

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2



Dr. René Kalbitz

ABSTRACT

Nach einer Einführung in die Ferroelektrizität wird aus einem Dipolpolarisationsmodell ein mathematisches Modell für das Kapazitäts-Spannungs-Verhalten von keramischen Mehrschichtkondensatoren (Eng.: Multilayer Ceramic Chip Capacitors, MLCCs) abgeleitet. Die Parameter des Modells werden auf zwei Anpassungsparameter reduziert. Um die Praxistauglichkeit zu demonstrieren, wird das Modell anhand von Messungen an einer Auswahl von **MLCCs** aus dem Portfolio von Würth Elektronik getestet. Da das Integral des Kapazitäts-Spannungs-Modells mathematisch nur grundlegende trigonometrische Ausdrücke enthält, kann es leicht in Software implementiert werden, die Funktionen der Ladung anstelle der Kapazität benötigt, wie z.B. die Simulationssoftware Spice. Des Weiteren wird gezeigt, dass das Modell zur Beschreibung der Kapazitätsspektren von MLCCs bei unterschiedlichen Gleichspannungen verwendet werden kann.

01. MOTIVATION UND HINTERGRUND

Es ist inzwischen üblich, für den Entwurfsprozess von Schaltungen Simulationssoftware wie zum Beispiel Spice zu verwenden. Der Entwickler kann Dateien für keramische Vielschichtkondensatoren (MLCCs) in die Software laden, um den Einfluss des Spannungs- und Frequenzverhaltens der MLCCs auf seine Schaltung zu simulieren. Um diese Simulation rechnerisch effizient zu gestalten, ist es notwendig, elegante Modelle für die MLCCs zu implementieren.

In diesem Artikel geben wir einen kurzen Überblick über den physikalischen Hintergrund der spannungsabhängigen Kapazität von Klasse-2-MLCCs. Darüber hinaus beschreiben wir die Entwicklung eines mathematischen Polarisationsmodells, das sich zur Implementierung in Simulationssoftware eignet.

Eine wichtige dielektrische Eigenschaft, die Keramik aufweisen kann, ist die Ferroelektrizität. Dabei beschreibt die Ferroelektrizität die Eigenschaft eines Materials, ohne Anlegen eines elektrischen Feldes elektrische Dipole zu bilden. Ferroelektrizität tritt nur in Kristallen auf, die eine

Elementarzelle ohne Symmetriezentrum, d. h. eine nicht-zentrosymmetrische Form, aufweisen. ^{[1][2][3][4][5]}

In einem ferroelektrischen Material bilden alle direkten und indirekten Nachbarzellen die bereits erwähnten Dipole, welche in dieselbe Richtung zeigen. Die Ausrichtung benachbarter Dipole ist ein Ergebnis der Energiereduktion aufgrund von Dipol-Dipol-Wechselwirkungen. Das Ferroelektrikum versucht, eine Domänenkonfiguration zu erreichen, die die Gesamtenergie minimiert, während es sowohl elektrostatische als auch mechanische Randbedingungen erfüllt. ^[6] In einem idealisierten System würden alle Dipole innerhalb eines kristallinen Materials in eine gemeinsame Richtung zeigen. Reale Materialien weisen jedoch immer kleine Fehler auf, wodurch die gemeinsame Orientierung der Dipole auf Bereiche beschränkt wird, 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 Permittivität des Materials. ^{[7][8]} Dies ist der Grund, warum MLCCs, die aus verschiedenen Rohstoffen hergestellt werden, ein unterschiedliches ferroelektrisches Verhalten aufweisen. ^{[1][9][10]}

Oberhalb der Curie-Temperatur, die für jedes ferroelektrische Material spezifisch ist, wird diese gemeinsame Ausrichtung zerstört. In dieser Phase sind die Dipole zufällig ausgerichtet und weisen keine Domänenstruktur mehr auf. Unter diesen Bedingungen zeigt das Material paraelektrische Eigenschaften. ^[11] Ferroelektrische Materialien zeigen auch immer bis zu einem gewissen Grad paraelektrisches Verhalten. Paraelektrizität kann auch durch chemische Zusätze hervorgerufen werden, die Defekte in die Kristallstruktur einführen und somit die Bildung von Domänen verhindern.

Eine Verbindung, die zur Herstellung von MLCCs verwendet wird und eine nicht-zentrosymmetrische Struktur aufweist, ist Bariumtitanat. Abbildung 1 zeigt die Elementarzelle von Bariumtitanat, in der das positiv geladene Titanion bezüglich des Zentrums (in dieser Darstellung) leicht nach oben verschoben ist. Somit ist die Elementarzelle auf der "Oberseite" etwas positiver und auf der "Unterseite" etwas

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

negativer geladen. Da der permanente elektrische Dipol mit angelegten Feldern in Wechselwirkung steht, ist die Polarisierbarkeit und damit die Permittivität solcher Materialien spannungsabhängig. [7][12]

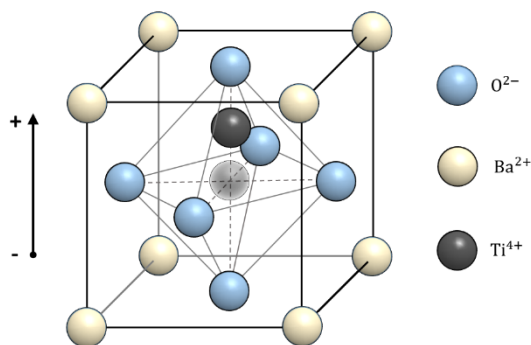


Abbildung 1: Konfiguration der Elementarzelle von Bariumtitanat unterhalb der Curie-Temperatur. Das Titanion ist aus dem Zentrum der Elementarzelle verschoben

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 Schaltwandlerschaltungen und Filteranwendungen. [10]

Der Nachteil der großen Kapazität in ferroelektrischen Klasse-2-MLCCs ist die oben erwähnte Spannungsabhängigkeit, die zu einer nachteiligen Abnahme der Kapazität bei steigender Gleichspannung führt. Im weiteren Verlauf dieses Artikels werden wir erstens die Polarisationsprozesse erklären und zweitens ein Modell entwickeln, welches die spannungsabhängige Kapazität beschreiben soll.

