APPLICATION NOTE

ANP123 | Lang- und kurzfristige Spannungsabhängigkeit von ferroelektrischen Klasse 2 MLCCs

Dr. René Kalbitz, Frank Puhane

ABSTRACT

Wir geben einen Überblick über den physikalischen Hintergrund der spannungsabhängigen Kapazität von Klasse 2 Keramik-Vielschichtkondensatoren (Multilayer Ceramic Capacitors, MLCC) und stellen Modelle für diese Abhängigkeit vor. Es können zwei Prozesse unterschieden werden, die sowohl zu einer unmittelbaren als auch zu einer langfristigen Kapazitätsänderung unter anliegender Gleichspannung führen. Beide Prozesse hängen mit den ferroelektrischen Eigenschaften von Klasse - 2 - Materialien zusammen. Der unmittelbare Prozess hängt mit der Umorientierung der Dipole innerhalb der Domänenstruktur des Materials zusammen. Der Ursprung des Langzeit-Gleichspannungseffekts, der in der Wissenschaft noch diskutiert wird, hängt wahrscheinlich mit der Bewegung der Domänenwände zusammen. Außerdem werden wir den Einfluss der beiden Prozesse auf die Anwendung von MLCCs erörtern.

01. MOTIVATION UND HINTERGRUND

Für den Design-In-Prozess ist es üblich geworden, Simulationssoftware wie SPICE einzusetzen. Der Entwickler kann Dateien für keramische Vielschichtkondensatoren (MLCCs) in die Software laden, um den Einfluss des Spannungs- und Frequenzverhaltens der MLCCs auf die Schaltung zu simulieren. Um diese Simulation rechnerisch effizient zu gestalten, ist es notwendig, elegante mathematische Modelle für die MLCCs zu implementieren.

In diesem Dokument wird kurz der physikalische Hintergrund der spannungsabhängigen Kapazität von Klasse 2 MLCCs erläutert. Außerdem wird die Entwicklung des mathematischen Polarisationsmodells beschrieben, das sich für die Implementierung von Simulationssoftware eignet. Ferroelektrizität ist eine der wichtigen dielektrischen Eigenschaften, die Keramiken aufweisen können. Sie beschreibt die Eigenschaft eines Materials, ohne Anlegen eines elektrischen Feldes elektrische Dipole zu bilden. Ferroelektrizität tritt nur in Kristallen auf, die eine Einheitszelle ohne Symmetriezentrum haben, d. h. eine nicht-zentrosymmetrische Form aufweisen. [1] [2] [3] [4] [5]

In einem ferroelektrischen Material wie Bariumtitanat bilden alle direkten und indirekten Nachbarzellen die oben erwähnten Dipole aus, welche in dieselbe Richtung zeigen. Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte Darstellung der Bariumtitanat-Einheitszelle mit einem permanenten Dipol.

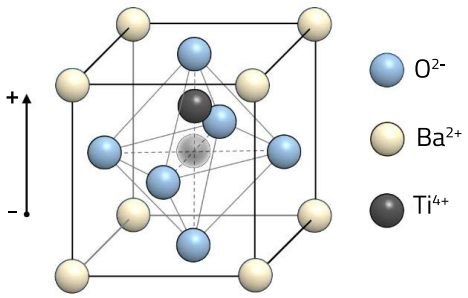


Abbildung 1: Konfiguration der Bariumtitanat-Einheitszelle unterhalb der Curie-Temperatur. Das Titan-Ion ist von der Mitte der Einheitszelle entlang der vertikalen Achse verschoben. Die Verschiebung ist permanent und wird durch innere Spannungen in der Einheitszelle verursacht

Die Ausrichtung benachbarter Dipole ist das Ergebnis einer Gesamtenergiereduzierung aufgrund von Dipol-Dipol-Wechselwirkungen. Das Ferroelektrikum versucht, eine Domänenkonfiguration zu erreichen, die die Gesamtenergie minimiert und gleichzeitig die elektrostatischen und mechanischen Randbedingungen erfüllt. [6] In einem idealisierten System würden alle Dipole im kristallinen Material gemeinsam in eine Richtung zeigen. Reale Materialien weisen jedoch immer kleinere Unvollkommenheiten auf, die dazu führen, dass die kollektive Ausrichtung der Dipole auf Bereiche beschränkt ist, welche als Domänen bezeichnet werden. Die Größe der Domänen, die Kristallkonfigurationen an den Domänengrenzen und die Ausrichtung der Dipole innerhalb der Domänen beeinflussen die Polarisierbarkeit und damit die Dielektrizitätskonstante des Materials. [7] [8] Deshalb zeigen MLCCs, die aus verschiedenen Rohstoffen hergestellt werden, ein unterschiedliches ferroelektrisches Verhalten. [1] [9] [10]

Oberhalb der Curie-Temperatur, die für jedes ferroelektrische Material spezifisch ist, wird diese kollektive Ausrichtung zerstört. In dieser Phase sind die Dipole zufällig ausgerichtet und das Material weist paraelektrische Eigenschaften auf. [11]

