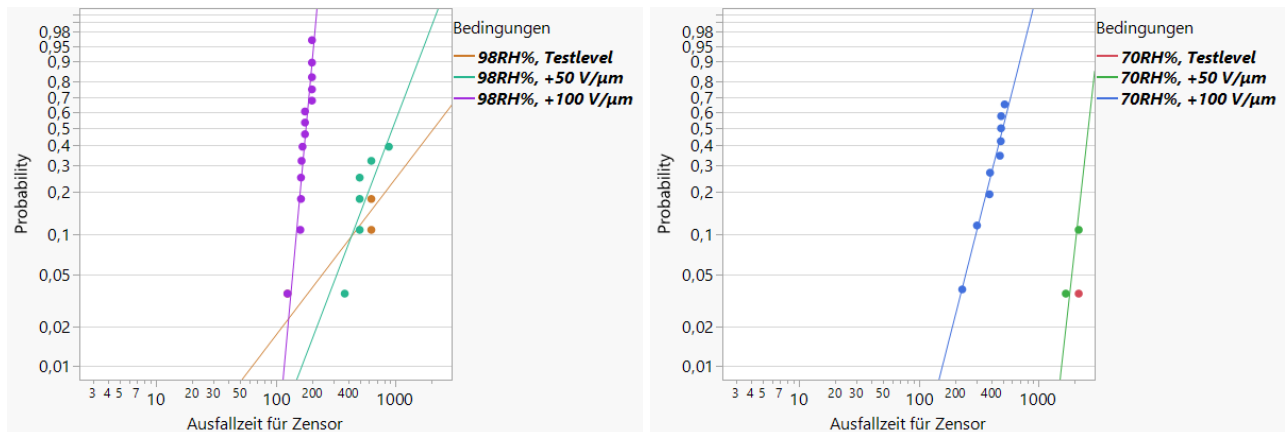


Abbildung 14: Ausfallverteilungen der Belastungsgruppen

Feuchtetransportmessungen des IMWS wird das verständlich, denn diese zeigen, dass die metallisierte Folie die Feuchtigkeit relativ langsam transportiert (siehe Abbildung 12: Zunahme der Feuchtigkeit in der Diffusionsmesszelle für die untersuchten Materialien bei 85°C / 85RH% - aus Bericht IMS). Außerdem muss die Feuchtigkeit Strecken im Bereich von mindestens einem Zentimeter überwinden um mit einem größeren Bereich der aktiven Metallisierung wechselwirken zu können. Dies dauert zu lange um bei diesen Überspannungen einen nennenswerten Effekt darzustellen.

Die Ausfallverteilung der verschiedenen Gruppen ist in Abbildung 14: Ausfallverteilungen der Belastungsgruppen dargestellt. Bei den Gruppen der 98RH% Belastung gibt es eine relativ starke Änderung des Anstiegs mit den angelegten Überlasten. Der entsprechenden Verteilungsparameter Weibull-β steigt mit der angelegten Überspannungslast von ca. 2 auf über 10 an, was auf eine Änderung des Ausfallmodus hinweist. Natürlich ist der Wert beim untersten Spannungslevel sehr unsicher, da diese Gruppe nur zwei funktionale Ausfälle (bei 500h) aufwies. Allerdings musste dieser Vorversuch nach ca. 1000 h aus Priorisierungsgründen beendet werden. Die Gruppen mit 70RH% stimmen in ihren Anstiegen besser überein und haben Weibull-β-Werte im Bereich um 3. Dies entspricht auch dem Bereich, welchen man bei DC-Kondensatoren findet, die den gleichen Temperaturbedingungen und Überspannungen ausgesetzt wurden, allerdings ohne die kontrollierte Feuchte. Dementsprechend ergeben sich hier die gleichen Schlussfolgerungen wie bei der Degradation

6.4.3 Vorversuche 3 – AC-Kondensatoren unter Feuchtebelastungen

In diesem Versuch wurde getestet ob und wie empfindlich AC-Kondensatoren mit hermetisch dichten vs. diffusionsreduzierten Bauformen auf hohe äußere Feuchtelasten reagieren. Dazu wurden zwei nahezu identische Kondensatorbauformen im Vergleich zu einander gefahren. Diese unterschieden sich nur in der Ausführung des Deckels des Kondensators. In der Bauform A wurde der Deckel wie der Kondensatorbecher in Aluminium ausgeführt und außengebördelt. Diese Bauform weist damit den niedrigsten Diffusionsquerschnitt auf. Diese Bauweise ist geeignet auch unter hohen Umgebungsfeuchten betrieben zu werden und wird in der ELECTRONICON als hermetisch dicht benannt. In der Bauform B ist der Deckel aus Plastik mit einem Dichtring am äußeren Rand und wird innengebördelt. Die Plastik selbst und der Dichtring

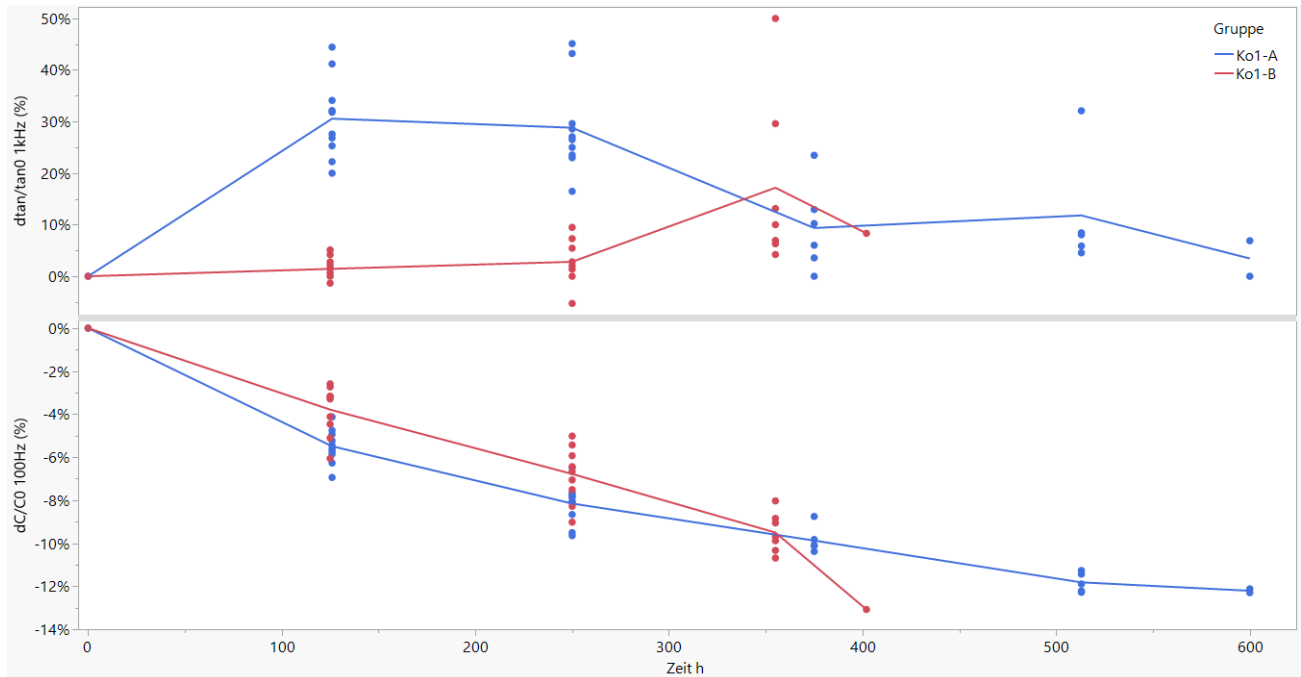


Abbildung 15: Verlauf der Kapazitäts und Verlustfaktorwerte im Vergleich zwischen zwei Ba

bilden hierbei einen etwas größeren Diffusionsquerschnitt, weshalb diese Bauform nur diffusionsreduziert ist. Sie kann hohen Feuchten für eine gewissen Zeit besser standhalten als z.B. die diffusionsoffenen DC-Kondensatoren des vorherigen Abschnitts, allerdings wird es auch hier, über lange Zeiten, zu einem Eindringen von Feuchte kommen.

