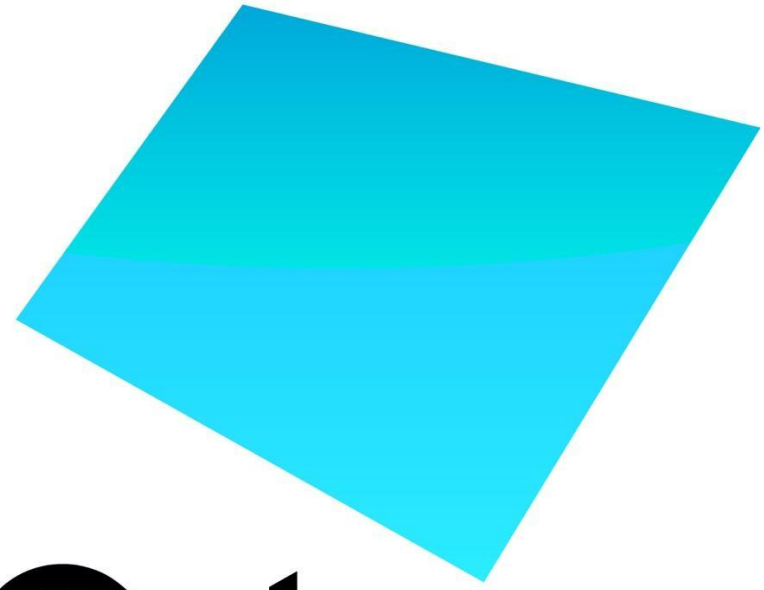
Prüfverfahren für Kondensatoren

Revision 1.3

Autor: Aristeidis Bitziopoulos



Cybenetics

Nikosia, Zypern

Oktober 2026

Revisionshistorie

Version	Veröffentlichungsdatum	Anmerkungen
1.0	Februar 2025	Erster Entwurf
1.1	September 2025	Leistungsbewertungen für Hoch- und Niederspannungskondensatoren ergänzt
1.2	Oktober 2026	Screenshots der aktuellen Prüfsoftware (v5.33/v5.34) ersetzen die Bereiche für Torture-Amp-Grenzwerte, Kondensatordetails und Spannungsbehandlung der früheren Version, und eine Übersicht des Anwendungsfensters wird hinzugefügt. Referenzen korrigiert: Autoren und Ausgaben geprüft, nicht verifizierbare Einträge entfernt, Nummerierung fortlaufend gestaltet, Links und Abrufdaten aktualisiert. Text korrigiert: Definition des Gütefaktors und Gleichungssymbol; Langform von ESR; Normierungssatz; Modellname des Labornetzteils. Keine Änderungen an Messwerten, Tests oder veröffentlichten Bewertungen.
1.3	Oktober 2026	Die Grenze zwischen Nieder- und Hochspannung für die Leistungsformeln (100 V verwendet die Hochspannungsformel) und die Definition von RC (gemessene / Nennkapazität x 100) so angegeben, wie sie in der Berechnung angewendet werden.

Inhaltsverzeichnis

Definitionen 3
Kapazität 3
Verlustfaktor (D) 3
Äquivalenter Serienwiderstand (ESR) 3
Phasenwinkel (Θ) 3
Gütefaktor (Q) 4
Prolog 5
Prüfausrüstung 6
Kondensatorausfall 7
Prüfsoftware 9
Prüfmethodik 9
Berechnung der Gesamtleistungsbewertung 11
Epilog 11
Literaturverzeichnis 12

Definitionen

Kapazität

Sie ist die Fähigkeit eines Bauteils, typischerweise eines Kondensators, elektrische Ladung zu speichern. Sie ist definiert als das Verhältnis der auf einer Platte des Kondensators gespeicherten elektrischen Ladung (Q) zur Spannung (V) zwischen den Platten und wird ausgedrückt als:

$$C = \frac{\mathrm{Q}}{\mathrm{V}}$$

Die Kapazität wird in Farad (F) gemessen, wobei ein Farad der Kapazität eines Kondensators entspricht, der bei einem Volt eine Ladung von einem Coulomb speichert. Die Kapazität hängt von Faktoren wie der Oberfläche der Platten, deren Abstand zueinander und dem Dielektrikum zwischen den Platten ab. [1]

Verlustfaktor (D)

Er ist ein Maß für den Energieverlust in einem Kondensator oder anderen dielektrischen Materialien. Er ist das Verhältnis der (durch den Widerstand) abgegebenen Wirkleistung zur (durch die Reaktanz des Kondensators) gespeicherten Blindleistung in einem Wechselstromkreis. Mathematisch steht er in Beziehung zum tan δ (Tangens des Verlustwinkels), wobei δ der Phasenwinkel zwischen Spannung und Strom ist. Ein höherer Verlustfaktor weist auf größere Energieverluste und einen schlechteren Wirkungsgrad des Kondensators hin.