Ferroelektrische Materialien zeigen immer ein gewisses Maß an paraelektrischem Verhalten. Paraelektrizität kann auch durch chemische Zusätze hervorgerufen werden, die defekte Stellen einführen und somit die Bildung von Domänen verhindern.
Im Vergleich zu anderen Materialien haben Ferroelektrika wie Bariumtitanat eine hohe Polarisierbarkeit und damit eine hohe relative Permittivität. MLCCs auf Bariumtitanatbasis haben den Vorteil, dass sie geringe Verluste mit hoher Kapazität und kleiner Bauform kombinieren. Diese Eigenschaft macht MLCCs zu einem der wichtigsten passiven Bauelemente für Schaltwandler- und Filteranwendungen. [10]
Der Nachteil der großen Kapazität in ferroelektrischen MLCCs ist die oben erwähnte Spannungsabhängigkeit, die zu einer nachteiligen Abnahme der Kapazität mit steigender Gleichspannung führt. Im weiteren Verlauf dieses Artikels werden wir zunächst die Polarisationsprozesse erklären und dann ein Modell entwickeln, das die spannungsabhängige Kapazität beschreiben soll.

02. EXPERIMENTELLE DETAILS

Vor den Messungen wurden alle Kondensatoren (885012209073) mindestens 1 Stunde lang bei 150 °C getempert. Die anschließende Abkühlungszeit betrug 24 h. Alle Messungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

Für die Hysterese- und zeitabhängige Messung wurde das LCR-Meter E4980A von Keysight in Verbindung mit dem Prüfadapter 16034G verwendet. Die Wechselspannungsamplitude des LCR-Meters betrug V_{rms} = 1 V und die entsprechende Abtastfrequenz 1 kHz. Die konstante Signalamplitude wird durch die Automatic Level Control gewährleistet, welche den Spannungspegel am Prüfling überwacht und den Spannungspegel an der Quelle anpasst.

03. UNMITTELBARE POLARISATIONSEFFEKTE BEI KAPAZITÄTS-SPANNUNGS-MESSUNGEN

Ferroelektrische Polarisation ist gut erforscht und soll hier kurz dargestellt werden. [1][9][13] Das Polarisationsverhalten ferroelektrischer Materialien hängt vom aktuellen Polarisationszustand ab, wie anhand der Kapazitäts-Spannungs- und Polarisationsspannungs-Diagramme eines 10 µF MLCC (X7R Klasse 2) in Abbildung 2 gezeigt wird. Die Wahl fiel auf diesen Kondensator, da er eine ausgeprägte Gleichspannungsabhängigkeit aufweist, die für diese Art Kondensator typisch ist.

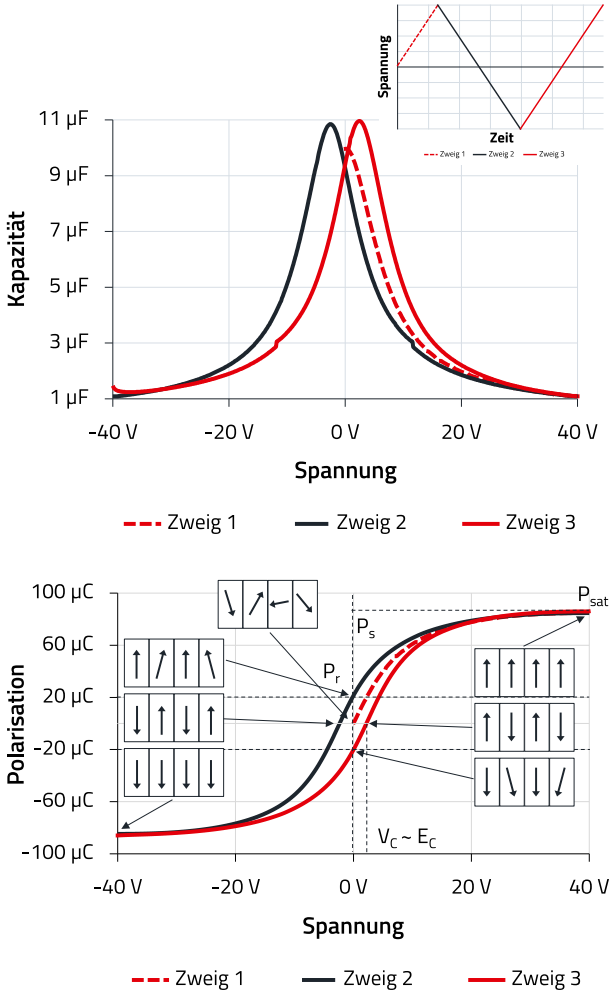


Abbildung 2: Gemessene Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik von 10 µF MLCC für einen Gleichspannungszyklus, dargestellt in der beigefügten Grafik. UNTEN: Polarisations-Spannungs-Kennlinien mit entsprechender schematischer Darstellung der Dipolausrichtung

Während der Messung wird die Kapazität des Kondensators mit einem Sinus-Abtastsignal der Frequenz f gemessen. Die Wechselspannungs-Messkurve hat während der gesamten Messung eine feste Amplitude und bewirkt eine periodische Änderung der Spannung dV. Dem Sinussignal wird eine Gleichspannung überlagert, die eine Umorientierung der Domänenpolarisation ermöglicht. Diese Neuausrichtung findet in einer Zeitspanne von deutliche weniger als einer Sekunde statt und ist somit ein unmittelbarer Polarisationseffekt.