Als Prüfbedingung wurden 80°C Umgebungstemperatur und 98 RH% Feuchte gewählt. Die AC-Spannungen wurde so gewählt, dass mit ca. 110 Vrms/µm belastet wird, was weit oberhalb der normalen Nennbelastung dieser Kondensatortypen liegt. In Abbildung 15: Verlauf der Kapazitäts- und der Verlustfaktormesswerte dargestellt. Diese sind zwischen beiden Bauformen nahezu deckungsgleich. Das bedeutet, dass der Degradationsmechanismus

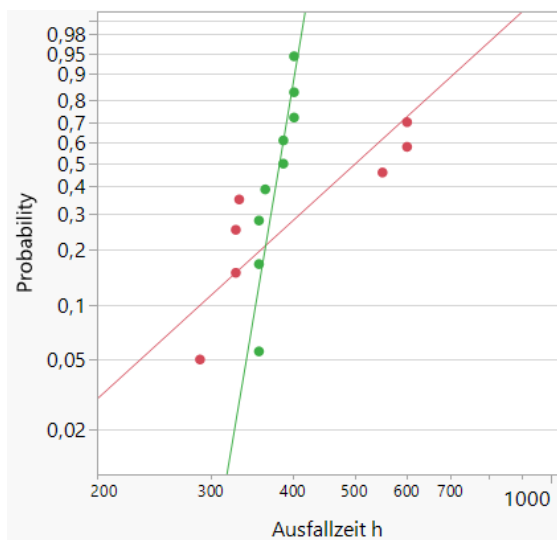


Abbildung 16: Ausfallzeiten der beiden Bauformen

insbesondere von der Bauform B wenig von eventuell eindringender Feuchte beeinflusst wird. Der Kapazitätsabbau wird unter diesen hohen Belastungen völlig vom Belagsabbau durch Teilentladungsereignisse bestimmt. Die Zeiten bis zum Erreichen des EOL-Kriteriums von -10% Kapazitätsabbau sind außerdem im Bereich von ca. 400 h, was entsprechend den Erkenntnissen aus dem vorherigen Abschnitt, zu kurz sein dürfte für ein nennenswertes Eindringen von Feuchte. Daher hat hier

insbesondere die Wahl der elektrischen Feldstärke bestimmt, welcher Alterungsmodus dominiert. Bei geringeren Überlasten könnte das anders sein so, dass Unterschiede zwischen dem Degradationsverhalten beider Bauformen deutlich werden. Solche Versuche müssten im Nachgang zu diesem Förderprojekt erfolgen, wobei dafür ein kompletter DOE erforderlich wäre um die Einflussfaktoren halbwegs trennen zu können.

Die Ausfallverteilungen der beiden Gruppen sind in Abbildung 16 dargestellt. Diese sind im Anstieg sehr unterschiedlich. Weibull- β der Bauform A liegt bei 3,5 und damit in einem Wertebereich wie er in den Hauptversuchsreihen an den AC-Kondensatoren beobachtet wurde, wie auch allgemein bei DC-Kondensatoren, bzw. im vorherigen Abschnitt bei den DC-Kondensatoren bei 70RH%. Bauform B hat einen Weibull- β - Wert im Bereich von 22, was extrem steil ist. Es ist unklar was die Ursache ist.

6.4.4 Vorversuche 4 – AC-Kondensatoren bei unterschiedlichen Temperaturen

In dieser Versuchsreihe im Perlenkettendesign wurden hermetisch dichte AC-Kondensatoren, im gleichen Design wie die Bauform A des vorherigen Abschnitts, unter hohen Spannungsüberlasten bei verschiedenen Temperaturen betrieben. Die Temperaturen variierten zwischen der oberen und der unteren Einsatzgrenze. Damit sollte die Temperaturabhängigkeit der Degradation und der Ausfallzeiten untersucht werden. Die entsprechenden Daten stellten die Basis dar für die Erarbeitung einer verallgemeinerten Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Degradation auf Seiten des IMA im Rahmen des AP3. Auf Basis der Ausfallzeiten wurde eine Aktivierungsenergie für das entsprechenden Alterungsgesetzes bestimmt.

Als wesentliche Erkenntnis ergab sich eine interessante Temperaturabhängigkeit des Degradationsverhaltens der Kapazität. Dagegen sieht man in den Verlustfaktorverläufen keine Unterschiede

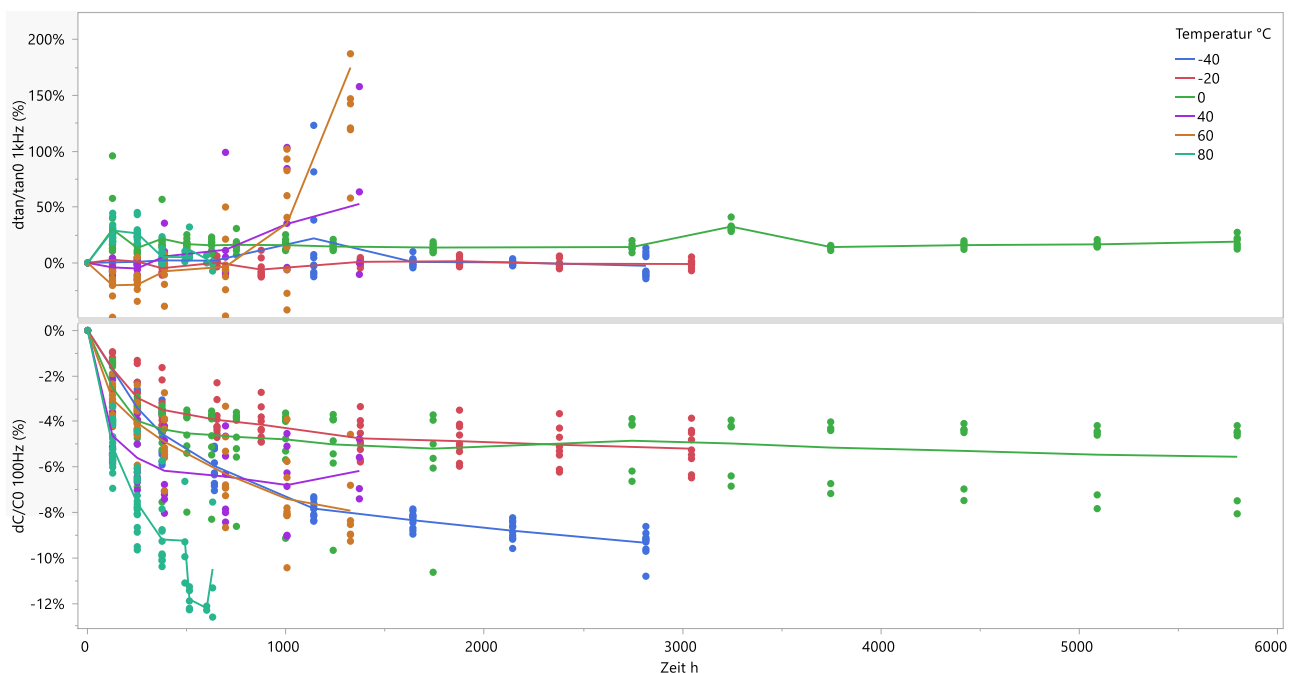


Abbildung 17: Degradationsverhalten des Verlustfaktors und der Kapazität von hermetisch dichten Kondensatoren unter verschiedenen Temperaturbelastungen bei stark überhöhter Spannungsbelastung

zwischen den Temperaturen. In

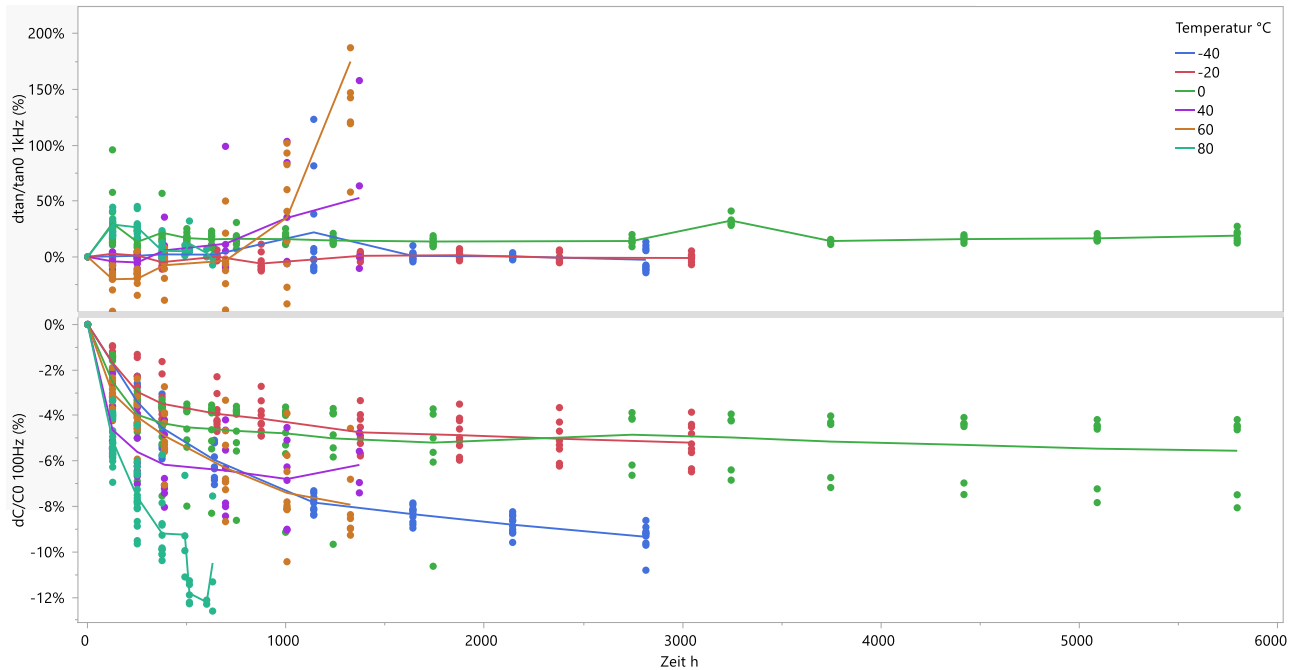


Abbildung 17 sind dieses dargestellt. Hier wurden einige Gruppen aus zeitlichen Gründen gestoppt, obwohl sie weder funktionale Ausfälle verzeichneten oder sie ins EOL-Kriterium für den C-Abbau gelaufen waren. Dies waren die Gruppen bei 0°C und -20°C.