Der Verlustfaktor verhält sich umgekehrt zur Qualität des Dielektrikums; niedrigere Werte sind für eine bessere Leistung in Hochfrequenzanwendungen wünschenswert. [2]

Äquivalenter Serienwiderstand (ESR)

Er bezeichnet den Innenwiderstand eines Kondensators oder anderer elektronischer Bauteile, der dessen Wirkungsgrad beeinflusst, insbesondere in Wechselstromkreisen. Er stellt die Gesamtwirkung der ohmschen Verluste innerhalb des Bauteils dar, einschließlich des Widerstands der Anschlussdrähte, der Elektroden und des Dielektrikums. Der ESR ist in Leistungsanwendungen von Bedeutung, da hohe ESR-Werte zu Energieverlusten, Wärmeentwicklung und Leistungseinbußen führen können, insbesondere in Filteranwendungen oder in Netzteilsystemen.

Bei Kondensatoren ist ein niedrigerer ESR im Allgemeinen für eine bessere Leistung wünschenswert, insbesondere in Hochfrequenz- oder Hochstromanwendungen.

Phasenwinkel (Θ)

Er bezeichnet die Winkeldifferenz zwischen den Spannungs- und Stromverläufen in einem Wechselstromkreis. Er wird in Grad (°) oder Radiant (rad) gemessen und gibt die zeitliche Verschiebung zwischen den beiden Verläufen an. Ein Phasenwinkel von 0° bedeutet, dass Spannung und Strom in Phase sind, während ein Phasenwinkel von 90° oder -90° anzeigt, dass Strom und Spannung vollständig phasenverschoben sind (zum Beispiel in rein induktiven oder kapazitiven Schaltungen).

Der Phasenwinkel ist entscheidend für die Bestimmung des Leistungsfaktors und des Wirkungsgrads von Wechselstromsystemen. [3][4]

Gütefaktor (Q)

Er beschreibt, wie nahe ein Kondensator einem idealen, verlustfreien Bauteil kommt. Bei einem Kondensator ist er das Verhältnis seiner Reaktanz zu seinem äquivalenten Serienwiderstand bei einer gegebenen Frequenz (Q = 1/D). In einem Schwingkreis wird er ausgedrückt als:

$$Q = \frac{f_0}{\Delta f}$$

wobei die Resonanzfrequenz und die Bandbreite ist (der Frequenzbereich, in dem die Schaltung wirksam in Resonanz gerät).$f_0 \Delta f$

Bei Kondensatoren, Induktivitäten und anderen resonanten Systemen bedeutet ein höherer Q-Wert eine schärfere Resonanz und eine geringere Energiedissipation.[4]

Prolog

In der heutigen Elektronik sind Kondensatoren allgegenwärtig und spielen über die gesamte Lebensdauer jedes Produkts eine wichtige Rolle. Deshalb ist es von zwingender Bedeutung, ihre Qualität und ihre Belastbarkeit mit wissenschaftlichen Methoden beurteilen zu können, die keine langwierigen Prüfzeiträume erfordern.

Ein Kondensator ist ein elektronisches Bauteil, das elektrische Energie in einer Schaltung speichert und wieder abgibt. Er besteht aus zwei leitfähigen Platten, die durch ein isolierendes Material, das sogenannte Dielektrikum, getrennt sind. Wird eine Spannung an die Platten angelegt, entsteht ein elektrisches Feld, wodurch der Kondensator Energie speichert. Kondensatoren werden in elektronischen Schaltungen häufig für verschiedene Zwecke eingesetzt, etwa zur Glättung von Versorgungsspannungen, zur Signalfilterung und für Zeitsteuerungsanwendungen. Sie werden durch ihre Kapazität charakterisiert, die in Farad (F) gemessen wird.