Zweig 1:
Der Kondensator mit zufällig verteilter Domänenpolarisation wird mit dem Prüfsignal belastet (Abbildung 2). Mit zunehmender Gleichspannung richten sich die Dipole schließlich aus, was zu einer erhöhten Polarisation führt. Die Sättigungspolarisation ist erreicht, wenn alle Dipole in die

Richtung des äußeren elektrischen Feldes (Gleichspannung) zeigen.Mit zunehmender Spannung richten sich die Dipole aus und die Dipolbewegung wird stärker eingeschränkt, was zu einer geringeren Ladungsänderung dq führt. Folglich nimmt die Kapazität C = dq / dV mit zunehmender Gleichspannung ab.

Wenn das angelegte externe Feld E, welches proportional zur angelegten Spannung ist, die Mehrheit der Domänen ausgerichtet hat, bleiben die Dipole auch ohne das externe Feld in dieser Position. Die kollektive Ausrichtung erzeugt ein internes stabilisierendes Koerzitivfeld, E_c. Wenn das angelegte elektrische Feld zunimmt, nimmt die auch die Gesamtpolarisation aufgrund anderer Polarisationseffekte wie elektronischer, ionischer und dipolarer Art zu.

Die Polarisation bei maximaler Spannung wird als Sättigungspolarisation P_{sat} bezeichnet. Im Prinzip ist die spontane Polarisation P_s gleich der Sättigungspolarisation der auf die Feldstärke Null extrapolierten elektrischen Verschiebung.

Zweig 2:
Wenn die Spannung und damit das externe Feld von positiv auf negativ wechselt, entspannen sich die Dipole leicht, bleiben aber aufgrund des internen Koerzitivfeldes E_c in ihrer allgemeinen Polarisationsrichtung. Der Polarisationszustand bei null Volt wird als remanente Polarisation P_r bezeichnet. Ein entgegen gerichtetes äußeres elektrisches Feld muss E_c überschreiten, um alle Domänen in die entgegengesetzte Richtung umzuorientieren. An der Position von E_c ist die Belastung der Dipole am geringsten, so dass die Permittivität (Suszeptibilität) des Materials am größten ist und die Kapazität ein lokales Maximum aufweist. Mit zunehmender Polarisierung in die entgegengesetzte Richtung sinkt die Kapazität auf den gleichen Wert wie bei positiven Spannungen.

Zweig 3:
Wechselt die Spannung von negativ nach positiv, richten sich die Dipole wieder aus, wenn das von außen angelegte Feld das Koerzitivfeld übersteigt. Dies führt wiederum zu einer Kapazitätsspitze bei niedrigen positiven Spannungen. Der Vorgang ist ähnlich wie der zuvor beschriebene. Zweig 3 ist ähnlich wie Zweig 2, nur dass er entlang der x - Achse zu positiven Spannungen hin verschoben ist.

Die oben beschriebene Hysterese erfordert die Unterscheidung zwischen den Polarisationen bei Spannungsdurchläufen von positiv nach negativ und umgekehrt. Im weiteren Verlauf bezeichnet daher, $P^+(E)$ die Polarisation (Zweig 2) für Spannungsdurchläufe von positiven zu negativen und $P^-(E)$ (Zweig 3) die Polarisation für Spannungsdurchläufe von negativen zu positiven Spannungen.

Jede Erhöhung der Gleichspannung führt also zu einer Abnahme der Kapazität. Die Kapazität nimmt jedoch weiter ab, wenn die Dauer des Anlegens der Gleichspannung zunimmt. Diese weitere Abnahme hängt mit der verzögerten Bewegung der Domänenwände zusammen, die durch Domänenwand-Pinning verursacht wird. [14] [15] [16] [17] [18] Die Bewegung der Domänenwände findet auf einer längeren Zeitskala statt als die anfängliche Neuausrichtung der Dipole, die auf einer Zeitskala von weit unterhalb einer Sekunde erfolgt. [19] Die Bewegung der Domänenwände führt im Allgemeinen zu einer zusätzlichen schrittweisen Abnahme der Kapazität um bis zu 20%, die sich über einen Zeitraum von bis zu 1000 Stunden vollziehen kann. [14] [15]

Neben der Bewegung der Domänenwand kann bei einigen reinen Bariumtitanatverbindungen ein feldinduzierter Phasenübergang auftreten [20] [21].
Während dieses Prozesses erfährt die Einheitszelle eine strukturelle Veränderung, die zur Bildung eines permanenten Dipols führt. Diese Art von Phasenübergang verursacht bereits beim ersten Sweep (Zweig 1) einen Peak in den Kapazitäts-Spannungs-Messungen, der dem bei der Umorientierung der Dipole (in Zweig 2 und 3) ähnlich ist. Der Ursprung des Peaks ist also nicht die Neuausrichtung der Dipole, sondern die Rekonfiguration der Einheitszelle zumindest in einigen Teilen des Materials. Ein solches Verhalten ist bei der hier gezeigten Messung nicht sichtbar, kann aber bei anderen Messungen auftreten.