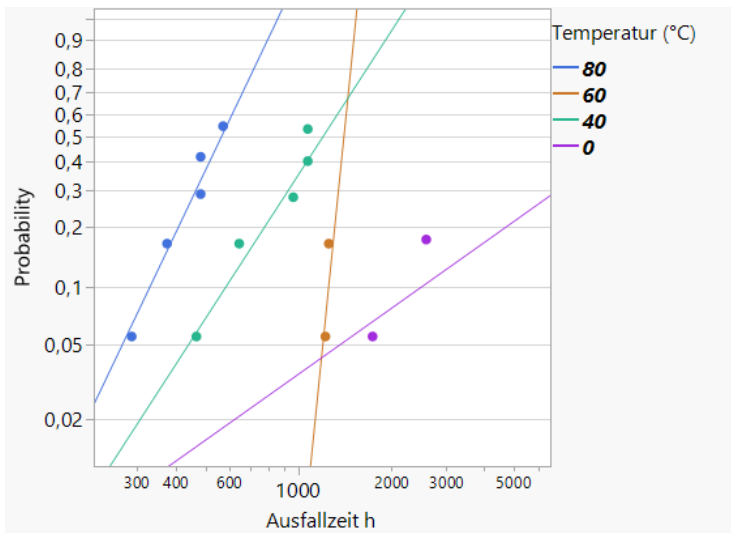


Abbildung 18: Ausfallverteilung der Versuchsgruppen

Die geringste Degradation der Kapazität tritt bei ca. 0°C auf. Außerdem sieht man, dass sich bei dieser Temperatur die Kapazität nach einem anfänglichen Abbau auf einem Plateau stabilisieren. Diese Signatur ist das bekannte Verhalten aus Versuchen und Typprüfungen mit deutlich geringeren Belastungen als hier durchgeführt. Bei Temperaturen oberhalb oder unterhalb von 0°C ist eine stärkere Degradation feststellbar, welche umso größer wird je weiter die Temperaturen von 0°C abweichen. Die Daten dieser

Degradationskurven dienen dem IMA als Basis für die Extrapolation der Kurven bis zum EOL-Kriterium -10% C-Abbau. Die entsprechenden Zeiten wurden dann von den Kollegen als Ausfallverteilungen genauer analysiert. Dabei zeigte sich, dass das normale Arrheniusgesetz für die Temperaturbeschleunigung gut passt für alle Gruppen die bei 0°C oder oberhalb davon gefahren wurden. Das Verhalten der Gruppen mit Temperaturen unterhalb der 0°C war mit diesem nicht beschreibbar. Daher hat das IMA eine Modifikation des Arrheniusgesetz entwickelt, welches die Daten besser beschreibt. Materialwissenschaftlich wurde dies so

interpretiert, dass die mechanischen Eigenschaften des BOPP ober- und unterhalb seiner Glasübergangstemperatur von ca. 0°C unterschiedlich sind. Dadurch ändert sich auch die Empfindlichkeit des Kondensatorwickels für die elektrische Belastung weshalb sich die Abbauraten ändern.

Die Ausfallverteilung der funktionalen Ausfälle der Versuchsgruppen sind in Abbildung 18 dargestellt. Nicht alle Gruppen (-40°C und -20°C) verzeichneten funktionale Ausfälle innerhalb der machbaren Belastungszeit. In diesen Fällen wurde die nachgewiesene Mindestzuverlässigkeit mittels der Weibayes-Methode auf ca. 4500 h abgeschätzt, 90%iger Aussagewahrscheinlichkeit. Die tatsächliche Zuverlässigkeit unter diesen Belastungstemperaturen kann deutlich größer sein. Bei der Gruppe mit 60°C Belastungstemperatur weicht der Anstieg der Ausfallverteilung deutlich ab von denen der anderen Gruppen (80, 40 und 0°C), allerdings hat diese Gruppe nur zwei auswertbare Ausfälle. Bei den anderen Gruppen liegt Weibull-β wiederum bei ca. 3,5. Damit kann man bei diesen Gruppen denselben Ausfallmechanismus annehmen.

Die Auswertung der gewonnen Kennzahlen, insbesondere der charakteristischen Lebensdauer (Weibull-α) ergibt das in Abbildung 19 als Arrheniusplot dargestellte Verhalten. Die Gruppen ohne Ausfälle konnten hier natürlich nicht berücksichtigt werden. Die ermittelte Aktivierungsenergie liegt mit ca. 0,3 eV ziemlich niedrig und deutlich unterhalb üblicher Werte für die Temperaturskalierung der funktionalen Ausfälle. Diese entsprechend eher einer Aktivierungsenergie von ca. 1eV. Dies kann daran liegen, dass die verwendeten hohen elektrischen Überlasten ein anderes Alterungsverhalten bewirken als in den üblichen Parametrierungen. Es kann auch sein, dass die bisherigen Parametrierungen nur anhand von Versuchsreihen bestimmt wurden die einen kleineren Temperaturbereich abdeckten und beispielsweise zwischen ca. 50 und 90 °C, weil nur so die Testdauer in einem machbaren Rahmen zu halten war. Damit wäre der Lebensdauererwerb durch einen Betrieb bei niedrigeren Temperaturen wahrscheinlich geringer als in den bisherigen Modellen abgeschätzt. So oder so bedeutet dies, dass hier noch weitere Arbeit erbracht

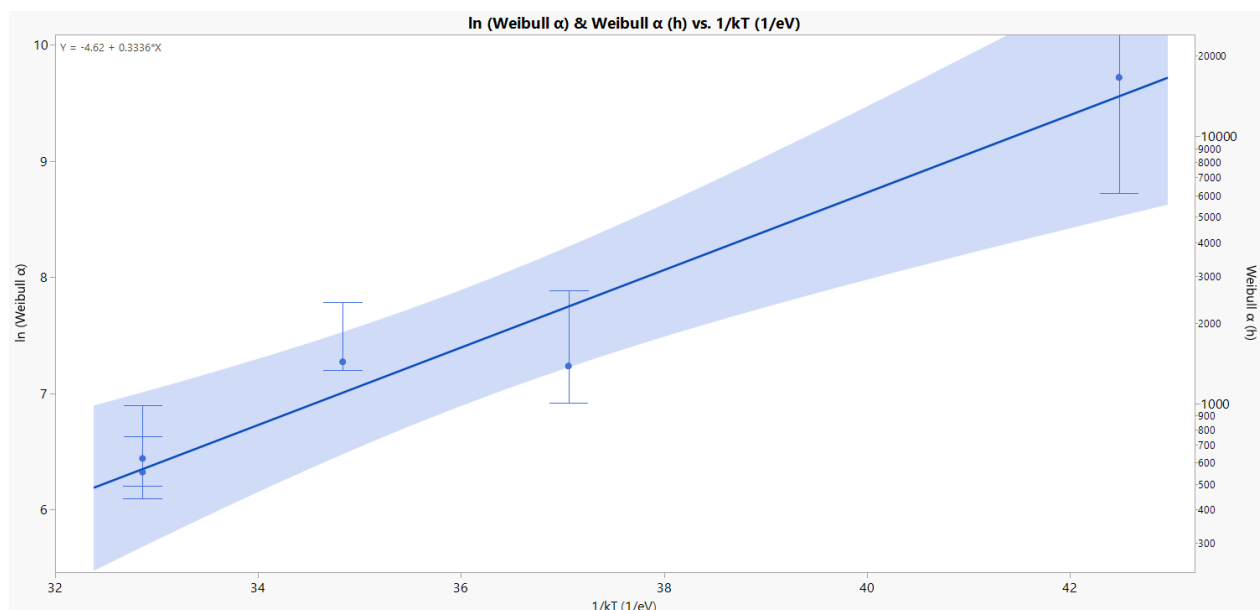


Abbildung 19: Arrheniusdarstellung der charakteristischen Ausfallzeiten über der inversen Temperatur zur Bestimmung der Aktivierungsenergie des Alterungsprozesses

werden muss um das Verhalten genauer zu untersuchen, auch wenn dieses Ergebnis in der Auswertung der Hauptversuchsreihen tatsächlich bestätigt werden konnte. Allerdings waren die Spannungsüberlasten auch bei diesen extrem hoch, weshalb noch die Frage zu klären wäre ob dieser Wert sauber zu kleineren Überlasten skaliert.

