

# Whitepaper - Entwurf

## Dauerhaft zuverlässige Entstörung mit X- und Y- Folien- Funkentstörkondensatoren

### Einleitung

X- und Y- Folienkondensatoren werden zur Funkentstörung elektronischer Geräte in externen oder in direkt auf der Leiterplatte bestückten EMV-Filtern eingesetzt. Darüber hinaus schützen sie das elektronische Gerät vor netzseitigen Überspannungen (Transienten) und unterdrücken leitungsgebundene Rückwirkungen des elektronischen Geräts auf das Versorgungsnetz.

Die Anzahl an elektronischen Geräten steigt seit Jahren kontinuierlich an, und dieser Trend gewinnt zunehmend an Dynamik. So werden herkömmliche Glühbirnen durch elektronisch getaktete Energiesparlampen und LED-Birnen ersetzt. Künftig werden immer mehr Wohngebäude und Fabriken durch elektronisch betriebene LED-Röhren beleuchtet. Alte, Quecksilberhaltige Straßenlaternen werden durch moderne LED-Straßenlaternen mit elektronischen Vorschaltgeräten ersetzt. Der Ausstieg aus der Atomkraft hat eine zunehmende Verbreitung von Wechselrichtern zur Folge, die eine aus Sonnen- oder Windkraft gewonnene Gleichspannung in Wechselspannung umwandeln. Energieeffizienz-Gesetze erfordern die Verwendung von elektronisch gesteuerten Motoren und Antrieben wie z.B. elektronisch gesteuerte Heizungspumpen. Haushaltsgeräte wie z.B. Kühlschränke und Kühltruhen werden mit energiesparenden elektronischen Steuerungen anstatt von mechanischen Steuerungen ausgestattet. Moderne Induktionsherde finden in immer mehr Küchen Einzug. Elektro- und Hybridfahrzeugen werden in den kommenden Jahren durch Ladestationen über das Versorgungsstromnetz aufgeladen. Durch die Energiewende gewinnen Anwendungen aus dem Bereich Smart Meter (Intelligente Stromzähler), Smart Home und Smart Grid zunehmend an Bedeutung.

Nur wenn sich sämtliche dieser am Stromnetz befindlichen Produkte nicht gegenseitig stören, kann ein reibungsloses Nebeneinander dieser Produkte funktionieren.

In der Vergangenheit wurden zur Stromversorgung von elektronischen Geräten hauptsächlich Linearnetzteile verwendet. Konstruktionsbedingt verursachten diese linear geregelten Trafonetzteile keine hohen EMV-Belastungen. Folglich kam es zu relativ wenigen EMV-bedingten Störfällen von elektronischen Geräten am Netz. Daher wurde der tatsächlichen Einhaltung der EMV-Grenzwerte über die gesamte Lebensdauer eines elektronischen Geräts hinweg wenig Aufmerksamkeit gewidmet. So lange es zu keinen Störfällen kommt, wird in der Praxis nach wie vor die

Einhaltung der Elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) eines elektronischen Geräts zumeist nur zu dem Zeitpunkt gemessen, zu dem dessen CE-Konformität belegt werden muss. Dies ist in der Regel vor dem Inverkehrbringen des Geräts durch den Hersteller der Fall.

Aktuell werden elektronische Geräte anstatt mit Linearnetzteilen hauptsächlich mit effizienteren, aber störungskritischeren Schaltnetzteilen betrieben. Jedoch gerät die EMV eines elektronischen Gerätes zunehmend in den Fokus. Denn es gibt immer mehr elektronische Geräte am Netz, die für ihre reibungslose Funktion und einen ungestörten Betrieb eine ausreichende Netzqualität benötigen. Dies sind z.B. viele Produkte aus dem Bereich Smart Meter, Smart Home und Smart Grid. Mit dem europaweiten roll-out von Smart Metern werden dann Zigmillionen von Geräten im Feld sein, die für ihre fehlerfreie Funktion auf eine Netzqualität mit zuverlässig begrenzten Störspannungen und Störströmen angewiesen sind. Es ist davon auszugehen, dass die zuständigen Behörden den Störverursacher genau identifizieren werden, der den Betrieb solcher Produkte stört.

Somit kommt der wirksamen und zuverlässigen Entstörung von elektronischen Geräten über deren gesamten Betriebsdauer eine zunehmend wichtige Bedeutung zu. Daher ist es wichtig, dass die Lebensdauererwartung der zur Entstörung verwendeten X- und Y- Funkentstörkondensatoren der des betreffenden elektronischen Geräts entspricht.

Im Gegensatz zu Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren, die in Lebensdauer-Klassen (z.B. 85°C/2.000 Stunden, 105°C/10.000 Stunden) eingeteilt sind, gibt es bei Folienkondensatoren keine solchen Kategorisierungen in Bezug auf ihre minimale Lebensdauererwartung. Dies kann dazu führen, dass dieselben X- und Y- Funkentstörkondensatoren sowohl in low-cost Konsumerelektroniken als auch in deutlich anspruchsvolleren und langlebigeren Leistungselektroniken eingesetzt werden. Dies wäre jedoch nur akzeptabel, wenn X- und Y- Funkentstörkondensatoren keiner Alterung unterliegen. Dies ist jedoch nicht der Fall. Wie alle metallisierten Folienkondensatoren unterliegen sie einer Alterung, welche maßgeblich durch die Einflussfaktoren Temperatur, Spannung und Feuchtigkeit bestimmt wird.

Ziel dieses Whitepapers ist es, für X- und Y- Folienkondensatoren einen beschleunigten Lebensdauer-Test (ALT-Test, Accelerated Life Test) vorzustellen. Mit diesem Test können die zu erwartenden Alterungsprozesse der Folienkondensatoren während der gesamten Lebensdauer des elektronischen Geräts offengelegt werden. Der Test berücksichtigt dabei sämtliche relevanten Einflussfaktoren auf die Alterung von metallisierten Folienkondensatoren.

Der Hersteller eines elektronischen Geräts soll mit diesem beschleunigten Lebensdauererwartungstest selbst sicherstellen können, dass die zur Verwendung vorgesehenen X- und Y- Folienkondensatoren tatsächlich eine ausreichende Lebensdauererwartung für seine Applikation besitzen. Daher wird die Aufnahme

eines solchen beschleunigten Lebensdauertests in den Bauteile-Qualifizierungsprozess empfohlen.

Nur wenn die X- und Y- Funkentstörkondensatoren zuverlässig ihre spezifizierte Funktion erfüllen, sind dauerhaft begrenzte Emissions- und Immunitätswerte eines elektronischen Geräte entsprechend den gültigen EMV-Grenzwertkurven gewährleistet. Nur dann ist die CE-Konformität des elektronischen Geräts über seine gesamte Lebensdauer hinweg gewährleistet.