02. INTERPRETATION VON KAPAZITÄTS-SPANNUNGS-MESSUNGEN

Die 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 in Abbildung 2 gezeigten Kapazitäts-Spannungs- und Polarisations-Spannungs-Diagramme eines 10 µF MLCC (Klasse 2) erläutert werden soll.

Während der Messung wird eine sinusförmige Abtastwelle mit der Frequenz f angelegt, um die Kapazität des Kondensators zu messen. Die Wechselstromsignalform hat während der gesamten Messung eine feste Amplitude und bewirkt eine periodische Änderung der Spannung dV . Dem

Sinussignal wird eine Gleichspannung überlagert, welche die Neuausrichtung der Domänenpolarisation ermöglicht.

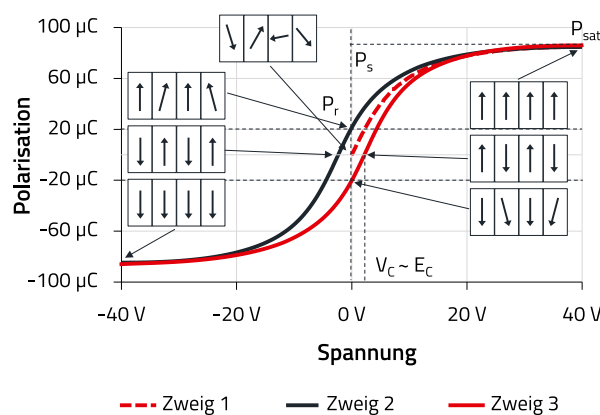
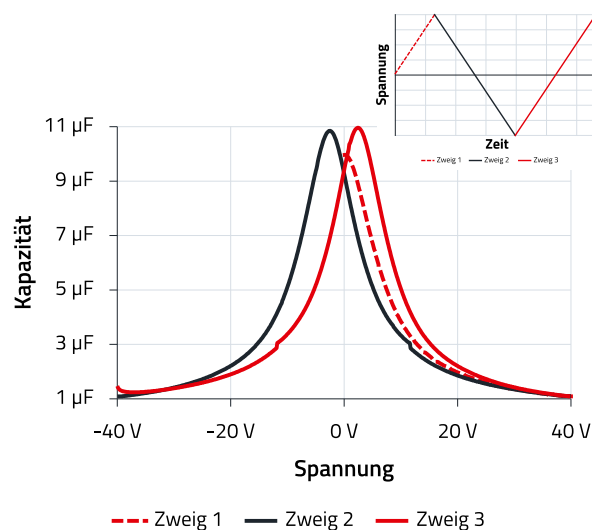


Abbildung 2: Oben: Gemessene Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik von 10 µF MLCC für einen Spannungszyklus, dargestellt in der eingefügten Kurve. UNTEN: Polarisations-Spannungs-Kennlinien mit entsprechender schematischer Darstellung der Dipolausrichtung

Zweig 1:

Der Kondensator mit zufällig ausgerichteter Domänenpolarisation wird dem Prüfsignal ausgesetzt. Mit zunehmender Gleichspannung richten sich die Dipole schließlich aus, was zu einer Zunahme der Polarisation (Abbildung 2). Die Sättigungspolarisation ist erreicht, wenn alle Dipole vollständig ausgerichtet sind. Wenn die Spannung erhöht wird, 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

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

Feld in dieser Position. Die kollektive Ausrichtung erzeugt ein stabilisierendes internes Koerzitivfeld, E_c . Wenn das angelegte elektrische Feld weiter erhöht wird, nimmt die Gesamtpolarisation aufgrund anderer Polarisierungseffekte wie elektronischer, ionischer und dipolarer Art zu.

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

Zweig 2:

Wenn die Spannung und damit das externe Feld von positiv auf negativ umgeschaltet wird, 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 Polarisierung P_r bezeichnet.

Um alle Domänen in die entgegengesetzte Richtung umzuorientieren, muss E_c durch ein umgekehrtes äußeres elektrisches Feld überschritten werden. An der Stelle 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:

Wird die Spannung von negativ zu positiv gewechselt, orientieren sich die Dipole wieder neu, sobald das von außen angelegte Feld das Koerzitivfeld übersteigt. Dies führt wiederum zu einer Kapazitätsspitze bei positiven Spannungen. Der Vorgang ist ähnlich wie der zuvor beschriebene. Branch 3 ist ähnlich zu Branch 2, nur dass er entlang der x-Achse zu positiven Spannungen hin verschoben ist.

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

Jede Erhöhung der Gleichspannung (jenseits des Koerzitivspannung/Koerzitivfeld) führt zu einer Verringerung der Kapazität. Die Kapazität nimmt jedoch mit zunehmender Dauer des Anlegens der Gleichspannung weiter ab. Diese

weitere Abnahme hängt mit der verzögerten Bewegung der Domänenwände zusammen, die durch Domänenwand-Pinning verursacht wird. ^{[14][15][16][17]}

Die Bewegung der Domänenwände findet auf einer längeren Zeitskala statt als die anfängliche Neuausrichtung der Dipole, die auf einer Zeitskala von weniger als einer Sekunde erfolgt. ^[19] Die Bewegung der Domänenwand führt im Allgemeinen zu einer zusätzlichen allmählichen Abnahme der Kapazität um bis zu 20 %, die sich über einen Zeitraum von bis zu 1000 Stunden vollziehen kann. ^{[14][15]}

Dieser Langzeiteffekt soll an dieser Stelle nur der Vollständigkeit halber erwähnt werden, um die Komplexität von Gleichstrommessungen zu verdeutlichen. Der Übersichtlichkeit halber wird jedoch der Schwerpunkt auf die unmittelbare Gleichstromabhängigkeit gelegt.

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

Sowohl die Bewegung der Domänenwand als auch der feldinduzierte Phasenübergang führen zu einer gewissen Diskrepanz zwischen dem Ausgangszustand und der tatsächlich gemessenen Kurve.