6.4.5 Hauptversuche – DOE für AC-Kondensatoren

In diesem Rahmen wurden insgesamt 17 Versuchsgruppen aufgesetzt, welche entsprechend dem erstellten DOE designt wurden und in den Versuchen unterschiedlichen Belastungsleveln unterworfen wurden. Variiert wurden die Foliendicke, die angelegte elektrische Feldstärke und die Temperatur. Aufgrund technischer Grenzen der Prüfanlagen lag der Variationsbereich der Foliendicke zwischen 3 und 5,5 μm . Die Temperaturen lagen zwischen 35 und 95 $^{\circ}\text{C}$, während die Feldstärken zwischen 107 $\text{V}/\mu\text{m}$ und 134 $\text{V}/\mu\text{m}$ variiert wurden, was sehr hohe Überspannungswerte sind. Die Wickelhöhe wurde konstant gehalten, genauso wie versucht wurde den Wickeldurchmesser möglichst konstant zu halten.

In der Versuchsdurchführung wurden dann auch dies regelmäßig gemessen und ihre Ausfallzeiten erfasst. Auf dieser Basis wurde die Degradation bewertet und die Ausfallverteilungen erstellt. Zur Klassifizierung der Ausfallmoden wurden die Ergebnisse der Arbeit des IMWS im Rahmen des AP 2.2. verwendet. Mit Hilfe der Kennzahlen der Ausfallverteilungen wurde die Modellbildung für das Alterungsmodell betrieben. Drei der 17 Versuchsgruppen haben das EOL-Kriterium der Kapazität erreicht ohne funktionale Ausfälle zu zeigen. Für diese konnte daher keine Ausfallverteilung bestimmt werden, weshalb für diese Gruppen im Zuge von AP 3 eine alternative Bewertungsmethodik angewandt wurde um zumindest eine Aussage zur nachgewiesenen Mindestzuverlässigkeit zu gewinnen. Ähnlich verhält es sich mit den drei Versuchsgruppen, die zum Ende des Projekts bereits ca. 6000+h ohne Ausfälle oder nennenswerter Degradation liefen. Diese sechs Gruppen bzw. Arbeitspunkte des DOES stehen daher nicht zur Verfügung um den Einfluss der Überspannungen und Temperatur auf die funktionalen Ausfälle zu modellieren. Die Aussagekraft des DOEs wird dadurch erheblich eingeschränkt, wie im Abschnitt zur Auswertung des DOEs erklärt werden wird.

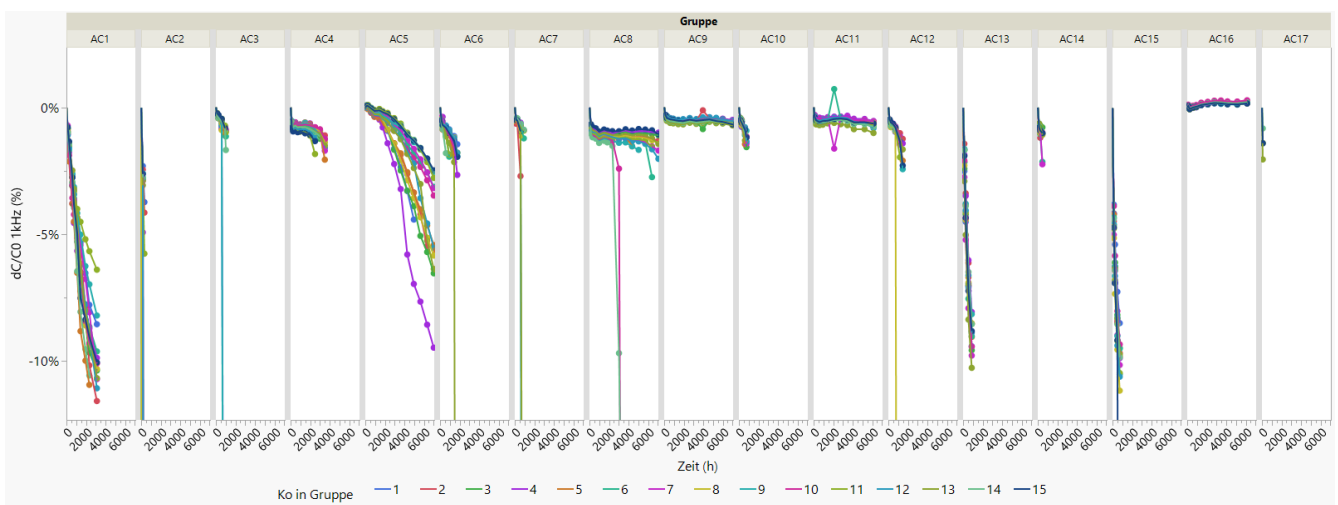


Abbildung 20: Kapazitätsverlauf für alle Versuchsgruppen mit Auflösung der einzelnen Prüflinge

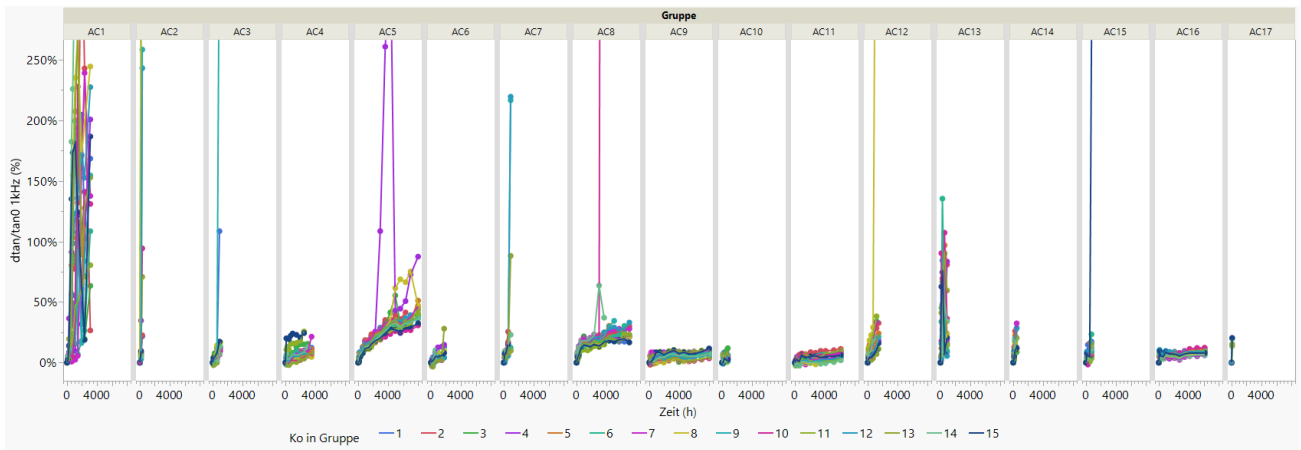


Abbildung 21: Verlauf der Verlustfaktorwerte für die Versuchsgruppen

In Abbildung 20 sind die Kapazitätsverläufe aller Versuchsgruppen dargestellt. Es ist sofort ersichtlich, dass die Gruppen ein sehr unterschiedliches Abbauverhalten zeigten. Einzelne Gruppen bauten innerhalb kurzer Zeit bis auf das EOL-Limit ab, während andere Gruppen nur einen anfänglichen Abbau zeigten und dann auf konstantem Niveau verharrten.

Die Verläufe der Verlustfaktorwerte sind in Abbildung 21 dargestellt. Diese zeigen einen hohen Anstieg bei den Gruppen die schnell abbauten, allerdings auch sehr frühe funktionale Ausfälle zeigten. Hier sind die hohen Anstiege teilweise begleitend zu den Ausfällen zu sehen. In den anderen Fällen ist der Verlauf im Wesentlichen flach nach einem anfänglichen Anstieg. Einzelne erhöhte Werte stehen wieder in Zusammenhang mit ausfallenden Prüflingen.