Die Physik ferroelektrischer und paraelektrischer Materialien ist in der wissenschaftlichen Literatur gut erörtert, was eine solide Grundlage für die Entwicklung eines Modells bietet, das für technische Anwendungen wie die Simulation elektrischer Schaltungen geeignet ist [1] [13] [22] [23]. Die Parameter beziehen sich auf messbare und physikalisch sinnvolle Größen wie remanente und spontane Polarisation.
Ein Modell, das von einem idealen Polarisationsverhalten ausgeht [13], ist:

$$C(V) = (a - C_S) \cdot \operatorname{sech}^C\left(\frac{V - V_C}{b}\right) + C_S \qquad (1)$$

mit C_S als quasi-linearem Beitrag zur Kapazität (spannungsunabhängiger rein kapazitiver Teil), V_C als Koerzitivspannung ($V_C \propto Ec$), a als Faktor, der proportional zur Sättigungspolarisation ist, b als Faktor, der mit der Breite der glockenförmigen Kurve zusammenhängt, und c als

Steigungsformfaktor. Der Vorteil dieses Modells besteht darin, dass a, b, C_S und V_C direkt aus den Messdaten abgeleitet werden können, d. h. es ist keine Anpassung erforderlich. C_S ist die Kapazität bei der maximalen Spannung, (a - C_S) ist die Höhe des Maximums (max. von C(V)), V_C ist die Position des Maximums und b kann aus C(V) mit dem Kehrwert der hyperbolischen Sekante berechnet werden.

Ob das ursprünglich von Miller et al. [13] veröffentlichte Polarisationsmodell auf ersten Prinzipien beruht oder nicht, ist an dieser Stelle nicht von Bedeutung. Relevant ist die numerische Einfachheit, da die Parameter eindeutig mit charakteristischen Merkmalen der gemessenen Daten in Verbindung gebracht werden können. Dies führt dazu, dass die Menge der Parameter relativ klein ist und leicht aus der Messung abgerufen werden kann.
Abbildung 3 zeigt eine C - V - Messung eines 10 µF Klasse 2 MLCC, die mit aufeinanderfolgenden Spannungsdurchläufen gemessen wurde, zusammen mit dem Fit der Gleichung (1).

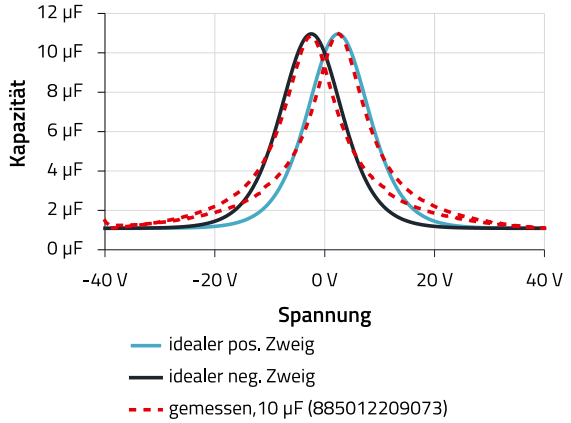


Abbildung 3: Gemessene Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie von 10 µF MLCC mit dem entsprechenden Fit von Gleichung 1. Dimensionslose numerische Fit-Parameter a = 10,85; b = 1,3; c = 0,17; C_S = 1,09; V_C = 2,5

Obwohl der Fit nicht perfekt ist, werden insbesondere die Merkmale zwischen - 10 V und + 10 V durch das Modell gut beschrieben. Die beiden sichtbaren Spitzen des positiven und negativen Zweigs treten auf, wenn das äußere Feld die Koerzitivfeldstärke erreicht und eine Umkehrung der Dipolorientierung bewirkt. In diesem Moment haben die Dipole eine große Beweglichkeit, d.h. die Ladungsänderung ist groß. Daher hat die Kapazität an dieser Stelle ein lokales Maximum. [1]

04. AUSWIRKUNGEN DER ALTERUNG AUF KAPAZITÄTS-SPANNUNGS-MESSUNGEN

Ein Langzeiteffekt, der auch als Alterung oder sekundärer Prozess bezeichnet wird, führt mit der Zeit zu einer weiteren Abnahme der Kapazität. Über den genauen Ursprung dieser langfristigen Kapazitätsabnahme wird in der Literatur seit vielen Jahren diskutiert. [24] [25] [26] [27] [28]