### **Störungsarten:**

Folgende elektromagnetische Unverträglichkeiten ergeben sich aus dem Betrieb von elektronischen Geräten:

Störspannungen (Leitungsgebundene Störaussendung):

- Symmetrische (Gegentakt-) Störungen
- Asymmetrische (Gleichtakt-) Störungen

Störstrahlung (Feldgebundene Störaussendung):

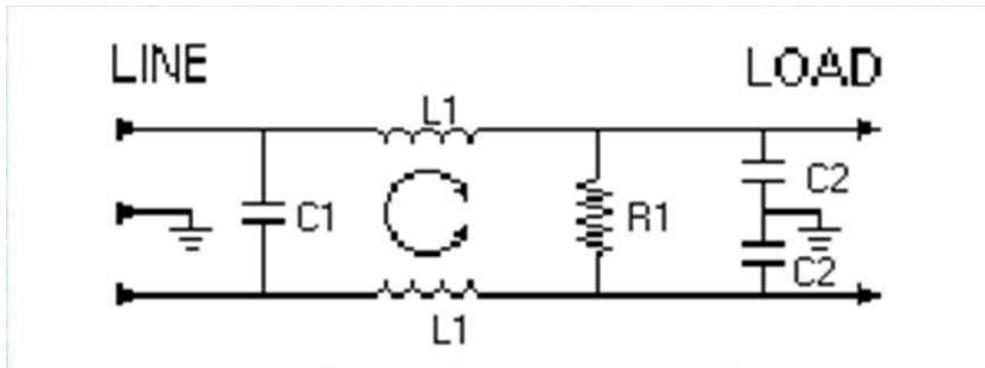
- Überwiegend asymmetrische Störungen auf Leitungen von oder zum Gerät, die dann als „Antennen“ wirken.
- Abstrahlung des Geräts selbst.

Bevor elektronische Geräte in den Verkehr gebracht werden, müssen sie die Einhaltung der entsprechend ihrer Geräteklasse gültigen Grenzwertkurven z.B. der EN 55011\_22 belegen, um ihre CE-Konformität nachzuweisen.

## Entstörung durch Netzfilter - Aufbau und Funktion

Netzfilter werden in elektronischen Geräten eingesetzt um die Einhaltung der gültigen EMV-Grenzwertkurven in Bezug auf deren Immunitäts- und Emissionswerte zu gewährleisten.

### Typischer Aufbau von Netzfilter:



#### X-Kondensator (C1):

- zwischen Phase und Neutraleiter oder zwischen zwei Phasen geschaltet.
- dämpft symmetrischen Störanteil (Gegentakt-Störspannungen, differential mode noise).
- leitet hochfrequente Störsignale gegen Masse ab.
- schließt hochfrequente Störungen zwischen den Zuleitungen kurz.

#### Y-Kondensator (C2):

- zwischen Phase respektive Neutraleiter und berührbarem, schutzgeerdetem Apparategehäuse (PE) angeschlossen.
- dämpft asymmetrischen Störanteil (Gleichtaktstörungen, common mode noise).
- Schließt hochfrequente Störungen gegen Erde kurz.
- Ableitstrom darf nicht unzulässig erhöht werden.

#### Drossel (L1):

- Bei symmetrischer Störquelle (periodisch öffnender bzw. schließender Schalter, z.B. Triac) und bei asymmetrischer Störquelle (z.B. Oszillator für Mikroprozessor).
- Erhöht die Impedanz des symmetrischen und des asymmetrischen Störstromkreises.
- Verringert die durch Schaltfrequenz & deren Harmonische entstehenden Störströme.

## **Testergebnisse eines beschleunigten Lebensdauertests von X2- und Y2-Folienkondensatoren:**

Aus dem Aufbau eines Netzfilters ergibt sich die Bedeutung einer dauerhaft zuverlässigen Funktion von X- und Y- Kondensatoren.

Jedoch unterliegen handelsübliche X- und Y- Folienkondensatoren einer Anfälligkeit für unkontrollierte Kapazitätsverluste aufgrund einer klimatischen Alterung durch die Präsenz einer ungewünschten Luftfeuchtigkeit im Kondensatorinneren.

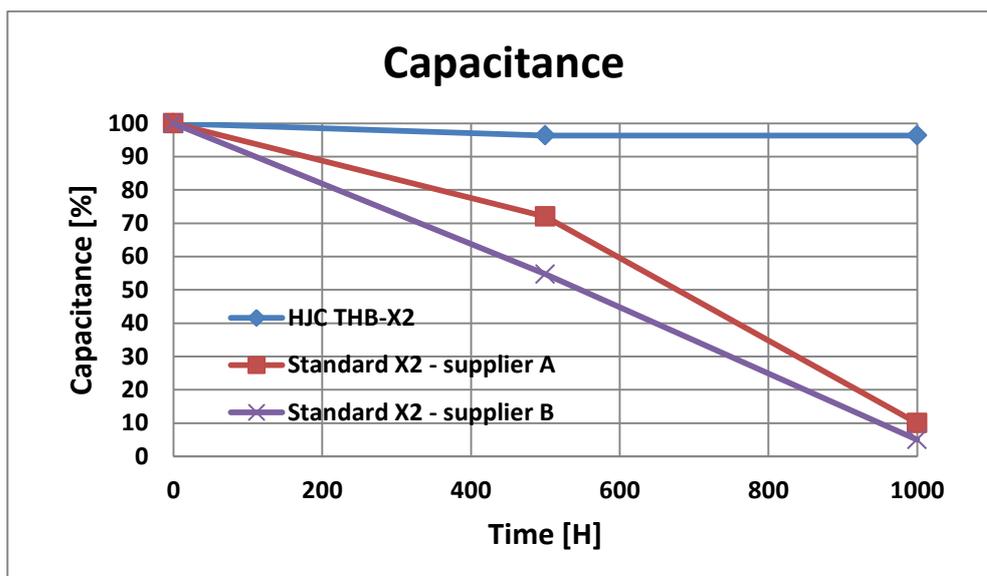
Zum einen wird dies durch entsprechende Ausfälle bei Anwendungen von X2-Kondensatoren in kapazitiven Stromversorgungen belegt. In dieser Applikation wird ein X2-Kondensator in Serie zur Netzspannung geschaltet und ist funktionskritisch für die Anwendung - im Gegensatz zu netzparallelen („across-the-line“) Filter-Anwendungen. Betroffene Anwender berichten von Extremfällen, in denen bereits nach weniger als einem Jahr ein großer Kapazitätsverlust (> 50%) von X-Kondensatoren festgestellt wurde und es daher zu Feldausfällen kam. Als Fehlerursache stellte sich eine Korrosion der Folienmetallisierung der X2-Kondensatoren aufgrund von Feuchtigkeitseinflüssen heraus.