Der Verlauf und die Stärke des Kapazitätsabbaus zeigen beide sowohl eine Temperatur- als auch eine Überspannungsabhängigkeit, welche in Abbildung 22 systematisiert dargestellt ist. Im Temperaturbereich unterhalb von 65°C sind fast alle Kurven flach und zeigen so gut wie keinen C-Abbau. Erst bei den höchsten Überlastlevel kommt es zu einem starken Abbau. Bei 65°C und 80°C haben nur die niedrigsten Level einen nahezu flachen Verlauf. Im mittleren Lastbereich wird der Abbau dann leicht größer, hält sich aber noch im

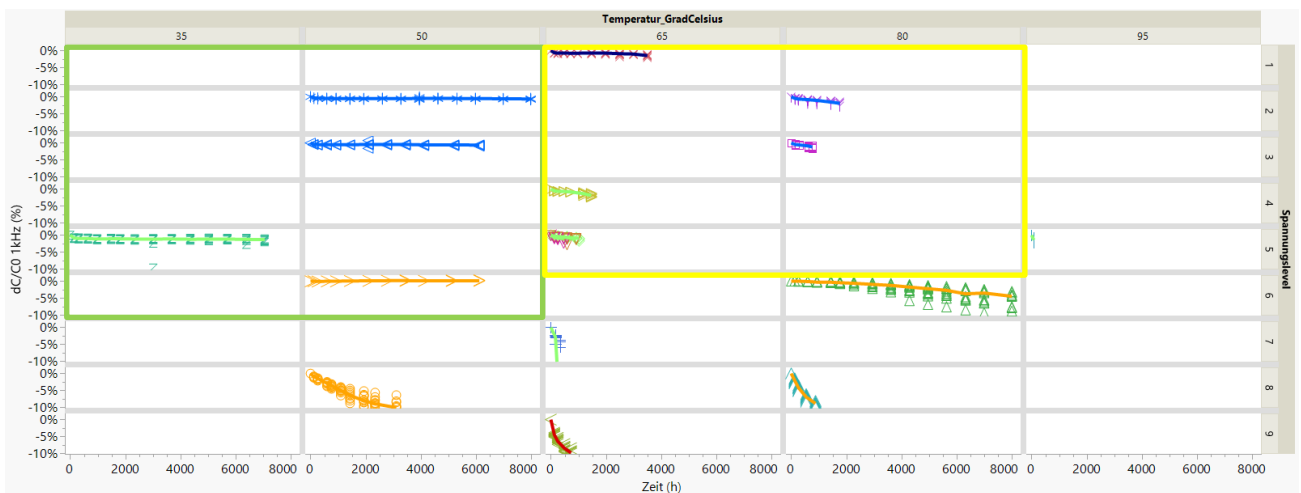


Abbildung 22: Kapazitätsabau in Abhängigkeit von der Temperatur und der Spannung

Rahmen. Bei den höheren Überlasten bauen die Kondensatoren dann sehr schnell ab, wie auch bei 95°C als Temperaturwert. Diese Systematisierung ergänzt die Beobachtungen, die im vorherigen Kapitel gemacht wurden.

Als nächster Schritt wäre eine Modellierung der Degradationskurven interessant um die Ratenparameter zu bestimmen. Diese Ratenparameter sollten die Temperatur- und Überspannungsabhängigkeit so abbilden, dass man damit auch auf noch nicht abgetestete Bedingungen schließen kann. Auf dieser Basis kann man dann auch wieder die Ausfallzeiten bis zum EOL-Kriterium des Kapazitätsabbaus berechnen, wie es das IMA in seinen Arbeiten im Rahmen des vorherigen Vorversuchs getan hat. Genauso, kann man dann auch diese Ausfallzeiten nach Temperatur und Überspannung modellieren. Diese Arbeiten konnten allerdings nicht mehr im Rahmen des Förderprojekts abgeleistet werden. Dies wird noch im Nachgang erfolgen.

Hauptziel des DOEs war es ein Modell für funktionalen Ausfälle zu erhalten, welches die charakteristische Lebensdauer in Abhängigkeit von der Temperatur und Überspannung berechnen kann. Hierzu wurden die Ausfallzeiten und Ausfallverteilungen der Versuchsreihen ausgewertet. Wie weiter oben erwähnt stehen dafür nur 11 der 17 Versuchsreihen zur Verfügung, weshalb einige Arbeitspunkte des DOEs fehlen.

Als erstes wurden die drei Replikationen des Centerpoints des DOEs ausgewertet. Dazu wurden alle drei Gruppen zusammen in einer Ausfallverteilung aufgetragen (siehe Abbildung 23). Diese zeigt bereits deutliche Unterschiede in den Anstiegen der einzelnen Gruppen und auch in der Lage der Ausfallzeiten. Die Gesamtverteilung hat ein Weibull- β von 3,8 mit einem 95%-Vertrauensbereich von 2,7 bis 5,1. Dieser Wert passt gut zu dem Wertebereich um 3,5 der bereits mehrfach in den Vorversuchsreihen und anderen parallelen Versuchen gefunden wurde.

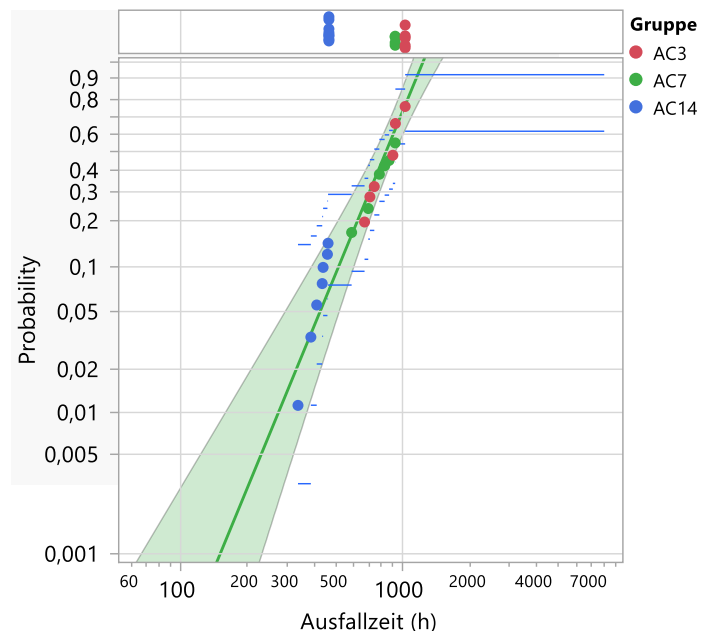


Abbildung 23: Auswertung der drei Gruppen welche den Centerpoint des DOEs darstellen

Die einzelnen Gruppen haben dagegen

Weibull- β -Werte von 7, 9 und 10 (siehe auch Abbildung 24). Der niedrigere Wert für die Gesamtverteilung ist eine direkte Folge der großen Unterschiede in den Ausfallzeiten zwischen Gruppe 14 und den beiden anderen Gruppen. Offensichtlich sind Unterschiede in der Größenordnung eines Faktors 2 statistisch als „normal“ zu werten, selbst für Kondensatoren die aus derselben Herstellcharge stammen. Dies ist eine wichtige Erkenntnis für die Bewertung der Ergebnisse von Versuchsläufen mit nur wenigen Teilen und ohne Wiederholungsversuche. Bei diesen muss man folglich immer von einer Unsicherheit in dieser Größenordnung ausgehen. Dies hat dieselben Folgen für die erwartbare Laufzeit eines Versuchs.

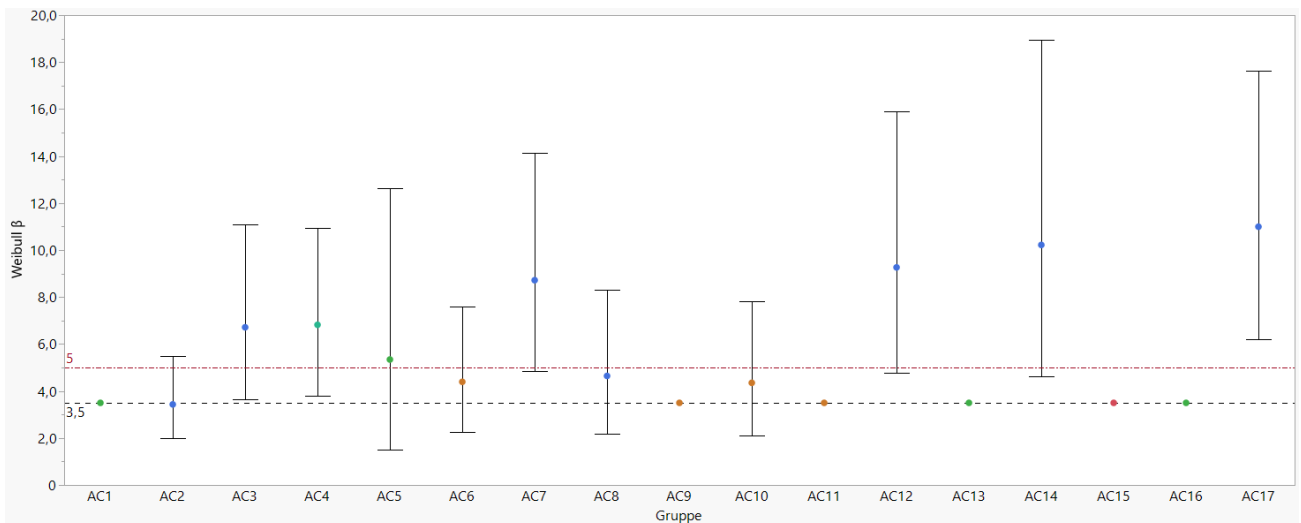


Abbildung 25: Erhaltene Werte und Streubreiten des 95%-Vertrauensbereichs für Weibull-β