03. MATHEMATISCHES MODELL DER FERROELEKTRISCHEN POLARISATION

Im folgenden Abschnitt wird ein teilphänomenologisches Polarisationsmodell für Kapazitäts-Spannungs-Messungen vorgestellt. Entsprechende mathematische Details finden sich in dem Anhang unter "Alternatives mathematisches Modell". ^[13] Die Parameter des Modells sind auf messbare und physikalisch sinnvolle Größen wie remanente und spontane Polarisierung bezogen.

Die Physik ferroelektrischer und paraelektrischer Materialien ist in der wissenschaftlichen Literatur gut erörtert und bietet eine solide Grundlage für die Entwicklung eines Modells, das

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

für technische Anwendungen wie die Simulation elektrischer Schaltkreise geeignet ist. [1][13][22][23]

Ein Modell, das von einem idealen Polarisationsverhalten ausgeht, ist: [13]

$$C(V) = (a - C_s) \operatorname{sech}^2\left(\frac{V - V_c}{b}\right) + C_s \quad (1)$$

mit C_s als linearem Beitrag zur Kapazität (spannungsunabhängiger rein kapazitiver Teil), V_c als Koerzitivspannung ($V_c \propto E_c$), a als Faktor, der proportional zur Sättigungspolarisation ist, und b als Faktor, der sich auf die Breite der glockenförmigen Kurve bezieht. Wie in Abschnitt 8 erörtert, beruht dieses Modell auf idealen Annahmen wie vollständiger Polarisation, einem homogenen elektrischen Feld und einer homogenen Dipolverteilung auf der Grundlage einer homogenen Materialzusammensetzung. Der Vorteil dieses Modells ist, dass a , b , C_s und V_c direkt aus den gemessenen Daten abgeleitet werden können, d. h. es ist keine Anpassung (Fitting) erforderlich. C_s ist die Kapazität bei der maximalen Spannung, $(a - C_s)$ ist die Höhe des Peaks (max. von $C(V)$), V_c ist die Position des Peaks und b kann aus $C(V)$ mit dem Kehrwert der hyperbolischen Sekante berechnet werden (siehe Anhang unter "Alternatives mathematisches Modell").

Ob das ursprünglich von Miller et al. [13] veröffentlichte Polarisationsmodell axiomatisch oder phänomenologisch ist, ist an dieser Stelle nicht von Bedeutung. Relevant ist die numerische Einfachheit, da sich die Parameter eindeutig auf charakteristische Merkmale der Messdaten beziehen lassen. Dies führt dazu, dass die Menge der Parameter relativ klein ist und leicht aus der Messung abgeleitet werden kann.

Abbildung 3 zeigt eine C-V-Messung eines 10 μF Klasse-2-MLCC, die mit aufeinanderfolgenden Spannungsabtastungen gemessen wurde, zusammen mit einer gefitteten Gleichung (1). Obwohl die Fit-Funktion 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, so dass die Kapazität an dieser Stelle ein lokales Maximum aufweist. [1]

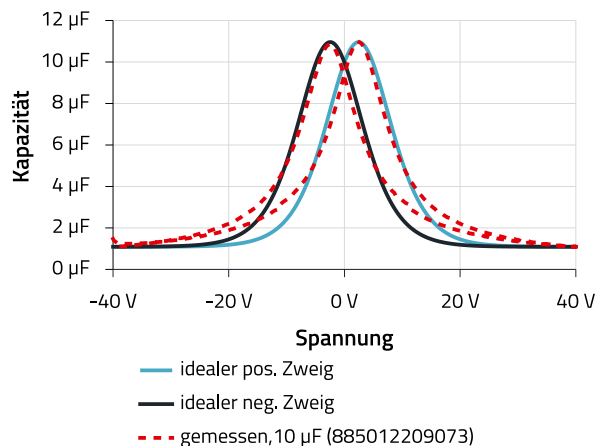


Abbildung 3: Gemessene Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie von 10 μF MLCC mit der entsprechenden Fit-Funktion von Gl. (1). Numerische Fit-Parameter: $a = 10,85$, $b = 7,5$, $C_s = 1,09$, $V_c = 2,5$

Bei der Messung eines handelsüblichen MLCC wie in Abbildung 3 bildet die obige Funktion $C(V)$ das Gesamtverhalten ab. Übersteigt die Spannung jedoch $|\pm 10 \text{ V}|$, ist die gemessene Kapazität größer als die vom Modell berechnete. Der Grund für diese Diskrepanz könnte das inhomogene elektrische Feld sein, das durch die ineinandergreifende Elektrodengeometrie des MLCC, die inhomogene Materialzusammensetzung sowie das verzögerte Schaltverhalten aufgrund von Domänenwand-Pinning/Switching verursacht wird. [14][15] Der MLCC besteht also aus Materialanteilen, die ein unterschiedliches Spannungsverhalten oder ferroelektrisches Verhalten zeigen. Theoretisch wäre es möglich, MLCCs als eine Überlagerung der Gleichung (1) zu modellieren

$$C_p = \sum_i a_i \operatorname{sech}^2\left(\frac{V - V_{ci}}{b_i}\right) \quad (2)$$

wobei jeder der vorgenannten Materialanteile, gekennzeichnet durch Index i , durch eine Reihe von Parametern a_i , V_{ci} und b_i dargestellt wird. Gleichung (2) ist ein physikalisch gültiger Ansatz, macht jedoch eine Anpassung aufwendig und damit unpraktisch für ein großes Portfolio von MLCCs. Außerdem wäre es sehr zeitaufwendig, diese Funktion in die Simulationsdatei zu implementieren und diese Datei in der Simulationssoftware auszuführen.

In der Praxis ist es für die Modellierung der meisten Messungen ausreichend, drei Summanden zu verwenden.