Zum anderen kann die Anfälligkeit für solch eine klimatische Alterung aufgrund von Luftfeuchtigkeit durch einen Klimatest mit den Parametern Temperatur, Feuchtigkeit und Spannung belegt werden.

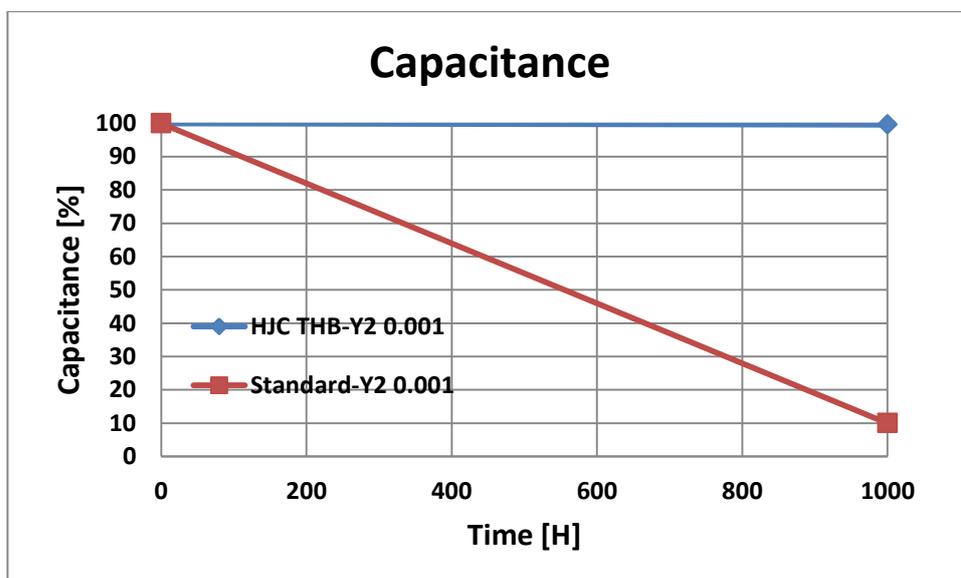
Im folgenden Beispiel wurden 10 X2-Kondensatoren der feuchtigkeitsrobusten THB-Version THB-X2 von HJC (mit  $0.68\mu\text{F}$  und  $305\text{Vac}$ ) und je 10 Kondensatoren der entsprechenden handelsüblichen X2-Ausführungen getestet. Die Testbedingungen waren  $85^\circ\text{C}$ , 85% RH und  $240\text{Vac}$  für 1000 Stunden.

Ebenso wurde der Test durchgeführt mit 10 Y2-Kondensatoren der THB-Version THB-Y2 mit  $0,001\mu\text{F}$  und  $300\text{Vac}$  von HJC sowie mit 10 entsprechenden handelsüblichen Y2-Folienkondensatoren.

Die Kapazitätswerte wurden bei Raumtemperatur nach einer Erholungszeit von 24 Stunden gemessen. Die folgenden Bilder zeigen die Mittelwerte der Kapazitätsveränderung.



**Bild 1:** THB-X2 Kondensatortyp MKP-684K0305AB1221U von HJC (X2, 0,68 $\mu$ F/305Vac in THB-Ausführung) sowie die entsprechenden handelsüblichen X2 Kondensatoren. Kapazitäts-Veränderung in einem THB-Test mit den kontinuierlichen Bedingungen 85°C Temperatur, 85% RH Feuchtigkeit und 240Vac.



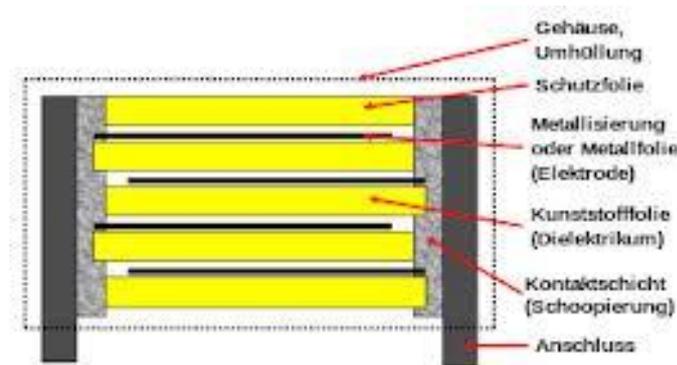
**Bild 2:** THB-Y2 Kondensatortyp Y2X1102K0300AB1101U von HJC (Y2, 0,001 $\mu$ F/300Vac in THB-Ausführung) sowie entsprechende handelsübliche Y2 Kondensatoren. Kapazitäts-Veränderung in einem THB-Test mit den kontinuierlichen Bedingungen 85°C Temperatur und 85% RH Feuchtigkeit und 240Vac.

Die Ergebnisse belegen, dass in der Praxis sowohl bei handelsüblichen X2- als auch Y2- Folienkondensatoren eine hohe Gefahr für deutliche Kapazitätsverluste bei einer gleichzeitigen Beanspruchung mit Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Spannung gegeben ist. Erfahrungen aus dem Feld zeigen, dass sich entsprechende

Auswirkungen je nach Einsatzbedingungen bereits nach wenigen Jahren (< 2-3 Jahre) einstellen können.

### Ursachen von Kapazitätsverlusten::

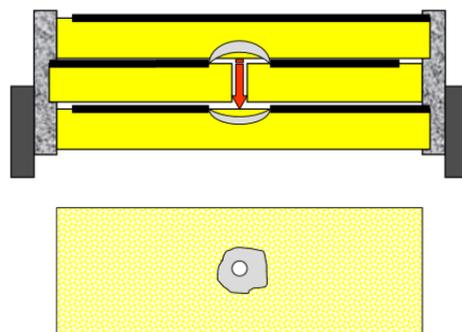
Aufbau von metallisierten Folienkondensatoren:



**Bild 3: Prinzipdarstellung des Aufbaus eines metallisierten Folienkondensators**  
(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kunststoff-Folienkondensator>)

Kapazitätsverluste eines Folienkondensators werden durch Selbstheilvorgänge sowie durch eine Korrosion der Elektroden-Metallisierung verursacht.