Hochwertige Kondensatoren sind für jedes elektronische Bauteil unverzichtbar, auch für Netzteile, die heutzutage von vielen elektronischen Geräten und nicht nur von PCs verwendet werden. In der Regel setzen High-End-Netzteile Kondensatoren von Chemi-Con ein, während Netzteile der Mittelklasse günstigere Kondensatoren von Teapo oder Elite verwenden.

Die Nennspannung eines Kondensators gibt die maximale Spannung an, der ein Kondensator sicher standhalten kann, ohne durchzuschlagen. Ein Überschreiten dieser Nennspannung kann zum Durchschlag der Isolation führen, wodurch der Kondensator ausfällt oder sogar beschädigt wird. Bei der Auswahl eines Kondensators für eine Schaltung ist es unerlässlich, einen mit einer höheren Nennspannung als der maximal in der Anwendung auftretenden Spannung zu wählen. Dies bietet eine Sicherheitsreserve und trägt dazu bei, dass der Kondensator zuverlässig innerhalb seiner spezifizierten Parameter arbeitet.

Das Überspannen eines Kondensators bzw. das Anlegen einer Spannung oberhalb seiner Nennspannung kann mehrere unerwünschte Folgen haben:

- Durchschlag und Beschädigung: Ein Überschreiten der Nennspannung kann zum Durchschlag des Dielektrikums zwischen den Kondensatorplatten führen. Dieser Durchschlag kann einen Kurzschluss verursachen, der den Kondensator und möglicherweise weitere Bauteile der Schaltung beschädigt.

- Verringerte Kapazität: Überspannung kann die physikalischen und elektrischen Eigenschaften des Kondensators verändern und zu einer Abnahme der Kapazität führen. Diese Veränderung kann die Leistung des Kondensators in der Schaltung beeinträchtigen.

- Leckstrom: Eine Überspannungsbelastung kann den Leckstrom über den Kondensator erhöhen. Der Leckstrom fließt durch das Dielektrikum, und ein übermäßiger Leckstrom kann die Leistung des Kondensators negativ beeinflussen.

- Elektrischer Ausfall: Eine längere Einwirkung von Überspannung kann zu einer allmählichen Degradation des Kondensators führen, die letztlich einen elektrischen Ausfall zur Folge hat.

- Sicherheitsrisiken: In Extremfällen kann Überspannung zu einem katastrophalen Ausfall des Kondensators führen, verbunden mit dem Austritt von Rauch oder Gas oder sogar mit einem Bersten. Dies stellt ein Sicherheitsrisiko dar, insbesondere in Anwendungen, in denen sich der Kondensator nahe an anderen Bauteilen oder in einem geschlossenen Raum befindet.

Prüfausrüstung

- Labornetzteil: GW Instek PSW 800-2.88 [5]
- LCR-Messgerät: Sourcetronic ST2832 [6]

Ein LCR-Messgerät ist ein elektronisches Prüfgerät zur Messung der Induktivität (L), der Kapazität (C) und des Widerstands (R) eines elektronischen Bauteils.

Spannungsbehandlung

Die Spannungsbehandlung von Kondensatoren, häufig als Formierung oder Initialisierung bezeichnet, ist ein Verfahren, bei dem ein Kondensator einer kontrollierten Spannung ausgesetzt wird, um seine Eigenschaften zu stabilisieren, bevor er in einer Schaltung – in diesem Fall unserem Prüfaufbau – eingesetzt wird. Diese Behandlung ist besonders wichtig für Elektrolytkondensatoren, die ohne ordnungsgemäße Konditionierung zur Degradation neigen.

Aus den folgenden Gründen ist es wichtig, die Kondensatoren vor der Prüfung zu behandeln:

- Bildet eine ordnungsgemäße dielektrische Schicht: Bei Elektrolytkondensatoren bildet sich beim Anlegen einer Spannung eine dünne dielektrische Oxidschicht auf der Oberfläche der Anode. Diese Schicht wirkt als Isolator und ermöglicht es dem Kondensator, Ladung zu speichern. Ist diese dielektrische Schicht nicht ordnungsgemäß ausgebildet, funktioniert der Kondensator möglicherweise nicht wie vorgesehen oder könnte sogar frühzeitig ausfallen. Die Spannungsbehandlung trägt dazu bei, diese Oxidschicht korrekt auszubilden, und stellt sicher, dass der Kondensator über die Zeit zuverlässig arbeitet.