Im Weiteren wurde dann geprüft ob alle Versuchsreihen in etwa denselben Wert für Weibull-β aufweisen. Dazu wurden die erhaltenen Werte der Anpassung der Ausfallverteilungen und die ermittelte Streubreite ihres 95%-Vertrauensbereich in Abbildung 24 aufgetragen. Als Orientierung sind zwei Linien eingefügt. Zum einen ist das eine Linie bei 3,5, da dies in etwa dem Wertebereiche entspricht, welcher in der Auswertung des Centerpoints gefunden wurde sowie immer wieder in den anderen Versuchsreihen und in vorherigen und parallelen Versuchen. Dieser Wert liegt etwas niedrig im Vergleich zu den dargestellten Streubereichen, da er nur einen Teil davon abdeckt. Allerdings hat auch die Auswertung des Centerpoints einen ganz anderen Wert gezeigt als für die einzelnen Gruppen. Alternativ wurde versucht einen Wert zu finden, welcher in möglichst vielen der Streubereiche liegen würde. Dies Wert wäre 5 und deckt die Versuchsgruppen in etwa ab. Infolgedessen kann geschlussfolgert werden, dass alle Versuchsgruppen wahrscheinlich denselben Ausfallmechanismen folgen, was die Voraussetzung ist um ihre Weibull-α-Werte einer gemeinsamen

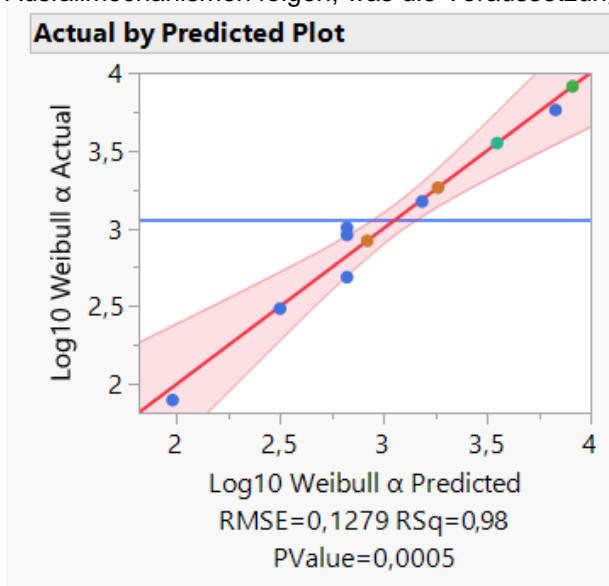


Abbildung 24: Plot zur Bewertung der Modellgüte

Modellierung zu unterwerfen. Aufgrund der Auswertung des Centerpoints wurde dann noch entschieden die Weibull-β-Werte der Gruppen ohne auswertbare Ausfälle auf 3,5 zu setzen, da dies für die Weibayes-Methode wichtig war. Es muss hier angemerkt werden, dass es innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr möglich war diesen gefunden Wert auch mit den Mitteln des IMA zu verifizieren.

Im Weiteren wurde versucht ein Modell zu entwickeln welches die erhaltenen charakteristischen Lebensdauern bzw. Weibull-α-Werte auf Basis der Temperaturbelastung und Überspannungswerte vorhersagt. Dies ist trotz der ausgefallenen 6

Versuchsreihen von 17 Gruppen zumindest mathematisch gelungen. In Abbildung 25 ist dargestellt wie das Werkzeug JMP (version 17) von SAS u.A. die Gütebewertung des Modells angibt. Zunächst einmal deckt der R^2 -Wert nahezu alle Beobachtungspunkte ab. Der Pvalue des Modells ist auch sehr klein, was bedeutet, dass das Modell zumindest mathematisch irgendeinen Unterschied zur Annahme „Kein Effekt“ hat. Außerdem liegen die meisten der Beobachtungspunkte im Vertrauensbereich der Modellvorhersage.

Von den Modellparametern her wurden die Temperatur als $1/kT$ berücksichtigt, wobei hier der Skalierungsfaktor auch hier mit ca. 302 ± 3 meV angefitet wurde. Damit wurde der Wert aus der Vorversuchsreihe 4 (siehe Abschnitt 6.4.4) hier bestätigt und der Streubereich ist sehr klein. Dieser Wert passt nicht gut zum bisher verwendeten Modell, weshalb es noch weitere Untersuchungen braucht um eventuelle Einflüsse und Schwächen der Modellbildung zu beseitigen. Insbesondere muss ein Weg gefunden werden die Temperaturskalierung für kleinere Spannungsüberlasten abzuprüfen.

Der zweite wichtige Modellparameter, der Exponent n des Power Laws zur Spannungsskalierung wurde berechnet als $n = -7,1 \pm 1,7$, was den bisher verwendeten Wert mit abdeckt. Damit haben diese Experimente tatsächlich die bisher verwendete Skalierung bestätigt.

In den nächsten Schritten muss man die Ergebnisse trotzdem noch mit anderen verwickelten Flächen und Baugrößen der Kondensatoren gegenprüfen um das bisherige Gesamtmodell vollständig verifiziert zu haben.

6.5 AP3.1: Messverfahren für die Bauteil-Parameterbestimmung

Auf Basis der Arbeiten an AP2.3.1 Vorversuche 1 – Dünne Folien sowie Vorversuch 2 – DC-Kondensatoren unter Fechtlasten ergaben sich Erkenntnisse zum Einfluss von parasitären Leckströmen. Bei der Vorversuchsreihe 1 fielen die Kondensatoren bei 105°C mit einem Frühausfallverhalten aus. Im Vorversuch 2 fiel die nachproduzierte Charge ebenfalls kurz nach dem Anschalten aus. Dies korreliert damit, dass die Leckströme der Kondensatoren bei diesen Temperaturen und den gewählten Spannungsüberlasten in Bereichen liegen, die eine Eigenerwärmung im Bereich einiger Kelvin und höher bewirkt. Damit kommt es thermal runaway, wobei Kondensatoren mit hohen Leckströmen besonders schnell ausfallen und solche mit geringen Leckströmen nur langsam mitkoppeln.

Auf dieser Basis kann geschlussfolgert werden, dass es hilfreich wäre im Rahmen der Stückprüfung alle Wickel/Kondensatoren bei Temperatur zu messen und ihre Leckströme zu erfassen. Dies könnte helfen schwache Chargen zu identifizieren sowie das Leckstromlevel generell zu senken, was größere Lasten erlaubt.

Zusätzlich wurde mit dem IMWS an der Modellierung des Feuchtetransports gearbeitet. Dafür wurden Proben und Daten zum Aufbau der Kondensatoren bereitgestellt. Die Ergebnisse haben die Erfahrungen aus den verschiedenen Vorversuchsreihen gut erklären können und helfen den Mechanismus besser zu verstehen.

6.6 AP3.3: Methodik zur Bauteil-Lebensdauervorhersage

6.6.1 Zuverlässigkeitsaussagen ohne Ausfallverteilung - Weibayes-Methode

ELECTRONICON hat mit den Partnern zusammen Methoden entwickelt um auch dann Zuverlässigkeitsaussagen zu generieren, wenn Versuchsgruppen keine funktionellen Ausfälle aufweisen. Dazu gehört die Anwendung der Weibayes-Methode zur Berechnung einer nachgewiesenen Mindestlebensdauer, selbst dann, wenn es keine Ausfälle in der Versuchsgruppe gab. Da dieser Fall durchaus auftreten kann, wie unter AP2.3 (siehe 6.4) festgestellt, kann man damit absichern, dass eine zugesicherte Lebensdauer, z.B. eine B2-Lebensdauer, auch tatsächlich nachgewiesen wurde. Außerdem muss damit die Testdauer nicht immer bis zum Ausfall laufen, sondern es reicht die Tests gerade so lange laufen zu lassen, dass die Lebensdauer mit einer ausreichenden Aussagesicherheit als Mindestlebensdauer nachgewiesen ist.