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

$$C_p = \left(\frac{a^*}{a_0} \right) \left[\operatorname{sech}^2 \left(10 \frac{V-V_c}{7 \cdot b} \right) + \frac{b}{30} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{V - \frac{V_{\max}}{8} + V_c}{2 \cdot b} \right) + \frac{b}{30} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{V + \frac{V_{\max}}{8} - V_c}{2 \cdot b} \right) \right] - C_s \cdot \frac{h}{10} \quad (3)$$

mit V_{\max} als maximaler Spannung, h als ungesättigtem Korrekturfaktor für C_s , $a^* = C_s \cdot (h/10 - 1) + a$ als effektive Peakhöhe und mit

$$a_0 = 1 + 2 \frac{b}{30} \operatorname{sech}^2 \left(\frac{V_{\max}}{2 \cdot b} \right), \quad (4)$$

als Normalisierungsfaktor, der die zusätzliche Verschiebung durch die drei Terme korrigiert. C_p besteht also aus einem Hauptbeitrag (erster sech^2 -Term) und zwei breiteren Nebenbeiträgen (zweiter und dritter sech^2 -Term), die in festen Abständen links und rechts vom Hauptbeitrag positioniert sind, wie in Abbildung 4 beispielhaft für den Branch 3 gezeigt. Der Offset $-C_s \cdot h/10$ korrigiert den rein kapazitiven Beitrag. Da in den meisten Fällen die Spannung für ein vollständiges Polarisationsereignis nicht ausreicht, wurde der Faktor $h/10$ eingeführt, um den ungesättigten Dipolbeitrag zu berücksichtigen.

Es hat sich gezeigt, dass die spezifische Wahl der Parameter/Faktoren, welche die Spannungsverschiebung, die Breite und die Höhe der Sekundärbeiträge berücksichtigen, zu guten Ergebnissen bei einer Reihe von Messungen führt. Die Faktoren können, falls erforderlich, noch weiter angepasst werden. Gleichung (3) erhebt nicht den Anspruch auf alleinige Allgemeingültigkeit.

Zum Nachweis der praktischen Anwendbarkeit des Modells gemäß Gl. (3), ist eine Auswahl von Fit-Ergebnissen in Tabelle 2 (Anhang) aufgeführt. Die Fit-Funktion führt zu relativen Fehlern im quadratischen Mittel von etwa 1 % oder weniger, was immer noch deutlich unter der Kapazitätstoleranz von 10 % liegt.

Gleichung (3) hat den Vorteil, dass die Fit-Parameter auf b und h reduziert werden. Die anderen Parameter können direkt aus der Kapazitäts-Spannungs-Messung abgeleitet werden. Der Parameter V_{\max} ist die maximale Spannung, die während der Abtastspannung mit $C_s = C(V_{\max})$ angelegt wird. Die Parameter a und V_c sind der Wert des lokalen Maximums und dessen Position. Bei reinen, vorgewärmten Proben, die keine oder nur eine geringe spontane Polarisation aufweisen, kann $V_c = 0$ gesetzt werden.

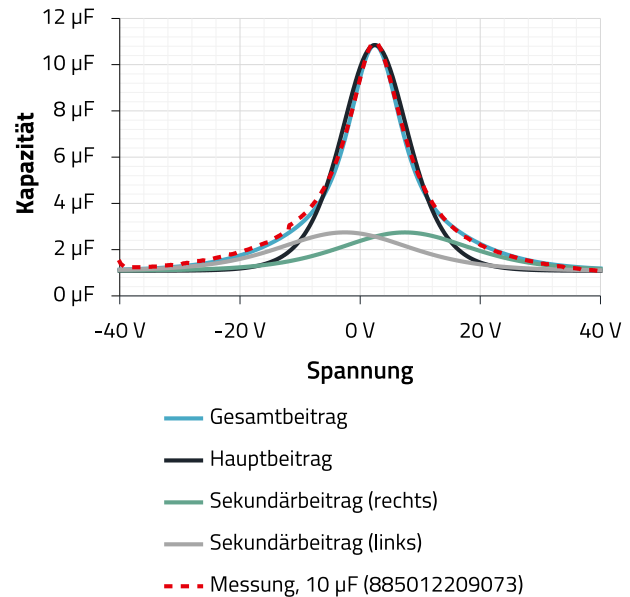


Abbildung 4: Gemessene Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie von 10 µF MLCC mit der entsprechenden Fit-Funktion von Gl. (5) und dem zugehörigen Beitrag, z.B. den Summanden. Dimensionslose numerische Fit-Parameter: $a=10,85$, $b=7,3$, $V_{\max}=40$, $C_s=1,09$, $V_c=2,45$ and $h=0,01$

Folglich kann

$$C(V) = C_p + C_s \quad (5)$$

zum Fitting des Kapazitäts-Spannungs-Verhaltens eines großen Portfolios von MLCCs verwendet werden. In Tabelle 2 sind die Fit-Parameter zusammen mit dem mittleren quadratischen relativen Fehler für eine Auswahl von MLCCs aufgeführt.

Bitte beachten Sie, dass ein zusätzlicher, weiter vereinfachter mathematischer Ansatz für $C(V)$, der dem hier vorgestellten gleichwertig ist, im Anhang vorgestellt wird. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird er in der folgenden Diskussion nicht berücksichtigt.

Für die Implementierung der mathematischen Modelle in einigen Simulationsprogrammen, wie z. B. LTSpice, ist eine Funktion der Polarisation, d. h. eine Ladungsgleichung, erforderlich (siehe Anhang)

$$\Delta q = \int C(V) dV \quad (6)$$

Da das Integral von sech^2 -Funktionen Tanh-Funktionen ergibt, die in den meisten Skriptsprachen verfügbar sind, ist die Implementierung der angepassten Gleichung (5) in Simulationssoftware gut umsetzbar.

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

04. EXPERIMENTELLE DETAILS

Vor den Messungen wurden alle Kondensatoren mindestens 1 Stunde lang bei 150 °C vor-formiert. Die anschließende Abkühlzeit betrug 24 h. Alle Messungen wurden bei Raumtemperatur durchgeführt.

Für die C-f-Messungen wurde der Impedanzanalysator E4990A von Keysight in Verbindung mit dem Prüfadapter 16034E verwendet. Die Amplitude der Wechselspannung des Impedanzanalysators, die der Gleichspannung überlagert wurde, betrug $V_{rms} = 0.250$ V. Die Vorlaufzeit für die parametrische Gleichspannung, die während des Frequenzdurchlaufs angelegt wurde, betrug 20 h.

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.

05. IMPLEMENTIERUNG: AUSGANGSZUSTAND DER POLARISATION UND MESSBEDINGUNG

Zusätzlich zur Messzeit ist es erforderlich, den Anfangszustand der Polarisation zu bestimmen. Wie oben erläutert, hängt die Spannungsabhängigkeit der Kapazität vom Anfangszustand der Polarisation ab, der im Anwendungsfall nicht bekannt ist.