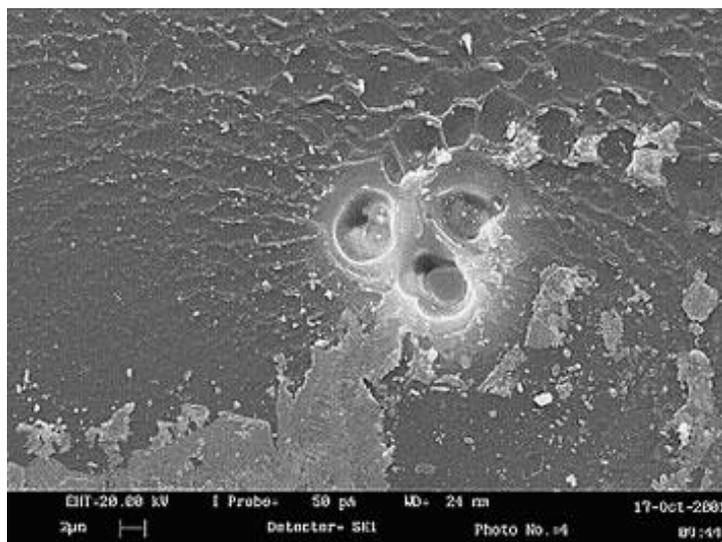
X- und Y- Folienkondensatoren sind selbstheilend. Bei einem punktuellen Kurzschluss zwischen den metallisierten Elektroden verdampfen infolge der hohen Lichtbogentemperatur sowohl das Dielektrikum in der Durchschlagstelle als auch die metallischen Folienbeläge, die nur eine Stärke von etwa 0,02 bis 0,05  $\mu\text{m}$  haben, in der Umgebung der Durchschlagstelle. Die Kurzschlussursache wird förmlich weggebrannt, wobei der entstehende Dampfdruck den Lichtbogen des Kurzschlusses auch noch ausbläst.



**Bild 4: Schematische Darstellung der Selbstheilung bei einem punktuellen Kurzschluss**

(Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/Kunststoff-Folienkondensator>)

Die Selbstheilung korreliert mit Verlust von Elektrodenoberfläche. Auftretende Kapazitätsverluste aufgrund von Selbstheilungen sind relativ gering.



**Bild 5: Selbstheilungspunkte in einem Polypropylen-Film bei starker Vergrößerung**  
(Quelle: <http://www.era.co.uk/case-studies/failure-in-metallised-polypropylene-capacitors/>)

Kommt es dagegen zu starken Kapazitätsverlusten, sind diese maßgeblich auf eine Korrosion der Folienmetallisierung aufgrund der Präsenz einer unerwünschten Feuchtigkeit zurückzuführen. Bei einem Korrosionsprozess in der Folienmetallisierung (Zink und/oder Aluminium) baut sich der Metallisierungsbelag ab, was zu einer Verdünnung der Metallschicht bis hin zu einem Verlust von Elektrodenoberfläche führt. Die Folge ist ein entsprechender Kapazitätsverlust. Die chemischen Vorgänge einer Korrosion der Metallisierung bedingt die Präsenz von Feuchtigkeit und Spannung.



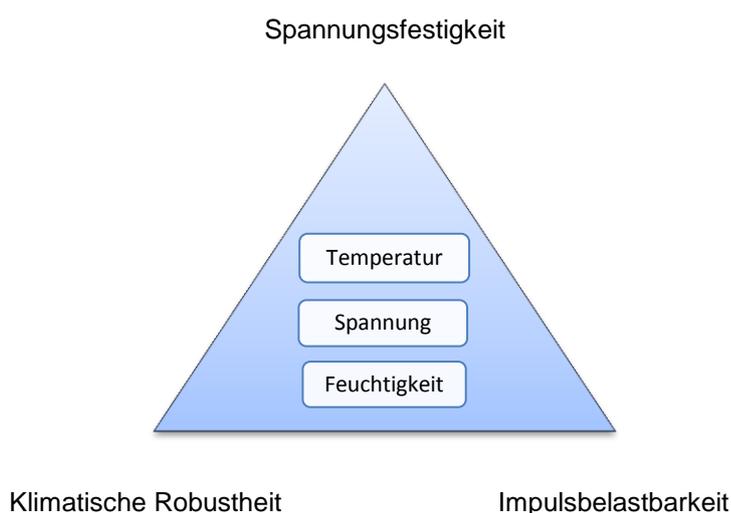
**Bild 6: Folienmetallisierung, bei der eine starke Korrosion aufgetreten ist.**

Sollte es zu einem starken Einwirken von Luftfeuchtigkeit kommen, kann dies zu einem entsprechend hohen Verlust der Elektrodenoberfläche führen. Dies führt zu einem entsprechend starken bis hin zu einem nahezu völligen Kapazitätsverlust.

Bei Präsenz von Feuchtigkeit an der Folienmetallisierung ist die Gefahr für einen korrosionsbedingten Verlust an Elektrodenoberfläche umso höher, je dünner (hochohmiger) die Metallisierungsschicht ist. Die Elektroden haben dann einem Korrosionsprozess weniger Material entgegengesetzt.

Eine zu dicke Metallisierung beeinträchtigt jedoch einen Selbstheilvorgang, da in einem Selbstheilprozess umso mehr Energie aufgewendet werden muss, je mehr Metallisierung mit hoher Energie lokal isoliert (verdampft / verbrannt) werden soll. Eine durch zu viel Energieaufwand entstehende zu große Hitze kann das Plastik-Dielektrikum beschädigen und damit die Spannungsfestigkeit des Dielektrikums reduzieren.

Für die Herstellung eines metallisierten Folienkondensators mit langer Lebensdauererwartung gilt es daher grundsätzlich, für das Dielektrikum und die Elektrodenmetallisierung den bestmöglichen Kompromiss aus geforderter Spannungsfestigkeit, Impulsfestigkeit sowie hoher Feuchtigkeitsbeständigkeit unter Beibehaltung der Selbstheilungseigenschaften zu wählen. Eine Fokussierung auf nur ein Ziel kann die anderen Ziele gefährden, da die verschiedenen Ziele unterschiedliche Dicken von Dielektrikum und Metallisierung erfordern. Daher erfordert das Design eines metallisierten Folienkondensators immer einen Kompromiss, der sämtlichen Zielen gerecht wird.



**Bild 7: Bestimmende Einflussfaktoren auf die Lebensdauer eines metallisierten Folienkondensators**

## Aktuelle IEC-Norm

In der IEC 60384-14 sind sämtliche Tests definiert, mit denen die Eignung von X- und Y- Funkenstörkondensatoren für die Verwendung nachgewiesen werden muss. Diese Norm sieht auch einen Test vor, der zum Zweck hat, die Feuchtigkeitsbeständigkeit des Kondensators zu prüfen. Jedoch entspricht dieser Test nicht den im Betrieb herrschenden Bedingungen, da er nur mit den Parametern Temperatur und Luftfeuchtigkeit durchgeführt wird, jedoch ohne Spannung. An einem Funkenstörkondensator in einem Filter auf der AC-Seite liegt hingegen permanent die Netzspannung an.

Aktuelle IEC-Norm bezüglich der Feuchtigkeitsbeständigkeit (Humidity Resistance):

### X- und Y- Funkenstörkondensatoren:

IEC 60384-14 4.12 (Damp heat)

→ 40°C, 90-95% Feuchtigkeit, mindestens 21 Tage

→ ohne Spannung!