Um zwei von mehreren möglichen Erklärungen zu nennen: Einige schlagen vor, dass die Verringerung der dielektrischen Dielektrizitätskonstante auf den Dielektrizitätskonstantenunterschied zwischen zwei Domänen mit einer Ausrichtung von 90 ° zueinander zurückzuführen ist. [15] Es wird argumentiert, dass sich die Domänen mit 90 ° Polarisierung mit der Zeit entlang des angelegten Feldes ausrichten. Da die Domänen mit 90 °-Polarisation eine höhere Polarisierbarkeit aufweisen als die parallel zum angelegten Feld verlaufenden Domänen, nimmt die Gesamtleitfähigkeit ab, wenn die um 90 ° polarisierten Domänen neu ausgerichtet werden.

Andere schlagen vor, dass der Effekt auf den verringerten Beitrag der Domänenwandregion selbst zurückzuführen ist [16] und argumentieren, dass Domänenwandregionen eine vergleichsweise große Polarisierbarkeit aufweisen und dass die Verringerung der Wände zu einer Abnahme der Gesamtpolarisierbarkeit und damit der Gesamtpermittivität, d. h. der Kapazität, führt.

Beide Erklärungen stehen im Zusammenhang mit der verzögerten Bewegung der Domänenwände, die durch Domänenwand-Pinning verursacht wird [14] [15] [16] [17]. Dieser Effekt führt zu einer weiteren allmählichen Abnahme der Kapazität bei angelegten Gleichspannungen über einen Zeitraum von Stunden. Da die Bewegung der Domänenwände ein wesentlicher Prozess in mehreren Erklärungen ist, lohnt es sich, ihn im Folgenden zu betrachten.

Abbildung 1 zeigt eine vereinfachte Einheitszelle mit einer kubischen Struktur. Durch strukturelle Spannungen innerhalb des Gitters und/oder angelegte elektrische Felder kann die Einheitszelle gedehnt und gekippt werden. Dies ermöglicht nicht nur die Verschiebung des Ti-Ions entlang dieser einen vertikalen Achse, wie in Abbildung 1 dargestellt, sondern auch entlang anderer Richtungen, was zu Domänen führt, die Polarisationen in einem Winkel von 90 ° zueinander aufweisen, wie in Abbildung 4 zu sehen ist. [24] Die Grenzen zwischen diesen Domänen, auch 90 °-Domänenwände genannt, sind Regionen mit höherer Polarisierbarkeit als die Domänen selbst. [18]

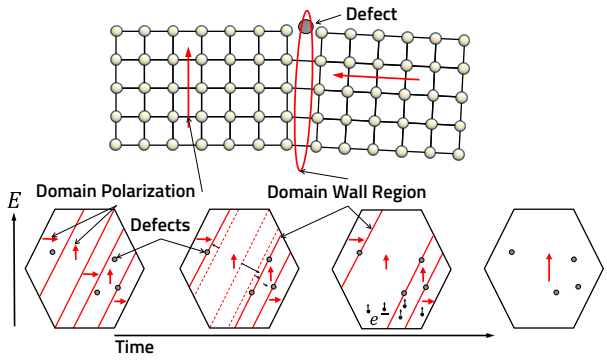


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Defektstelle im Gitter (oben) und vereinfachte Darstellung des langfristigen Prozesses der Bewegung der Domänenwand unter Anlegen eines elektrischen Feldes von ihrem Ausgangszustand (unten links) bis zu ihrem Endzustand (unten rechts)

Diese Domänenwände stabilisieren ihre Position an Defektstellen, d. h. an Defektdipolen. Durch das kontinuierliche Anlegen eines Gleichstromfeldes werden Elektronen bewegt, um die Defektdipole mit der Zeit zu beseitigen. Dies verstärkt die Bewegung der Domänenwände, um die um 90 ° polarisierten Domänen von $BaTiO_3$ in Richtung des elektrischen Feldes auszurichten.

Auf weitere Erklärungsvorschläge für den langfristigen Prozess wollen wir hier nicht eingehen. Die Forscher haben sich noch nicht auf eine einheitliche Erklärung für den Alterungsprozess geeinigt. Unabhängig davon, welcher Prozess die Kapazitätsabnahme verursacht, ist es für die praktische Anwendung wichtiger, wie groß der Effekt tatsächlich ist und wie er beschrieben wird. Der Langzeiteffekt ist beispielhaft an einem 10 µF MLCC (PN: 885012209073) mit einer Nennspannung von 50 V in Abbildung 5 dargestellt.