6.6.2 Verbesserte Testplanung - Tatsächlicher Nachweis einer geforderten Zuverlässigkeit

Eine weitere neuentwickelte Methode hilft bei der Optimierung der Testplanung und stellt eine wesentliche Weiterentwicklung der bisherigen Herangehensweise dar. Mit ihr kann man erstens die Dauer und Anzahl von Prüflingen besser abschätzen, welche nötig sind um eine Lebensdauer auch tatsächlich mit einer ausreichenden Aussagewahrscheinlichkeit nachzuweisen. Die Methode soll anhand der DC-Kondensatoren mit dünner Folie ohne Feuchtelasten erklärt werden. Prinzipiell ist es aber auch auf alle anderen Kondensatorbauformen übertragbar.

Die maximal machbaren Raffungsfaktoren lagen bei den der DC-Kondensatoren mit dünner Folie im Bereich von 50 bis 150, entsprechend der Abschätzung aus AP2.3 (siehe 6.4). Die Lebensdaueranforderung an die Leistungskondensatoren von ELECTRONICON liegen allerdings durchaus bei B2-Lebensdauern in der Größenordnung von 300.000 h. Mit der verbesserten Methodik kann man dann abschätzen welcher Aufwand für einen entsprechender Nachweis z.B. im Zuge einer Typprüfung zu betreiben ist. Für eine Aussagewahrscheinlichkeit von 90% wären das mindestens 50 Kondensatoren, welche eine Testzeit von 2000 bis 5000 h, unter entsprechend hohen Lasten, ohne Ausfälle überstehen müssten.

Diese Anforderung geht sowohl in der Anzahl der Prüflinge als auch in der Dauer der Testzeit sowie der anzulegenden Lasten deutlich über die bisherigen Normanforderungen z.B. laut DIN EN 61071 oder IEC 61881 zum Zuverlässigkeitsnacheis im Rahmen einer Typprüfung hinaus. Diese normativen Anforderungen haben aber gar nicht das Ziel eine B2-Lebensdauerforderung von 300.000 h auch tatsächlich nachzuweisen. Daher ist hier eine deutliche Weiterentwicklung gelungen.

Zusätzlich wäre es, zur Berücksichtigung von Fertigungsschwankungen, empfehlenswert drei separate Fertigungslose so zu testen. Diese Strategie wäre mit einer deutlich verbesserten Aussagekraft in der Lage nachzuweisen, dass ein bestimmtes Kondensatordesign in einer bestimmten Fertigungstechnologie prinzipiell geeignet ist diese B2-Lebensdauern zu gewährleisten.

Für den Solarbereich und auch für viele andere Anwendungsbereiche vereinfacht sich die oben abgeschätzte Testanforderung allerdings deutlich. Die meisten Missionprofile fahren nur selten an den oberen Lastgrenzen. Stattdessen liegen Lastkollektive zumeist deutlich unterhalb dieser Maximalwerte, weshalb die Raffungsverhältnis zwischen Feldbelastung und der Normlast (z.B. Nennspannung & 70°C Hotspot) unter Umständen im Bereich von 1/20 liegt. Für solche Anwendungsfälle ist ein Typtest nach DIN EN 61071 mit einer Dauer von 1000 h absolut ausreichend. Die Anzahl der Prüflinge sollte allerdings im Rahmen der Zuverlässigkeitstestplanung an die geforderte Aussagewahrscheinlichkeit angepasst werden. Ebenso sollte diskutiert werden ob es darstellbar ist drei Prüfungen an drei verschiedenen Losen durchzuführen. Daher ist es mit der neuen Methode möglich Lebensdauerprüfungen zu planen und durchzuführen, die fähig sind die geforderte Zuverlässigkeit (kumulierte Ausfallrate bei einer Lebensdauer) auch wirklich nachzuweisen.

6.6.3 Verbesserte Testplanung – Testzeit vs. Anzahl Prüflinge

Im Rahmen des Projekts wurde unter anderem an der Parametrisierung eines Beschleunigungsmodells für die AC-Kondensatoren gearbeitet. Dafür wurde ein DOE mit unterschiedlichen Belastungen erstellt und abgeprüft. Zur Bestimmung der Ausfallverteilungen war es notwendig, dass auf jeder Laststufe ein paar Kondensatoren ausfallen, wobei mehr Ausfallteile eine genauere Bestimmung der Ausfallverteilung erlauben. Auf Basis der hinzugewonnenen Kenntnisse ist ELECTONICON jetzt in der Lage genauer abzuschätzen wie lange es mindestens dauern könnte eine bestimmte Ausfallanzahl zu erreichen. Außerdem kann der Testplan gezielt optimiert werden um die Erfolgswahrscheinlichkeit zu erhöhen, indem z.B. bei bestimmten Lastgruppen gezielt mehr Teile vorgesehen werden. Das Herangehen soll wieder anhand der DC-Kondensatoren mit dünner Folie ohne Feuchtelasten erklärt werden. Prinzipiell ist es aber auch auf alle anderen Kondensatorbauformen übertragbar.

Angenommen es ist geplant 20 Prüflinge in einen Test zur Bestimmung der Ausfallverteilung zu geben, wobei möglichst 5 Ausfallteilen erreicht werden sollen. Die B2-Lebensdauer der Kondensatorstechnologie sei wieder 300.000 h und der Test soll bei der maximalen Raffung von ca. 150 gefahren werden. Für diese Voraussetzungen muss dann mit einer Laufzeit von 5000+ h gerechnet werden. Diese Laufzeit ist ziemlich groß, und sie kann deutlich größer ausfallen, wenn das Los stabiler ist oder die Technologie unbekannte Reserven aufweist. Daher kann es sein, dass in diesem Fall gar keine Ausfälle in der geplanten Zeit auftreten und man z.B. 10.000 h testen müsste um 5 Ausfälle aus 20 Prüflingen zu bekommen. Dies sind Testzeiten, die nicht mehr so einfach zu leisten sind.

Ähnlich verhält es sich, wenn z.B. ein Lastkollektiv mit einer Raffung im Bereich von 15 abgetestet werden soll mit den gleichen Grundvoraussetzungen wie zuvor. In diesem Fall läge die erwartbare Testzeit bei 50.000+ h, was so einfach nicht darstellbar ist.

Daher sollte man hier die Testplanung verbessern, indem man die Anzahl der Prüflinge anhebt. Allerdings muss man die Prüflingsanzahl überproportional stark erhöhen um einen deutlichen Effekt auf die Prüfzeiten zu erreichen. So könnte man z.B. im vorhergehenden Beispiel die Prüflingsanzahl auf 200 anheben, bei gleicher geforderter Anzahl an Ausfällen. Für diese Parameter läge die erwartete Testzeit dann bei 20.000+

h, was immer noch ein extremer Aufwand ist aber u.U. machbar wäre. Wie zu sehen ist muss man die Prüflingsanzahl um einen Faktor 10 erhöhen um die Testzeit um den Faktor 2,5 zu senken.

Effektiv steigt also der Gesamtaufwand überproportional an, wenn man versucht Testzeit zu sparen indem man die Prüflingsanzahl steigert. Dennoch sind die in diesem Projekt gewonnen Erkenntnisse extrem hilfreich für die Planung, Optimierung und Durchführung dieser Aufgabe.

6.7 AP4.3: Analyse von Ausfalldaten und Fehleranalysen

ELECTRONICON hat im Rahmen dieses Unterpunktes diverse AC- und DC-Kondensatoren gemessen und untersucht, welche bis zu 11 Jahre im Feldeinsatz waren. In Tabelle 1 sind die untersuchten Gruppen und die wesentlichen Ergebnisse für die DC-Kondensatoren zusammengefasst. Bei diesen waren die Messwerte der Kapazität und des Verlustfaktors bei allen zurückgelieferten Kondensatoren, im Rahmen der Messgenauigkeit, identisch zu den Werten der Endmessung des Kondensators am Ende des Herstellprozesses.

Damit kann festgestellt werden, dass die Belastung im Feld so gut wie keine Degradation der betreffenden Parameter verursacht hat. Allerdings gab es in jeder Gruppe je einen Kondensator bei dem die Verlustfaktorwerte erhöht waren. Ursächlich wurde dies jedes Mal auf die obere Lötstelle zurückgeführt. Wurde diese aus dem Messkreis ausgeschlossen, waren die Werte der Wickel immer wie gerade hergestellt.