Der chemische Vorgang einer Korrosion der Metallisierung läuft jedoch unter der Präsenz von Feuchtigkeit und Spannung beschleunigt ab. Somit kann festgestellt werden, dass eine Feuchtigkeitsbeständigkeit von X- und Y-Funkenstörkondensatoren nicht zufriedenstellend mit der Norm IEC 60384-14 4.12 (damp heat test) nachgewiesen werden kann, da dieser Test ohne Spannung erfolgt.

Eine Erklärung, warum die aktuelle IEC-Norm einen Feuchtigkeitsbeständigkeitstest ohne Spannung vorsieht, kann darin liegen, dass die Norm ursprünglich vor vielen Jahren erstellt wurde. In der Folge könnte es versäumt worden sein, das Feuchtigkeitsbeständigkeitskriterium entsprechend den Trends der Kosteneinsparung sowie der Verwendung von immer dünneren metallisierten Folien (Stichwort Miniaturisierung) zu verschärfen. Dadurch wurde es ermöglicht, zunehmend dünnere metallisierte Folien zu verwenden, ohne dass die für X- und Y-Funkenstörkondensatoren gültigen Kriterien der Spannungsfestigkeit und Impulsbelastbarkeit verletzt werden. Jedoch geht diese Entwicklung zu Lasten einer höheren Anfälligkeit der Elektroden für eine klimatische Alterung.

Ob ein Test mit Luftfeuchtigkeit, Temperatur und Spannung grundsätzlich für metallisierte Folienkondensatoren von Relevanz ist, kann dadurch überprüft werden, indem man einen entsprechenden Test mit unterschiedlichen Kondensatorarten (Aluminium-Elektrolyt-Kondensatoren, Keramikkondensatoren, Tantalkondensatoren, Folienkondensatoren) durchführt und das Ergebnis vergleicht.

Des Weiteren kann verifiziert werden, dass die Kombination aus „Temperatur & Luftfeuchtigkeit & Spannung“ bei metallisierten Folienkondensatoren zu einem

schnelleren Alterungsprozess und Kapazitätsverlust führt als die Kombination aus nur „Temperatur & Luftfeuchtigkeit“ oder aus nur „Temperatur & Spannung“.

### **Von HJC vorgeschlagener beschleunigter Lebensdauertest für X- und Y-Funkentstörkondensatoren:**

HJC hat Belege dafür gefunden, dass die Umgebungsluftfeuchtigkeit die Langzeitfunktionalität von metallisierten Folienkondensatoren beeinträchtigt. Ebenso gibt es aufgetretene Qualitätsmängel von X2- Folienkondensatoren im Feld, die eindeutig auf den Einfluss von Umgebungsluftfeuchtigkeit zurückzuführen sind.

Um die nötigen Konsequenzen aus diesen Vorfällen zu ziehen, hat HJC zwei wichtige Maßnahmen eingeleitet, um die Robustheit gegen eine klimatische Alterung und somit die Lebensdauererwartung der X2- und Y2- Funkentstörkondensatoren zu erhöhen:

- die Einführung eines neuen Designs für X2- und Y2- Funkentstörkondensatoren unter der Verwendung von Materialien mit einer niedrigeren Wasser-Diffusionsrate, verbunden mit der Erhöhung des Dampf-Diffusionswegs und der Erweiterung von Diffusionsbarrieren.
- die Einführung verschärfter Testkonditionen, um die Eignung des Kondensators zu verifizieren, von einer feuchten Umgebung unbeeinflusst zu bleiben.

Die in dem Testlabor von HJC durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass es notwendig ist, die drei Einflussfaktoren Temperatur, Feuchtigkeit und Spannung zu kombinieren, um die langfristige Robustheit des Kondensator-Aufbaus gegen eine klimatische Alterung zu überprüfen.

Ob in Filter-Anwendungen eine ausreichend robuste Ausführung der X- und Y-Funkentstörkondensatoren gewählt wurde, lässt sich durch einen beschleunigten Lebensdauertest mit folgenden Parametern nachweisen:

- **85°C, 85% Luftfeuchtigkeit, 240Vac, 1000 Stunden.**

Es gelten folgende Kriterien für ein Bestehen des Tests:

- $\Delta C/C \leq 10\%$
- $\Delta t \tan \delta / \tan \delta \leq 200\%$  Bei 1 kHz, sowie bei 10 kHz oder 100 kHz. Der Verlustfaktor bei diesen Frequenzen darf im Test maximal um den Faktor 3 ansteigen.

Die Messung des  $\tan \delta$  bei einer höheren Frequenz als 1 kHz, z.B. bei 10 kHz oder bei 100 kHz, erfolgt um die Korrosionsbeständigkeit der Schopperkontakte nachzuweisen.

Sollte ein X- oder ein Y- Folienkondensator entweder während seiner Verwendung in der Applikation oder in dem beschleunigten Lebensdauer-Test eines dieser beiden Kriterien nicht erfüllen, hat er sein Lebensdauerende (End-of-Life) erreicht. Das Lebensdauerende beschreibt den Zeitpunkt, ab welchem der Folienkondensator nicht mehr seine spezifizierten Werte erfüllt.

Entsprechend der Applikation können als Kriterien auch eine kürzere Testdauer, ein höherer Kapazitätsverlust oder ein stärkerer Anstieg des  $\tan \delta$  während der vorgesehenen Verwendungsdauer als zulässig definiert werden. Es ist dabei zu berücksichtigen, dass die Erhöhung des  $\tan \delta$  (ESR) direkt proportional zur Erhöhung der Verlustleistung und des Temperaturanstiegs des Kondensators ist. Werden die Kriterien für ein Bestehen des Tests zu groß gewählt, besteht die Gefahr, dass der erlaubte stärkere Alterungsprozess unkontrollierbare dynamische Ausmaße annimmt.

Beispiel einer geeigneten Auswertung des  $\tan \delta$  in einem Messprotokoll:

Nr	1 KHz Cs		$\Delta C / C$	tan $\delta$ 10 KHz		$\Delta \tan \delta / \tan \delta$	IR	
	Initial ( $\mu\text{F}$ )	After Test ( $\mu\text{F}$ )		Initial ( $10^{-4}$ )	After Test ( $10^{-4}$ )		Initial (G $\Omega$ )	After Test (G $\Omega$ )
1	60.36	60.83	0.78 %	117.0	162.0	38.5 %	1.25	0.64
2	60.58	60.74	0.26 %	117.0	149.0	27.4 %	1.25	0.22
3	60.38	59.66	-1.19%	120.0	154.0	28.3 %	1.32	0.54
$\bar{X}$	60.44	60.41	0.05 %	118.0	155.0	31.4 %	1.273	0.47
MAX	60.58	60.83	-0.41%	120.0	162.0	35.0 %	1.320	0.64
MIN	60.36	59.66	1.16 %	117.0	149.0	27.4 %	1.250	0.22
R	0.12	0.65	-435.18%	1.73	2.56	47.8 %	0.04	0.22

Um die Veränderungen des  $\tan \delta$  eindeutig interpretieren zu können, empfiehlt sich eine Angabe des  $\tan \delta$  in [E-4]. Gemäß den zugrunde liegenden Kriterien ist maximal eine Verdreifachung des  $\tan \delta$  während des Tests erlaubt. Wählt man eine Angabe in [E-4], so ist es im Gegensatz zu einer Angabe in [1] oder in [%] leicht nachzuvollziehen, ob dieses Kriterium erfüllt wurde.