Für die produktionsseitige Datenerfassung wurden die Fitting-Daten von unbenutzten MLCC-Chargen gewonnen, die über die Curie-Temperatur vorgewärmt wurden. Daher ist für das Modell in Gl. (5) die Spannungsverschiebung $V_c = 0$.

Der Ausgangszustand ist bei Verbundwerkstoffen aus Bariumtitanat möglicherweise nicht leicht zu definieren, da je nach Zusammensetzung einige einen feldinduzierten Phasenübergang aufweisen können. Wie in Abschnitt 2 erläutert, führt ein solcher Prozess bereits während des ersten Abtastvorgangs (nachdem die Probe angelassen wurde) zu einem Peak in der Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie.

Außerdem kann die Bewegung der Domänenwand zu leichten Schwankungen der Kapazitäts-Spannungs-Charakteristik in Abhängigkeit von der Abtastgeschwindigkeit führen. In der Praxis ist dieses Phänomen schwer zu kontrollieren. Die Kapazitäts-Spannungs-Scans von zwei MLCCs mit identischer Teilenummer können daher je nach den genauen Messbedingungen sowie leichten Unterschieden in ihrer chemischen und strukturellen Zusammensetzung voneinander abweichen.

06. IMPLEMENTIERUNG: FREQUENZ- UND SPANNUNGSABHÄNGIGES MODELL

In den vorangegangenen Abschnitten haben wir hauptsächlich die Spannungsabhängigkeit des Modells diskutiert. Für Filter- und Umrichteranwendungen ist es jedoch wichtig, dass das Modell auch das Frequenzverhalten korrekt beschreibt. Typischerweise wird die Impedanz von Kondensatoren mit

$$Z(\omega, V) = R_{ESR} + (i \cdot \omega \cdot C(V) + R_{ins}^{-1})^{-1} + i \cdot \omega \cdot L \quad (7)$$

Modelliert, mit $\omega = 2\pi f$ als Winkelfrequenz, $i = \sqrt{-1}$ als imaginäre Einheit, R_{ESR} als äquivalenter Serienwiderstand, R_{ins} als Isolationswiderstand, L als parasitäre Induktivität und $C(V)$ als spannungsabhängige Kapazität, gegeben durch Gleichung (5). Jeder Kondensator wird dementsprechend durch einen individuellen Satz von Parametern modelliert: a , b , h , C_s , V_{max} , R_{ESR} , R_{ins} sowie L .

Das Impedanzmodell $Z(\omega, V)$ (Gl. (7)) geht von demselben Frequenzverhalten für C_s und C_p aus, was in der Realität möglicherweise nicht der Fall ist. Das Hystereseverhalten hängt von der Abtastfrequenz, d.h. der Spannungsanstiegszeit, der Gleichspannung ab. ^[19] Was bedeutet, dass das Modell am genauesten ist, wenn die Wechselspannung etwa gleich oder kleiner als die Koerzitivspannung V_c ist. Wir schätzen also, dass das Modell genau ist, wenn die Amplitude der Wechselspannung unter 10 % der Nennspannung liegt.

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

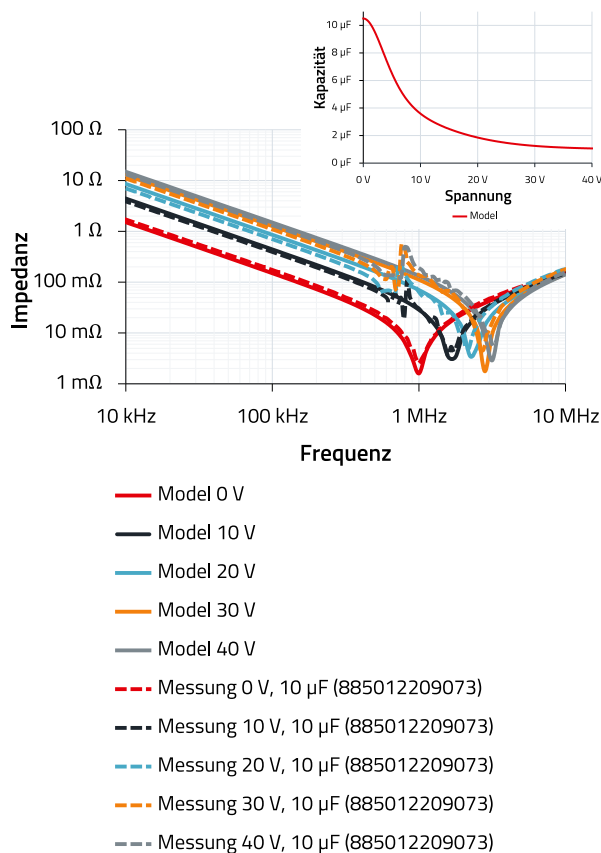


Abbildung 5: Gemessene und berechnete Impedanzspektren für verschiedene Gleichspannungen. Das eingeschobene Diagramm zeigt die entsprechende C-V-Funktion

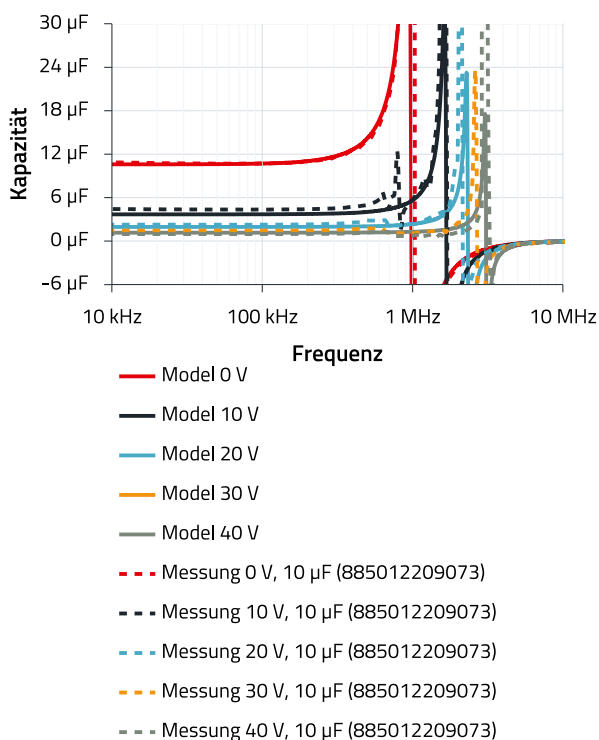


Abbildung 6: Gemessene und berechnete Kapazitätsspektren für verschiedene Gleichspannungen

Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten Graphen und den gemessenen Impedanz- bzw. Kapazitätsspektren für verschiedene Spannungen. Die Spektren wurden nach einer Vorlaufzeit von 40 Stunden aufgenommen, um den Effekt der Domänenwandverschiebung zu berücksichtigen. Das eingefügte Diagramm in Abbildung 5 zeigt die entsprechende Kapazitäts-Spannungs-Funktion, wie sie mit den in Tabelle 1 angegebenen Parametern ermittelt wurde.