Daher muss geschlussfolgert werden, dass es bei einzelnen Kondensatoren einen Mechanismus gibt welche die Lötstellen schwächt. Im Zuge des Vorversuchs²³ zu den DC-Kondensatoren unter Feuchte (Abschnitt 6.4.2) wurde bereits diskutiert, dass ein solcher Effekt möglich ist, wenn hohe Feuchtwerte im Feld über längere Zeit anstehen. Diese Vermutung kann allerdings nicht nachgewiesen werden auf Basis der verfügbaren Daten. Gleichzeitig lassen sich Fertigungsschwankungen, die die Sensibilität gegenüber Feuchtelasten erhöhen können, auch nicht völlig ausschließen. Es gibt auf jeden Fall keine Felderfahrung zu

Tabelle 2: Auflistung der DC-Kondensator aus dem Feld

Zeit im Feld	Anzahl DC-Link Stacks und Kondensatoren	Notiz
3 Jahre	3 x 9 Kos + 1 x 4 Kos	Ein Ko mit erhöhtem Verlustfaktor → Obere Lötstelle geschwächt
7 Jahre	6 x 9 Kos	Ein Ko mit massiv erhöhtem Verlustfaktor → Obere Lötstelle geschwächt
12 Jahre	1 x 8 Kos	Ein Ko mit erhöhtem Verlustfaktor → Obere Lötstelle geschächt

Tabelle 3: Auflistung der AC-Kondensatorengruppen aus dem Feld

Zeit im Feld	Anzahl Umrichter und Kondensatoren	Notiz
6 Jahre	1 x 8	Keine Änderungen vs. erwartetem anfänglichem Burn-In
10 Jahre	1 x 6	Keine Änderungen vs. erwartetem anfänglichem Burn-In
11 Jahre	1 x 2	Keine Änderungen vs. erwartetem anfänglichem Burn-In

massiven Ausfallraten aufgrund von geschwächten Lötstellen. Das Thema muss dennoch beobachtet werden.

Dieselbe Auflistung gibt es auch für die rückgelieferten AC-Kondensatoren (siehe Tabelle 3). Bei diesen gab es keinerlei auffälligen Werte. Alle Kondensatoren zeigten Kapazitäten und Verlustfaktorwerte wie sie völlig normal sind nach dem anfänglichen Burn-In der AC-Kondensatoren innerhalb der ersten Tage Betriebszeit.

Einzelne dieser Kondensatoren wurden an das IMWS übergeben zur weiteren Untersuchung. Im Ergebnis haben diese Kondensatoren dazu beigetragen die Schädigungen aus den Tests mit Feldteilen vergleichen zu können. Insbesondere bei den Feuchtetests an DC-Kondensatoren konnte hierbei festgestellt werden, dass die Tests die Kondensatoren viel stärker belasten als es an den Feldteilen sichtbar ist.

6.8 AP5.2: Bauteil-Testverfahren

In diesem Arbeitspunkt wurde zusammen mit den Partnern bewertet ob und in wie weit die existierenden Bauteiltestverfahren für Kondensatoren angepasst werden sollten, bzw. welche Aussagekraft sie haben könnten.

1) Testverfahren zur Validierung der Robustheit unter Feuchtelasten

In AP2.2 (siehe 6.3) wurde festgestellt, dass übliche Testverfahren zum Verhalten von Bauteilen unter Feuchte die Kondensatoren und insbesondere den Verguss und die Schoopierung überstressen. Aus diesem Grunde sind Ausfälle in einem 85/85-Test für 1000 h genau zu beurteilen und Ausfälle, die ursächlich durch eine Schädigung der Schoopierung verursacht wurden, sind aus der Wertung zu nehmen.

2) Forensische Methoden für Kondensatoren

In AP2.2 (siehe 6.3) wurde festgestellt, dass Röntgen gut geeignet ist um die Kondensatoren zu durchleuchten. Die Methode ist sogar in der Lage Störungen des Wickelgefüges durch Pyrolyse sichtbar zu machen. Sie ist zwar apparatetechnisch deutlich aufwendiger als die zerstörende Analyse, stellt das Ergebnis

allerdings ohne Zerstörung des Kondensators bereit. Bei kritischen Fällen sollte also auf jeden Fall an diese Methode gedacht werden.

3) Lebensdauernachweis und Gewinnung von Ausfallverteilungen

Die Verfahren und Methoden aus AP3.3 (siehe 6.6) können auch hier angeführt werden. Sie stellen eine wesentliche methodische Weiterentwicklung dar.

6.9 AP7: Ergebnisauswertung und Ableitung von Vorgehensweisen

In diesem Arbeitspunkt wurde die Ableitung strategischer Vorgehensweisen bzw. Anpassungen der Designregeln zusammengefasst.

- Die Erkenntnisse dieses Versuchsprogramm sind innerhalb der Organisation bekannt zu machen und im Rahmen der vorhandenen Strukturen zum Wissensmanagement zu verankern. Dadurch können die gewonnenen Erkenntnisse bereits jetzt bei neuen Produkten Anwendung finden, insbesondere dann wenn Auslegungen außerhalb der bisherigen Designregeln zu definieren sind.
- Eine Optimierung des Lebensdauermonitorings der ELECTRONICON sollte diskutiert und wenn machbar umgesetzt werden.
- Für eine Änderung von Designregeln braucht es noch eine bessere Datenlage. Dafür sind folgende Schritte nötig:
- Noch laufende Versuchsreihen der Hauptversuchsreihen werden entweder weitergeführt bis es zu Ausfällen kommt oder die Stückzahl muss vergrößert werden um den DOE besser auswerten zu können
- Teile der Hauptversuchsreihen ohne funktionale Ausfälle sollten mit größerer Stückzahl wiederholt werden um auch bei diesen Belastungskollektiven funktionale Ausfälle zu erhalten und damit den DOE besser auswerten zu können.
- Die Übertragbarkeit auf deutlich niedrigere Überlasten, in der Nähe von Feldlasten oder zumindest der üblichen Prüflasten nach DIN EN 61071 ist zu prüfen indem weitere Versuchsreihen entsprechend niedrigeren Lasten aber hoher Prüflingsstückzahl gestartet werden. Hierbei sollten auch größere Foliendicken als die hier verwendeten eingeplant werden.
- Die Allgemeingültigkeit für andere Wickelhöhen, -durchmesser und Reihenschaltungen muss noch abgeprüft werden.

7 Voraussichtlicher Nutzen

Die Ergebnisse helfen ELECTRONICON bereits jetzt dabei Kondensatoren zu entwickeln deren Anforderungen über die bisher definierten Designgrenzen hinausgehen. Außerdem sind sie eine wichtige Datengrundlage in Diskussionen mit Kunden, welche Vertrauen schafft und Kompetenzen belegt. Aktuell gibt es zum Beispiel eine sehr spezielle Entwicklung für einen großen europäischen Teilchenbeschleuniger, bei

welchem die gewonnen Daten hilfreich waren zur Findung einer Auslegung und zum Nachweis der gemachten Annahmen.

Zusätzlich werden die Erfahrungen und Erkenntnisse genutzt um Versuchsreihen zur Anprobe neuer Materialien oder geänderter Prozesse effizient zu planen und durchzuführen. Genauso helfen sie in der Risikoanalyse und bei Reklamationen. Damit werden sie ELECTRONICON in den nächsten Jahren helfen seine Prozesse weiter zu optimieren und die Designgrenzen zu erweitern.

Eine direkte Verschärfung der Auslegungskriterien ist nicht sofort geplant, da es noch viele Randbedingungen gibt, die beachtet und geprüft werden müssen. Daher müssen in den nächsten Jahren noch viele weitere Versuche durchgeführt werden. Dennoch haben die Versuche Hinweise gegeben wo Problemstellen liegen bzw. wo es Reserven geben könnte. Diese werden genutzt werden wo das möglich ist.

8 Veröffentlichungen

Bisher war ELECTRONICON bei drei Veröffentlichungen der Partner IMA und IMWS als Co-Autor beteiligt. Diese sind:

- Benz et. al.; *Zuverlässigkeitsanalyse von PV-Anlagen und Wechselrichtern* – Beitrag TTZ 2021
- Rudolph et. al.; *Evaluation of failure modes in film capacitors after accelerated life-time testing compared to field returns* – CIPS 2024, Germany, 2024, pp. 253-258
- In Vorbereitung: Benz et.al.; *A Two-Phase Arrhenius Model for Film Capacitors for large Temperature Ranges* – Paper für die RAMS 2025 in Miramar Beach, Florida, USA

ⁱ H. Heywang, Physikalische und chemische Vorgänge in selbstheilenden Kunststoff-Kondensatoren, *Colloid & Polymer Sci.* 254, 139-147 (1976)

ⁱⁱ D. F. Taylor, *ON THE MECHANISM OF ALUMINUM CORROSION IN METALLIZED FILM AC CAPACITORS*, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. EI-19, p. 288 (1984)

ⁱⁱⁱ P. Cygan et. al.; *Lifetimes of Polypropylene Films under Combined High Electric Fields and Thermal Stresses*, IEEE Transactions on Electrical Insulation Vol. 24, p. 619 (1989)