Neben HJC praktizieren auch andere Folienkondensator-Hersteller diesen Test, der häufig THB-Test (Temperature, Humidity, Bias) oder 85/85-Test genannt wird, ebenfalls.

Dieser Test mit 85°C, 85% Luftfeuchtigkeit und Spannung für 1.000 Stunden wird bereits seit Jahren in den Qualifizierungsprozessen von Halbleitern angewandt.

Führende Hersteller von Smart Meter haben diesen THB-Test (85/85-Test) in den Qualifizierungsprozess von metallisierten Folienkondensatoren aufgenommen, nachdem es verstärkt zu Feldausfällen von X2-Kondensatoren kam, die auf eine klimatische Alterung zurückführbar waren. Mit einem Bestehen dieses Tests schließen diese Anwender gemäß dem Hallberg-Peck- Berechnungsmodell auf eine Lebensdauererwartung der getesteten Kondensatoren von 20 Jahren in ihrer Applikation.

Auch gibt es mittlerweile Automotive-Hersteller, die eine komplett bestückte Leiterplatte in einem THB-Test (85/85-Test) testen. Durch den Test wurden diese Anwender erst aufmerksam auf die Anfälligkeit von metallisierten Folienkondensatoren für eine klimatische Alterung aufgrund von Luftfeuchtigkeit.

Die herkömmlichen X2- und Y2- Funkentstörkondensatoren von HJC entsprechen der aktuellen IEC-Norm 60384-14 und bestehen diesen THB-Test nicht. Vergleichsmessungen mit anderen Herstellern sowie Untersuchungen von Kunden belegen, dass dies genauso bei den Vergleichsprodukten der meisten Wettbewerber der Fall ist. Getestete handelsübliche X1- Folienkondensatoren bestehen diesen 85/85- (THB-) Test ebenfalls nicht.

Dagegen bestehen die Funkentstörkondensatoren der THB-X2- sowie der THB-Y2-Kondensatoren von HJC diesen Test mit sehr guten Ergebnissen. Somit leisten sie einen wichtigen Beitrag zur konstanten Beibehaltung der ursprünglichen Form der Einfügungsdämpfungskurve eines elektronischen Geräts und dessen dauerhafter CE-Konformität.

### **Bedeutung von robusten Schoppierungskontakten:**

Neben einer klimatisch robusten und eine Selbstheilung erlaubende Elektroden-Metallisierung kommt der Robustheit der Schoppierungskontakte eine maßgebliche Rolle für die Lebensdauererwartung von metallisierten Folienkondensatoren zu.

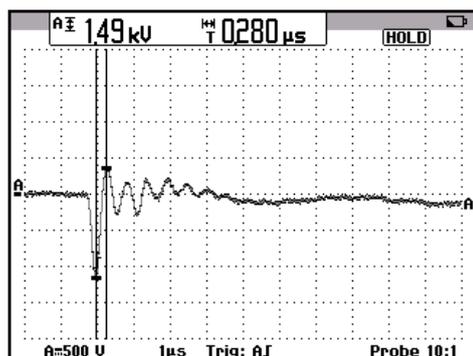
Metallisierte Folienkondensatoren besitzen die Fähigkeit, hohe Spannungs- bzw. Stromimpulse aufnehmen oder abgeben zu können. Daher müssen alle konstruktiven Teile des Folienkondensators den auftretenden Spitzenstrom bis zu einer zulässigen internen Temperaturerhöhung vertragen können. Hier sind die Kontaktbereiche der Schoopierung mit den Elektroden als eine Begrenzung der Stromtragfähigkeit zu sehen. Diese Kontaktierung besteht letztendlich aus einer Vielzahl punktförmiger Kontakte, die den kritischen Bereich des Kondensator-Innenwiderstands darstellen. Durch Stromfluss wird insbesondere in diesen Kontaktpunkten Wärme erzeugt, die punktuell zu so hohen Temperaturen führen kann, dass es zu einem Abbrennen des Kontaktes kommen kann (<http://de.wikipedia.org/wiki/Kunststoff-Folienkondensator>).

Darüber hinaus werden die Schoppierungskontakte durch eine klimatische Alterung belastet, wenn es zu einer Korrosion der Kontaktmetallisierung (z.B. Zink, Zinn, Aluminium) kommt.

X- und Y- Funkentstörkondensatoren können mit hohen  $dU/dt$ -Impulsen aus dem Versorgungsnetz belastet werden. Entsprechend der Kapazität des Kondensators führen diese  $dU/dt$ -Impulse zu hohen Stromimpulsen durch den Kondensator:

$$\text{Strom } i(t) = C \cdot dU/dt.$$

So führt ein Spannungsimpuls im Versorgungsnetz mit  $100V/\mu\text{sec}$  bei einem X2-Kondensator mit  $1\mu\text{F}$  zu einem Stromimpuls von ca.  $100A/\mu\text{sec}$ . Aufgrund der stetig ansteigenden Anzahl von nichtlinearen Verbrauchern nimmt jedoch die Verschmutzung des Versorgungsnetzes mit Störspannungen und Störströmen kontinuierlich zu. So werden im Versorgungsnetz heutzutage Spannungsimpulse von einigen  $1000V/\mu\text{sec}$  gemessen, die dann den Kondensator mit entsprechend starken Stromimpulsen belasten:



Beispiel eines Spannungsimpulses mit  $5kV/\mu\text{s}$  im

öffentlichen Stromnetz, gemessen 2013 (Quelle: [www.bajog.de](http://www.bajog.de))

Die punktförmigen Schoppierungskontakte können die Wärmeentwicklung von solch hohen Stromimpulsen umso weniger überstehen, je mehr sie bereits durch eine Korrosion aufgrund einer klimatischen Alterung vorgeschädigt sind. Wenn die Schoppierungskontakte aufgrund dieser Beschädigungen ihre Stromtragfähigkeit verlieren, steigt der ESR entsprechend an. Die Erhöhung des ESR ist direkt proportional zur Erhöhung der Verlustleistung und zum Temperaturanstieg des Kondensators. Daher müssen die Schoppierungskontakte eine hohe Robustheit gegen eine Korrosion und Stromimpulse besitzen, um nicht einen unkontrollierten Anstieg des ESR verursachen zu können.