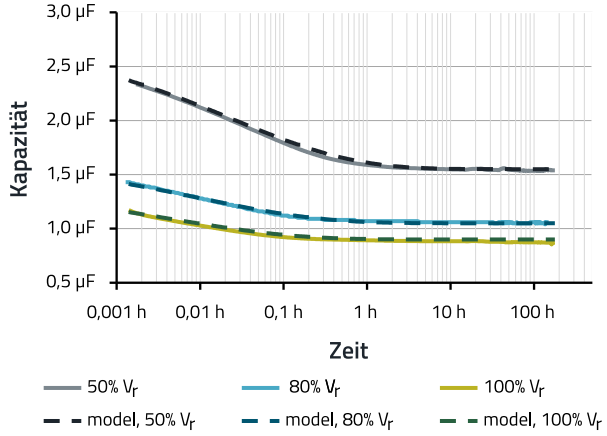


Abbildung 5: Gemessene Kapazität in Abhängigkeit von der Zeit für drei verschiedene Gleichspannungen. (Messfrequenz f = 1 kHz) Die Messung beginnt 10 Sekunden nach dem Anlegen der Gleichspannung. Die Abnahme der Kapazität ist auf den langfristigen Polarisationsprozess zurückzuführen

Die Kapazitäts-Zeit-Kurven werden bei 100%, 80% und 50% der Nennspannung des Kondensators über einen Zeitraum von etwa 160 h gemessen. Die Messung beginnt etwa 10 Sekunden nach Anlegen der Gleichspannung. Die Diagramme zeigen deutlich, dass die Kapazität insgesamt umso stärker abnimmt, je größer die Gleichspannung ist. In diesem Beispiel wird die Sättigungskapazität nach etwa 1 Stunde erreicht. Bei anderen Beispielen wird die Sättigung nach 10 Stunden erreicht. [14] [15] Nach dieser Zeit bleibt die Kapazität nahezu konstant oder nimmt noch langsamer ab. Es ist erwähnenswert, dass die Abnahme relativ zur Nennspannung aufgrund des Langzeitprozesses weniger ausgeprägt ist als beim initialen Prozess. Die relative Kapazität in Abbildung 6 zeigt, dass die Kapazitätswerte bereits zwischen 23% (50% von V_R) und 12% (100% von V_R) beginnen.

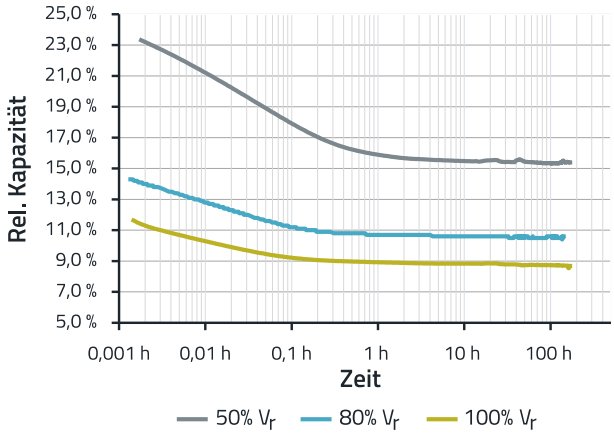


Abbildung 6: Gemessene relative Kapazität in Abhängigkeit von der Zeit für drei verschiedene Gleichspannungen in Bezug auf V_R. (Messfrequenz f = 1 kHz) Vergleich mit Abbildung 5

Die langfristige Abnahme beträgt in diesem Beispiel etwa 3% für 100% von V_R, 4% für 80% von V_R und 8% für 50% von V_R. Diese Änderung liegt unter der Produktionstoleranz von ± 10%. Je niedriger die Gleichspannung ist, desto größer ist die zusätzliche Kapazitätsabnahme.

Selbst bei sehr geringer oder gar keiner Gleichspannung nimmt die Kapazität des MLCC über einen Zeitraum von etwa 1000 Stunden um etwa 10% bis 20% (bezogen auf die Nennkapazität) ab. [15] [28] [29] Dies ist ein typisches Verhalten für diese Kondensatortechnologie, obwohl es je nach Korngröße oder chemischen Zusätzen des verwendeten Keramikmaterials zu leichten Abweichungen zwischen verschiedenen Produkten kommen kann. [15] [16] [19] Die Kapazitätsabnahme ist sowohl spannungs- als auch temperaturabhängig. Aus experimenteller Sicht ist es daher mühsam, alle Parameter über einen so langen Zeitraum zu messen. Als vorsichtige und praktische Faustregel kann man

jedoch eine weitere Kapazitätsabnahme von 10% für Spannungen über 50% von V_R und von 20% für Gleichspannungen unter 50% von V_R ansetzen.
In einigen Unterlagen oder Veröffentlichungen wird die relative Änderung nicht in Bezug auf V_R sondern auf den verringerten Kapazitätswert nach dem unmittelbaren Prozess angegeben. Dies hat den Effekt, dass die relative Änderung aufgrund des Langzeitprozesses zahlenmäßig größer erscheint. Eine solche Darstellung mag in dem einen oder anderen Fall gerechtfertigt sein; sie vernachlässigt jedoch die Kapazitätsabnahme aufgrund der Auswirkungen des ersten unmittelbaren Vorgangs. Daher liefern solche Darstellungen keine Informationen über die Gesamtkapazitätsabnahme und können daher vom Elektroingenieur nicht direkt für die Berechnung der effektiven Kapazitäten verwendet werden.
Ein Modell des Langzeiteffekts auf die Kapazität, bezogen auf physikalisch messbare Parameter, ist