Parameter	Wert
a	$1 \cdot 10^{-5}$
b	7,3
h	0
C_s	$1 \cdot 10^{-6}$
V_{max}	40
V_c	0
R_{ESR}	$1,5 \cdot 10^{-3}$
R_{ins}	$5 \cdot 10^6$
L	$2,5 \cdot 10^{-9}$

Tabelle 1: Fit-Parameter mit den Werten, die für die Diagramme in Abbildung 5 und Abbildung 6 verwendet wurden

In diesem Beispiel sind die Abweichungen zwischen den theoretischen und den gemessenen Spektren auf die leichten Abweichung zurückzuführen, die das Kapazitäts-Spannungs-Modell im mittleren Spannungsbereich aufweist. In Anbetracht der Schwierigkeiten, den Langzeit-Gleichstromeffekt genau zu messen, ist die Genauigkeit dennoch zufriedenstellend für die praktische Anwendung. Die Ursache für die kleinen Peaks (Rauschen) knapp unter 10^6 Hz in den mit angelegter Gleichspannung gemessenen Graphen konnte nicht eindeutig identifiziert werden. Die Tatsache, dass sie in verschiedenen Diagrammen etwa im gleichen Frequenzbereich liegen, könnte auf einen aufbaubedingten Mess-Artefakt hinweisen.

Aufgrund der Vielzahl von Parametern, die die Ferroelektrizität beeinflussen, wie z. B. Temperatur, Dynamik der Domänenwandverschiebung, Spannungsalterung und geringfügige Schwankungen der chemischen Zusammensetzung der Rohmaterialien, ist die genaue Modellierung der C-V-Eigenschaften eine technische Herausforderung. Aufgrund der Komplexität des Themas ist es nach wie vor notwendig, dass Elektroingenieure modellbasierte Daten durch anwendungsbezogene Tests und Messungen ergänzen.

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

07. FAZIT

Nach einer kurzen Einführung in die Ferroelektrizität wurde ein teilphänomenologisches Modell entwickelt, das auf der von Miller entwickelten Theorie der ferroelektrischen Polarisation beruht. ^[13] Das in Gleichung (3) angegebene Modell hat den Vorteil, dass die Fit-Parameter auf b und h reduziert werden. Die anderen Parameter a , C_s , V_{max} , und V_c können direkt aus der Kapazitäts-Spannungsmessung abgelesen werden. Bei unbehandelten, ausgeheizten Proben kann man $V_c = 0$ annehmen. Am Beispiel eines 10- μ F-MLCC der Klasse 2 wurde gezeigt, dass das Modell eine qualitativ zufriedenstellende Beschreibung des C-V-Verhaltens und der entsprechenden Spektren liefert. Es basiert auf den Hauptannahmen, dass der MLCC:

- sich in einem zufälligen Polarisationszustand befindet, d. h. zuvor oberhalb der Curie-Temperatur angelassen wurde und mit einer Wechselspannung belastet wird, die etwa 10 % der Nennspannung beträgt.
- Insgesamt stimmen die berechneten Spektren gut mit den gemessenen Spektren überein.

Danksagung

Besonderer Dank gilt den technischen Experten Eric Fischer sowie Jon Izkue-Rodriguez von Würth Elektronik, die sowohl Messungen als auch technischen Support zur Verfügung gestellt haben.

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

A Anhang

A.1 Alternatives mathematisches Modell

Als alternativen Ansatz schlagen wir die folgende angepasste Gleichung vor

$$C_p \cong a \cdot \operatorname{sech}^c \left(\frac{V - V_c}{b} \right) \quad (8)$$

welche die Änderung der Steigung mittels des Exponenten c ermöglicht. Obwohl c nicht direkt mit einer physikalischen Größe zusammenhängt, führt seine Einführung zu einer erheblichen Vereinfachung des Modells.

Somit kann die gemessene Kapazität mit folgender Formel angenähert werden

$$C(V) = (a - C_s) \cdot \operatorname{sech}^c \left(\frac{V - V_c}{b} \right) + C_s \quad (9)$$

Mit diesem Satz von fünf Parametern a , b , c , V_c und C_s ist es möglich, die gemessene spannungsabhängige Kapazität mit ausreichender Genauigkeit zu modellieren, wie in Abbildung 7 gezeigt. Der erste Term von Gl. (9)

$$C_p = (a - C_s) \cdot \operatorname{sech} \left(\frac{V - V_c}{b} \right) \quad (10)$$

modelliert den spannungsabhängigen Beitrag der Polarisation zur Kapazität und C_s , den spannungsunabhängigen rein kapazitiven Teil.

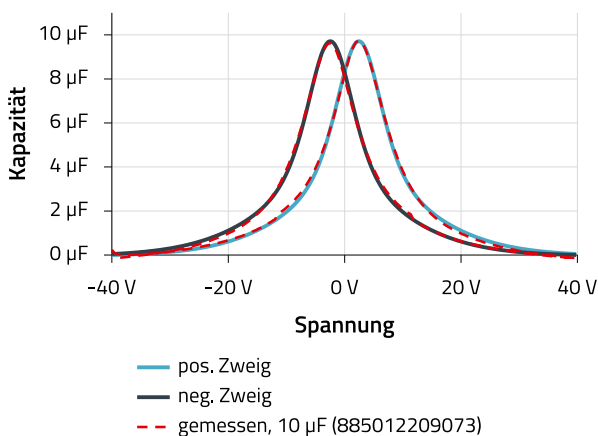


Abbildung 7: Gemessene Kapazitäts-Spannungs-Kennlinie von 10 µF MLCC mit der entsprechenden Fit-Funktion von Gl. (9).