In der Elektrodenmetallisierung selbst führen diese kurzzeitigen Stromimpulse bei einwandfrei funktionierenden Selbstheilungsvorgängen nur zu kleinen isolierten Fehlstellen, die sich in einem relativ geringen Kapazitätsverlust und Anstieg des Verlustfaktors auswirken.

Bei der Ausheilung und der Stressung der Kontakte sind hohe Energiedichten die Ursache für Veränderungen. Der Belagabbau durch Korrosion verschärft die Bedingungen, so dass die Vorgänge - einmal angestoßen - beschleunigt ablaufen.

Mit einer Messung des  $\tan \delta$  bei einer höheren Frequenz, z.B. bei 10 kHz oder bei 100 kHz, kann die Korrosionsbeständigkeit der Schoppierungskontakte nachgewiesen werden.

### **Mögliche Auswirkungen einer klimatischen Alterung oder eines Ausfalls von Funkentstörkondensatoren:**

#### **Bei X2-Folienkondensatoren:**

- Kontinuierlicher bis hin zum nahezu vollständigen Kapazitätsverlust.
- Bei Ausfall werden sie hochohmig und hängen funktionslos in der Schaltung.
- Störungen können dadurch nicht mehr kurzgeschlossen werden.
- Da der symmetrische Zweig nicht mehr belastbar ist, suchen sich Störströme einen anderen Weg.
- Wenn die symmetrische Ableitung gegen N nicht mehr gegeben ist, dann kommt es zu Asymmetrien.
- Asymmetrischer Störanteil wird größer.

**→ Verschlechterung der EMV!!**

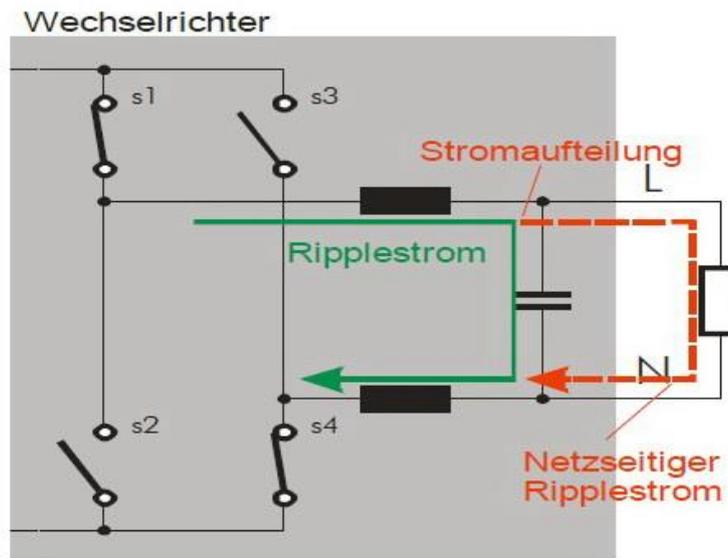
#### **Bei Y-Folienkondensatoren:**

- Kontinuierlicher bis hin zum nahezu vollständigen Kapazitätsverlust.
- Bei Ausfall werden sie hochohmig und hängen funktionslos in der Schaltung.
- Die Störungen bleiben auf dem symmetrischen Zweig, da asymmetrische Ableitung gegen Erde nicht mehr möglich ist.
- Asymmetrischer Störanteil sucht sich seinen Weg über andere Ableitmöglichkeiten, dadurch Ausbreitungen (z.B. über Gehäuse) überall.
- Störspannung und Störfeldstärke erhöhen sich.

**→ Verschlechterung der EMV!!**

Kapazitive Ableitströme entstehen als Folge von hohen Gleichtakt-Ableitströmen. Wenn sich die Kapazität eines Y-Kondensators verringert wird der Ableitstrom geringer. Dies ist jedoch nicht konstruktiv, da die asymmetrischen Störanteile durch den Y-Kondensator gezielt abgeleitet werden sollten.

### Ripple-Strom Verteilung bei Wechselrichtern, Stromversorgungen, etc...:



(Quelle: <http://www.iwes.fraunhofer.de/de/publikationen/uebersicht/2011/emv-unvertraeglichkeitenzwischenelektrizitaetszaehlernundstromr.pdf>)

Bei niedriger Netzimpedanz:

Stromverteilung aufgrund des X-Kondensators zwischen Geräteseitigem Ripplestrom und Netzseitigem Ripplestrom

Jedoch bei starker Alterung oder Ausfall des X-Kondensators:

**Netzseitiger Ripplestrom nimmt zu!!**

Wenn X- und Y- Kondensatoren altern oder ausfallen, erhöht sich die Gefahr einer Sättigung bei stromkompensierten EMV-Drosseln:

- Ableitströme sind Gleichtaktströme.
- Ableitströme verursachen Magnetisierung von stromkompensierten Drosseln.
- Bei Sättigung wirkt die Drossel nicht.
- Ist die Drossel in Sättigung, erzeugt sie Oberwellenanteile und wird zum Störer.
- Zusätzlicher Oberwellenanteil erzeugt Verluste, dadurch zusätzliche Verlustleistung des Geräts.
- NetzeingangsfILTER kann zum Störer werden, wenn die Drossel in Sättigung ist.

## **Bedeutung des richtigen Kondensator-Designs für sein Fail Safe-Verhalten und die Betriebssicherheit des Endgeräts:**

Im Internet wird von Fällen berichtet, wonach es im Betrieb zu einem explosionsartigen Aufreißen des Stahlgehäuses von PV-Wechselrichter kam. Dies wurde verursacht durch Kondensatoren auf der AC-Seite, welche Gase in das Wechselrichter-Innengehäuse freigesetzt haben, die sich dann explosionsartig durch einen Funken oder Lichtbogen entzündet haben. Die Fehlerursache bei diesen Kondensatoren ist in einer nicht einwandfrei funktionierenden Selbstheilung zu suchen.

Während eines Selbstheilungsprozesses kommt es im Kondensator für die Dauer der Selbstheilung an der betroffenen Fehlstelle der Elektrode zu einer sehr hohen lokalen Energiedichte. Diese hat an dieser Stelle eine hohe Temperatur zur Folge, welche wieder erlischt, sobald die Fehlstelle isoliert ist. Wird die Selbstheilung jedoch nicht vollständig abgeschlossen, erlischt diese Temperatur nicht und sie kann in einer Art Lawineneffekt die benachbarten Folienschichten schädigen. In diesem Prozess kann durch eine Karbonisierung des Kunststoff-Dielektrikums ein Gasgemisch freigesetzt werden, welches in Extremfällen entzündet werden kann. Um diese Sicherheitsgefährdung ausschließen zu können, ist es wichtig, dass Selbstheilprozesse einwandfrei und vollständig funktionieren.

Selbstheilprozesse können dann nicht erfolgreich abgeschlossen werden, wenn eine zu dicke Metallisierung vorliegt.