$$C_I(t) = (C_0 - C_\infty) \cdot \mathrm{Exp}\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^{\alpha}\right] + C_\infty \qquad (2)$$

mit $C_0 = C(V)$ als Kapazität zu Beginn des Langzeitprozesses, C_∞ als Sättigungskapazität (am Ende des Langzeitprozesses), τ als charakteristische Zeit sowie α als Formfaktor. [14] [26] Die Praktikabilität des Modells wird beispielhaft an den Messungen in Abbildung 5 mit den in Tabelle 1 aufgeführten Parametern demonstriert.

	α	τ	C_0	C_∞
50% V_R	0,3	0,025	2,8	1,55
80% V_R	0,3	0,010	1,68	1,05
100% V_R	0,3	0,005	1,4	0,9

Tabelle 1: Parameter, die für die Anpassung der Kapazitätsmessungen in Abbildung 5 verwendet wurden

05. FAZIT UND FOLGERUNG FÜR DAS DESIGN-IN

Nach der Einführung in die Ferroelektrizität haben wir den sofortigen und langfristigen Effekt der Gleichspannung auf die Kapazitätsmessungen diskutiert. Die Kapazitätsabnahme durch die initialen Prozess ist größer als bei dem anschließenden Langzeitprozess. Bei niedrigeren Spannungen wird der Langzeiteffekt jedoch immer deutlicher. Daher müssen beide Effekte beim Design-in berücksichtigt werden. Es hat sich gezeigt, dass die Effekte durch mathematische Modelle gut beschrieben werden können. Da sich beide Modelle auf physikalisch sinnvolle Parameter beziehen, sind sie gut geeignet, um im Design-in zur Berechnung der tatsächlich nutzbaren Kapazität verwendet zu werden.

Für die Schaltungsentwicklung ist es daher notwendig, die anwendungsspezifische Gleichspannungslast sowie die Betriebszeit zu kennen, um die richtige Wahl der MLCC zu treffen. Die beste Strategie besteht darin, die Kapazitätsabnahme mit einzukalkulieren und die Nennspannung oder Kapazität entsprechend über zu dimensionieren. Dazu ist es erforderlich, das tatsächliche Größe der kurz- und langfristigen Kapazitätsabnahme zu kennen. Dazu können entweder Näherungswerte aus der Literatur, aktuelle Messungen oder Modelle, wie sie in den LTspice-Bibliotheken von Würth Elektronik implementiert sind, verwendet werden. Die genannten LTspice-Modelle basieren auf tatsächlichen Messungen und modellieren den Kurzzeiteffekt für jedes spezifische Bauteil.
Um den Langzeiteffekt zu berücksichtigen, ist es praktisch, eine weitere Kapazitätsverringerung von 10% für Spannungen über 50% von V_R und 20% für Gleichspannungen unter 50% von V_R hinzuzufügen. Die Tatsache, dass dieser Langzeitprozess auch spannungslos abläuft, ist für Anwendungen mit langen Ausschaltzeiten relevant. Bei Bauteilen mit langen Lagerzeiten vor der eigentlichen Bestückung und Lötung würde er sich jedoch nicht negativ auswirken, da die Löttemperaturen oberhalb der Curie-Temperatur liegen.

DANKSAGUNG

Besonderer Dank gilt den technischen Experten Eric Fischer sowie Jon Izkue Rodriguez von Würth Elektronik, die sowohl Messungen als auch technische Unterstützung geleistet haben.

A Anhang

A.1 Literatur

[1] R. C. Buchanan (ed.), Ceramic Materials for Electronics, Third Edition, CRC Press Taylor & Francis Ltd (2018)

[2] M.J. Pan, A Brief Introduction to Ceramic Capacitors, DEIS Feature Article, IEEE Electrical Insulation Magazine, pp. 44-50 (2010)

[3] A. von Hippel, Ferroelectricity, Domain Structure, and Phase Transitions of Barium Titanate, Reviews of Modern Physics, 22, 221-237 (1950)

[4] G.H. Haertling, Ferroelectric Ceramics: History and Technology, Journal of American Ceramic Society, 82, 797-818 (1999)

[5] P. Popper, Ceramic Dielectrics and their Applications to Capacitors for Use in Electronic Equipment, Proceedings of the IEE - Part IIA: Insulating Materials, 100, 229-238 (1953)

[6] B. G. Potter Jr. et al, Monte Carlo simulation of ferroelectric domain structure: Electrostatic and elastic strain energy contributions, AIP Conference Proceedings 535, 173 (2000)

[7] K. Uchino, Ceramic Actuators: Principles and Applications, MRS Bulletin, 80, 42-48 (1993)

[8] G. Arlt et al., Domain configuration and equilibrium size of domains in BaTiO3 ceramics, 51, 4956-4960 (1980)