Dimensionslose numerische Fit-Parameter: $a = 10,85$, $b = 1,3$, $c = 0,17$, $C_s = 1,09$, $V_c = 2,5$.

Obwohl die numerische und algebraische Integration für Gl. (9) immer möglich ist, kann die algebraische Integration hypergeometrische Funktionen beinhalten, die von der Simulationssoftware möglicherweise nicht unterstützt werden. Dies kann für $c = 1$ und $c = 2$ vermieden werden, wie weiter unten gezeigt wird. Unter diesen Bedingungen kann

das Modell der Kapazität und der Ladung, Δq , das mit Gleichung (6) berechnet wurde, durch trigonometrische Funktionen ausgedrückt werden. Trigonometrische Funktionen sind in der Regel in der Skriptsprache der Simulationswerkzeuge, wie z. B. LTSpice, implementiert.

Die entsprechende Ladungsgleichung lautet:

$$\Delta q(V) = 2b (a - C_s) \arctan \left[\tanh \left(\frac{V}{2b} \right) \right] + C_s V \quad (11)$$

Beitrag der Polarisation zur Kapazität

Die Beziehung zwischen Polarisation und Kapazität ergibt sich aus der Definition der Kapazität $C = dq/dV$, der Definition des elektrischen Stroms $I = (dq)/dt$ und der Ladungserhaltung

$$I = A \frac{dP}{dt} + C_s \frac{dV}{dt} + I_0(V) \quad (12)$$

mit A als effektiver Fläche des Kondensators, C_s als reinem kapazitiven Beitrag und $I_0(V)$ als anderen spannungsabhängigen Beiträgen, wie ohmschen Strömen, z. B. $I_0(V) = V/R$. Folglich ergibt sich für die gemessene Kapazität

$$C = \left(A \frac{dP}{dt} + C_s \frac{dV}{dt} + I_0(V) \right) \frac{dt}{dV} \quad (13)$$

$$C = A \frac{dP}{dV} + C_s + I_0(V) \frac{dt}{dV}$$

$$C = C_p + C_s + C_V^0 \quad (14)$$

mit C_p als dem Dipolpolarisationsbeitrag zur Kapazität, C_s als dem rein kapazitiven Beitrag und C_V^0 als weitere kapazitive Beiträge, wie Leckströme oder mögliche elektrochemische Effekte.

Der Einfachheit halber kann C_V^0 bei allen weiteren Überlegungen vernachlässigt werden. Ein praktischer Ansatz, mit dem kommerzielle Keramikkondensatoren in guter Übereinstimmung mit den Messungen modelliert werden können, ist

$$C = C_p + C_s \quad (15)$$

Die ideale feldabhängige Polarisation kann modelliert werden mit

$$P^+(E) = P_s \tanh \left(\frac{E - E_c}{2\delta} \right) \quad (16)$$

mit

$$\delta = E_c \left[\frac{1 + \frac{P_r}{P_s}}{1 - \frac{P_r}{P_s}} \right]^{-1}$$

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

wobei P_r und P_s die remanenten bzw. spontanen Polarisierungen darstellen. [13]

Der negativ verlaufende Zweig der gesättigten Hystereseschleife $P^-(E)$ ist entlang der x-Achse verschoben und durch $P^-(E) = P^+(-E)$ gegeben. Der Einfachheit halber können wir den Index in der weiteren Diskussion weglassen. Das elektrische Feld $E = V/d$ ist proportional zur angelegten Spannung, wobei d die effektive Dicke des Kondensators ist. Mit den Gleichungen (15) und (16) kann die ideale Kapazität eines ferroelektrischen Materials wie folgt berechnet werden

$$C(V) = A \frac{P_s}{2 \delta d} \operatorname{sech}^2\left(\frac{V - V_c}{2 \delta d}\right) + C_s \quad (17)$$

wobei der erste Term den Beitrag der Polarisation zur Kapazität modelliert und der zweite Term den rein linearen kapazitiven Beitrag darstellt. Dieser Ausdruck enthält noch keine explizite Abhängigkeit von der Frequenz. Er liefert ein Modell für die Spannungsabhängigkeit mit der Frequenz als konstantem Parameter. Die wichtigsten frequenzabhängigen Größen sind $C_s(f)$ und $P_s(f)$. Dieses Modell beschreibt noch nicht die Frequenzabhängigkeit von C_p , die sich von C_s unterscheiden kann.

Für das Fitting an gemessene $C(V)$ -Daten kann Gl. (17) umgeschrieben und durch die Fit-Faktoren a , b , V_c und C_s ersetzt werden:

$$C(V) = a \operatorname{sech}^2\left(\frac{V - V_c}{b}\right) + C_s \quad (18)$$

Man beachte, dass b mit $C(V)$ in folgender Beziehung steht

$$b = \frac{V - V_c}{\operatorname{arsech}(\sqrt{C(V) - C_s})} \quad (19)$$

Integration der hyperbolischen Sekante und von $C(V)$

Im Allgemeinen wird der Ausdruck der Polarisation $\Delta q/A$ oder der Ladungsänderung Δq durch Integration von $C(V)$ erhalten.

$$\int (C_p + C_s) dV = \int dq_p + \int dq_s = \Delta q_p + \Delta q_s \quad (20)$$

Beispiel für die Berechnung mit $c=1$:

$$C = (a - C_s) \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{V}{b}\right) + C_s \quad (21)$$

$$C_p(V) = (a - C_s) \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{V}{b}\right)$$

$$\Delta q_p = \int C_p dV = 2c(a - C_s) \arctan\left[\tanh\left(\frac{V}{2b}\right)\right]$$

$$\Delta q_s = \int C_s dV = C_s V$$

$$\Delta q = \Delta q_p + \Delta q_s = 2c(a - C_s) \cdot \arctan\left[\tanh\left(\frac{V}{2b}\right)\right] + C_s V \quad (22)$$