Dieser Tatsache ist unbedingt Rechnung zu tragen bei der Bestimmung der Kriterien für ein Bestehen des THB-Tests (85/85-Test). Durch die Kriterien müssen sowohl eine hohe Robustheit des Kondensators gegen eine klimatische Alterung nachgewiesen werden können, als auch einwandfrei funktionierende Selbstheilprozesse. Beide Ziele können sich widersprechen. Denn durch eine zu einseitige Fokussierung auf das Ziel einer klimatischen Robustheit kann durch die Verwendung einer zu dicken Metallisierung die Selbstheileigenschaften des Kondensators gefährdet werden.

So kann zwar einerseits eine dicke Metallisierung einem einsetzenden Korrosionsprozess mehr Material entgegensetzen. Andererseits muss bei einer dicken Metallisierung mehr Energie (Hitze) zugeführt werden, um durch eine lokale Selbstheilung die Fehlstelle in der Metallisierung zu verdampfen (verbrennen). Ein Selbstheilungsprozess muss unbedingt abgeschlossen werden können, um die dabei auftretende Hitzeentwicklung zu löschen. Eine zu dicke Metallisierung kann jedoch verhindern, dass in diesem Prozess das Metallisierungsmaterial vollständig verdampft. Die Energieentwicklung würde dann nicht gestoppt werden. Wenn dies zu einer Ausgasung führt, kann dies die Betriebssicherheit des Endgeräts gefährden.

Aus diesem Grund ist es wichtig, bei einem THB-Test nicht nur die Veränderung der Kapazität zu betrachten. Es ist aus Gründen der Betriebssicherheit ebenso wichtig,

den Anstieg des Verlustfaktors  $\tan \delta$  gemäß den geschilderten Kriterien zu verifizieren. Nur wenn der Anstieg des  $\tan \delta$  bei Überlast unter Kontrolle bleibt, kann es nicht zu einem unkontrollierten Anstieg des ESR und der Verlustleistung mit der Folge eines unkontrollierten Anstiegs der Kondensator-Temperatur kommen. Zu einer Ausgasung aus dem Kondensator kann es kommen, wenn sich der Kondensator im Betrieb über die thermische Zersetzungstemperatur des Kunststoff-Dielektrikums erhitzt. Diese liegt bei Polyester bei ca. 235°C und bei Polypropylen bei ca. 220°C.

Der Ausfallmodus des Kondensators muss ein Fail Safe-Verhalten zeigen. Dies beinhaltet, dass der Kondensator im Betrieb niemals so heiß werden kann, dass es zu einer Ausgasung kommen kann. Dies ist dann gewährleistet, wenn der Kondensator entsprechend seiner Anwendungsbelastungen und seiner Lebensdauererwartung korrekt dimensioniert ist und seine Selbstheilungseigenschaft einwandfrei funktioniert.

## **Fazit**

Der wirksamen Entstörung eines elektronischen Geräts über seine gesamte Lebensdauer hinweg kommt sowohl in Bezug auf seine Emission als auch auf seine Immunität eine immer größere Bedeutung zu. Ansonsten wird es kein reibungsloses Nebeneinander der zunehmenden Anzahl von elektronischen Geräten am Stromnetz geben.

Für eine dauerhaft zuverlässige Entstörung eines Endprodukts über seine gesamte Lebensdauer hinweg ist die stabile Einhaltung der spezifizierten Kapazitätswerte der X- und Y- Funkenstörkondensatoren von großer Bedeutung. Jedoch belegen Laborversuche und Feldausfälle deren Anfälligkeit für eine klimatische Alterung aufgrund von Feuchtigkeitseinflüssen.

Ein Kapazitätsverlust der X- und Y- Kondensatoren hat Folgen für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) eines elektronischen Geräts. Es besteht dadurch die Gefahr, dass die gültigen Grenzwertkurven nicht mehr eingehalten werden und dann die CE-Konformität des elektronischen Gerätes nicht mehr gegeben ist.

Für Hersteller von elektronischen Geräten wird es daher zunehmend wichtig, dass die verwendeten X- und Y- Funkenstörkondensatoren ihre spezifizierten Eigenschaften über die gesamte Lebensdauer des Endprodukts hinweg zuverlässig erfüllen.

X- und Y- Folienkondensatoren sind keine statischen Bauelemente, sie unterliegen vielmehr Alterungsprozessen. Die von betroffenen Kunden durchgeführte Fehler-Ursachen-Analyse von vorzeitig im Feld ausgefallenen Folien-

Funkentstörkondensatoren zeigt eindeutig, dass der Hauptgrund von Feldausfällen in einer Korrosion der Folienmetallisierung begründet liegt.

Die aktuelle Norm 60384-14 für Funkentstörkondensatoren erweist sich im als nicht ausreichend, um zuverlässig die klimatische Robustheit eines Kondensators in der Applikation zu überprüfen. Im Punkt 4.12 wird zur Überprüfung der Feuchtigkeitsbeständigkeit nicht die gleichzeitige Kombination der tatsächlich in der Praxis vorzufinden Einsatzparameter berücksichtigt.

Daher empfiehlt es sich, nur solche X- und Y- Funkentstörkondensatoren einzusetzen, die nachweislich eine ausreichende Robustheit gegen die gleichzeitige Beanspruchung durch Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Spannung besitzen. Darüber hinaus müssen sie bei Überlastung eine einwandfrei funktionierende Selbstheilung sowie eine Fail Safe-Eigenschaft besitzen.

Für die Überprüfung der klimatischen Robustheit unter Berücksichtigung der Selbsttheileigenschaften der zur Verwendung vorgesehenen X- und Y- Funkentstörkondensatoren wurde in diesem Whitepaper ein geeigneter Test (THB-Test, 85/85-Test) vorgestellt.

Den Erkenntnissen von betroffenen Kunden zufolge ist das aktuelle Risiko groß, eine ungenügende Kapazitätsstabilität von X- und Y- Funkentstörkondensatoren in der Praxis vorzufinden, obwohl diese Kondensatoren die aktuelle Norm IEC 60384-14 erfüllen. Für den Anwender empfiehlt es sich daher zur Qualitätssicherung seines Endprodukts, den hier vorgestellten beschleunigten Lebensdauertest in den eigenen Bauteile-Qualifizierungsprozess aufzunehmen.

Mit der Erfüllung der Testkriterien belegen die X- und Y- Funkenstörkondensatoren ihre Eignung, in Filteranwendungen die gleiche Lebensdauer zu erreichen wie die dort eingesetzten Drosseln. Das betreffende elektronische Gerät wird somit während seiner gesamten Lebensdauer durch das EMV-Filter zuverlässig und unter Vermeidung einer unzulässigen Kapazitätsdegradation der X- und Y- Funkentstörkondensatoren sicher entstört.

Autoren: Han Chi Mi / Entwicklungsleiter HJC  
Dieter Burger / Vertriebsbüro Europa

## **ENTWURF**