[9] W. Geng et al., Temperature dependence of ferroelectric property and leakage mechanism in Mn-doped Pb(Zr0.3 Ti0.7)O3 films, Ceramics International, 47:17, 24047-24052 (2021)

[10] K. Hong et al., Perspective and challenges in multilayer ceramic capacitors for next generation electronics, J. Mater. Chem. C, 7, 9782-9802 (2019)

[11] M. Peddigari et al., Linear and Nonlinear Dielectric Ceramics for High-Power Energy Storage Capacitor Applications, Journal of the Korean Ceramic Society 56:1 (2018)

[12] W.S. Ohm, Control of Electromechanical Properties of Multilayer Ceramic Capacitors for Vibration Reduction, Journal of the American Ceramic Society, 1001, 1982-1990 (2018)

[13] S.L. Miller et al., Modeling ferroelectric capacitor switching with asymmetric nonperiodic input signals and arbitrary initial conditions, Journal of Applied Physics, 70:2849-2860 (1991)

[14] T. Tsurumi et al., Mechanism of Capacitance Aging under DC Electric Fields in Multilayer Ceramic Capacitors with X7R Characteristics, Japanese Journal of Applied Physics, 44, 6989 (2005)

[15] T. Tsurumi et al., Mechanism of capacitance aging under DC-bias field in X7R-MLCCs. J Electroceram 21, 17–21 (2008)

[16] T. Teranishi et al., Domain contribution to the aging characteristics in BaTiO3 ceramics, Jpn. J. Appl. Phys., 58:SLLC03 (2019)

[17] J. Guyonnet, Ferroelectric Domain Walls - Statics, Dynamics, and Functionalities Revealed by Atomic Force Microscopy, Springer Cham, Springer Theses (2014)

[18] S. Wada et al., DomainWall Engineering in Barium Titanate Single Crystals for Enhanced Piezoelectric Properties, Ferroelectrics, 334, 17–27 (2006)

[19] Y. Li et al., Switching dynamics of ferroelectric HfO2 -ZrO2 with various ZrO2 contents, Appl. Phys. Lett. 114:14, 142902 (2019)

[20] J. E. Daniels et al., Electric-field-induced phase transformation at a lead-free morphotropic phase boundary: Case study in a 93% (Bi0.5 Na0.5) TiO3 – 7% BaTiO3 piezoelectric ceramic, J. Appl. Phys. 95, 032904 (2009)

[21] T Iamsasri et al., Time and frequency-dependence of the electric field-induced phase transition in BaTiO3 -BiZn1/2 Ti1/2 O3, J. Appl. Phys. 122, 064104 (2017)

[22] K. M. Johnson, Variation of Dielectric Constant with Voltage in Ferroelectrics and Its Application to Parametric Devices, Journal of Applied Physics, 33:9, 2826-2831 (1962)

[23] Y. Zhang, Electric Field-Dependent Dielectric Properties and High Tunability of Porous Ba0.5 Sr0.5 TiO3 Ceramics, J. Am. Ceram. Soc., 90:4, 1327–1330 (2007)

[24] A. Pramanick et al., Domains, Domain Walls and Defects in Perovskite Ferroelectric Oxides: A Review of Present Understanding and Recent Contributions, Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences, 37:4, 243-275 (2012)

[25] Y. A. Genenko et al., Mechanisms of aging and fatigue in ferroelectrics, Materials Science and Engineering: B, 192, 52-82 (2015)

[26] T. Tybell et al., Domain Wall Creep in Epitaxial Ferroelectric Pb(Zr0.2Ti0.8)O3 Thin Films, Phys. Rev. Lett. 89, 097601 (2002)

[27] K.H. Härdtl, Electrical and Mechanical Losses in Ferroelectric Ceramics, Ceramics International, 8:4 (1982)

[28] K W Plessner, Ageing of the Dielectric Properties of Barium Titanate Ceramics, Proceedings of the Physical Society, Section B, 69:12, 1261-1268 (1956)

[29] S. Sato et al., A Study on Capacitance Aging in Ni-Electroded, BaTiO3-Based MLCCs with X7R Characteristics. Key Engineering Materials, 157-158, 17–24 (1998)

WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE" genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von www.we-online.com heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfällen ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.

Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

NÜTZLICHE LINKS

Application Notes
www.we-online.com/appnotes

REDEXPERT Design Platform
www.we-online.com/redexpert

Toolbox
www.we-online.com/toolbox

Produkt Katalog
www.we-online.com/products

KONTAKT INFORMATION

appnotes@we-online.com
Tel. +49 7942 945 - 0

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG
Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany
www.we-online.com

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
a	2024/12/03	Ursprüngliche Version der Application Note
b	2026/11/06	Korrektur der Bildbeschreibung von Abbildung 1

Hinweis: *Die aktuelle Version des Dokuments und das Veröffentlichungsdatum sind in der Fußzeile jeder Seite dieses Dokuments angegeben.*