Beispiel für die Berechnung mit $c=2$:

$$C = (a - C_s) \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{V}{b}\right) + C_s \quad (23)$$

$$C_p(V) = (a - C_s) \cdot \operatorname{sech}^2\left(\frac{V}{b}\right)$$

$$\Delta q_p = \int C_p dV = b(a - C_s) \tanh\left(\frac{V}{b}\right)$$

$$\Delta q_s = \int C_s dV = C_s V$$

$$\Delta q = \Delta q_p + \Delta q_s = b(a - C_s) \cdot \tanh\left(\frac{V}{b}\right) + C_s V \quad (24)$$

Beispiel für die Berechnung von C_p in Gleichung (3):

$$C_p = \left(\frac{a^*}{a_0}\right) \left[\operatorname{sech}^2\left(10 \frac{V - V_c}{7 \cdot b}\right) + \frac{b}{30} \operatorname{sech}^2\left(\frac{V - \frac{V_{\max}}{8} + V_c}{2 \cdot b}\right) + \frac{b}{30} \operatorname{sech}^2\left(\frac{V + \frac{V_{\max}}{8} - V_c}{2 \cdot b}\right) \right] - C_s \cdot \frac{h}{10}$$

$$q_p = \int C_p dV = \left(\frac{a^*}{a_0}\right) \cdot \frac{7 \cdot b}{10} \cdot \tanh\left(\frac{V - V_c - \frac{V_{\max}}{8}}{7b}\right) + \left(\frac{a^*}{a_0}\right) \cdot \frac{2 \cdot b^2}{30} \cdot \tanh\left(\frac{V - V_c - \frac{V_{\max}}{8}}{2b}\right) + \left(\frac{a^*}{a_0}\right) \cdot \frac{2 \cdot b^2}{30} \cdot \tanh\left(\frac{V - V_c + \frac{V_{\max}}{8}}{2b}\right) - C_s \cdot \frac{h}{10} \cdot V \quad (25)$$

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

Fitting-Ergebnisse

Die Ergebnisse in Tabelle 2 beruhen auf einem Fitting von Gl. (3) an Daten aus der online Design Plattform [REDEXPERT](#). Das Fitting wurden mit der FindFit-Funktion in Wolfram Mathematica durchgeführt. Die Basiseinheiten für die Kapazität und die Spannung waren nF bzw. V. Alle

Anpassungsfehler lagen bei oder unter 1 %, was deutlich unter den ± 10 % Kapazitätstoleranzen der MLCCs liegt. Die Messungen wurden mit freundlicher Genehmigung von Jon-Izkue-Rodrigues und Eric Fischer durchgeführt und zur Verfügung gestellt.

Artikelnummer	$a \cdot 10^{-3}$	$a^* \cdot 10^{-4}$	h	b	$C_s \cdot 10^{-4}$	V_{\max}	Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers, RMSRE
885012109004	100000	9189,93	8,02	6,08	4092,09	6,30	0,0070
885012109011	47000	4507,34	8,06	8,41	994,57	16,00	0,0090
885012109010	22000	4395,28	29,51	25,43	1125,23	16,00	0,0142
885012108012	47000	4355,12	6,58	5,66	1007,52	10,00	0,0087
885012108011	22000	2172,04	9,47	6,75	528,39	10,00	0,0194
885012108003	22000	2127,95	9,34	7,42	1098,02	6,30	0,0129
885012108018	22000	2123,46	7,84	7,44	354,40	16,00	0,0130
885012107011	22000	2035,90	6,05	5,21	415,73	10,00	0,0117
885012107005	22000	1916,61	5,00	4,01	566,77	6,30	0,0151
885012108001	4700	1634,89	40,00	26,33	388,30	6,30	0,0113
885012208017	4700	1589,92	40,00	35,39	373,31	10,00	0,0155
885012207024	2200	690,93	40,00	29,17	156,98	10,00	0,0164
885012108009	6800	663,08	9,45	9,99	307,22	10,00	0,0038
885012108008	4700	604,22	14,57	15,94	293,93	10,00	0,0096
885012108014	2200	590,17	40,00	31,68	123,39	16,00	0,0179
885012208038	2200	580,55	40,00	30,81	120,18	16,00	0,0167
885012207021	680	244,03	40,00	43,37	58,68	10,00	0,0089
885012106018	2200	205,86	6,87	7,86	45,18	16,00	0,0035
885012106008	470	149,44	40,00	29,66	34,15	10,00	0,0086

Tabelle 2: Fitting-Ergebnisse für ausgewählte **MLCCs** von Würth Elektronik im Bereich von 100 μ F bis 470 nF mit Gleichungen (3) und (5). Kapazitäts-Spannungs-Messungen, die für die Anpassung verwendet wurden, sind der online Design Plattform [REDEXPERT](#) dargestellt. Die Einheiten der gemessenen Kapazitäts-Spannungs-Daten waren in pF und Volt. Die Koerzitivspannung wurde auf $V_c = 0$ gesetzt. Nur die Parameter h und b wurden mit einem Minimierungsalgorithmus von Wolfram Mathematica gefittet. C_s , V_{\max} und a wurden direkt aus den gemessenen Kapazitäts-Spannungs-Werten $C(V)$ entnommen. Der Parameter C_s bezieht sich auf die maximale Spannung mit V_{\max} wobei $C_s = C(V_{\max})$. Der Parameter a ist der tatsächlich gemessene Kapazitätswert in Einheiten von nF bei $V=0$.

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

A.2 Literaturangaben

- [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] 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] 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(Zr_{0.3} Ti_{0.7})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] Mahesh 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*. 100:1. 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 % (Bi_{0.5}Na_{0.5})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-BiZn_{1/2}Ti_{1/2}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 Ba_{0.5}Sr_{0.5}TiO₃ Ceramics. *J. Am. Ceram. Soc.*. 90:4. 1327-1330 (2007)

APPLICATION NOTE

ANP114 | Spannungs- und Frequenzabhängigkeit von ferroelektrischen Mehrschicht-Keramikkondensatoren der Klasse 2

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 Todesfälle 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/app-notes



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



Toolbox
www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog
www.we-online.com/produkte

KONTAKTINFORMATION



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



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