- Verhindert Leckströme: Ohne eine ordnungsgemäß ausgebildete dielektrische Schicht können bei Elektrolytkondensatoren hohe Leckströme auftreten, das heißt, sie verlieren mit der Zeit Ladung. Die Spannungsbehandlung stellt sicher, dass die dielektrische Schicht stabil und wirksam ist, verringert die Wahrscheinlichkeit von Leckströmen und verbessert die Gesamtzuverlässigkeit.

- Verbessert Leistung und Lebensdauer: Wird ein Kondensator „behandelt“, bleibt der Kapazitätswert über die Zeit stabil und gleichbleibend. Eine ordnungsgemäße

Spannungsbehandlung hilft dem Kondensator, seinen optimalen Betriebszustand zu erreichen, verbessert dadurch seine Leistung (etwa Wirkungsgrad und Kapazitätsstabilität) und verlängert seine Lebensdauer. Kondensatoren, die keiner Spannungsbehandlung unterzogen wurden, können vorzeitig ausfallen oder schneller degradieren.

- Minimiert Beschädigungsrisiken: Elektrolytkondensatoren, die Spannungen oberhalb ihres Nennwerts ausgesetzt waren oder nicht ordnungsgemäß initialisiert wurden, können durchschlagen oder sogar einen Kurzschluss verursachen. Die Spannungsbehandlung stellt sicher, dass sich der Kondensator schrittweise an seine Nennspannung anpasst, ohne dass eine Belastung entsteht, die zu Durchschlägen führen könnte.

Das Spannungsbehandlungsverfahren von Cybenetics ist das folgende:

- Kontrolliertes Anlegen der Spannung: Der Kondensator wird an ein Netzteil angeschlossen, das auf die Nennspannung des Kondensators eingestellt ist.

- Stromüberwachung: Der durch den Kondensator fließende Strom wird überwacht, um sicherzustellen, dass er während der Behandlung des Kondensators innerhalb sicherer Grenzen bleibt.
- Stabilisierung: Die Spannung wird 30 Minuten lang angelegt, um sicherzustellen, dass sich die Oxidschicht stabilisiert und die Eigenschaften des Kondensators festgelegt sind.

Zusätzlich muss ausschließlich für die Dauer der Behandlung ein Widerstand mit 1KOhm in Reihe zum geprüften Kondensator geschaltet werden.

Kondensatorausfall

Kondensatoren können auf verschiedene Weise ausfallen; die häufigsten Ausfallursachen sind die folgenden:

- Überhöhte Spannung: Überspannung kann das Dielektrikum durchschlagen.
- Überhitzung: Ein hoher Rippelstrom oder thermische Belastung können den Kondensator degradieren.
- Alterung und Verschleiß: Kondensatoren degradieren im Laufe der Zeit, insbesondere Elektrolytkondensatoren.
- Falsche Polarität: Ein Verpolen gepolter Kondensatoren kann zum Ausfall führen.

Die Anzeichen eines Ausfalls können von der Art des Kondensators und der Art des Fehlers abhängen. Nachfolgend einige häufige Indikatoren für einen Kondensatorausfall:

1. Sichtbare Anzeichen
    - Auswölbung oder Aufblähung: Weist auf einen inneren Druckaufbau hin, häufig bei Elektrolytkondensatoren.

- Verfärbung oder austretende Flüssigkeit: Anzeichen für einen Elektrolytaustritt, typischerweise bei Elektrolytkondensatoren.
- Gerissenes oder beschädigtes Gehäuse: Physische Beschädigung des Kondensatorgehäuses, die auf Belastung oder Überhitzung hinweist.

2. Elektrische Symptome
    - Erhöhter ESR (äquivalenter Serienwiderstand): Ein höherer Widerstand führt zu geringerem Wirkungsgrad, Wärmeentwicklung und möglichem Ausfall.
    - Kapazitätsverlust: Ein deutlicher Rückgang der Kapazität bedeutet, dass der Kondensator Ladung nicht mehr ordnungsgemäß speichern kann.
    - Kurzschluss: Ein interner Kurzschluss kann zu übermäßigem Stromfluss führen und andere Bauteile beschädigen.
    - Unterbrechung: Der Kondensator wird elektrisch getrennt, sodass keine Funktion mehr besteht.

3. Erhöhter Leckstrom
    - Höherer Leckstrom: Steigt der Leckstrom deutlich an, versagt der Kondensator und sollte ersetzt werden.

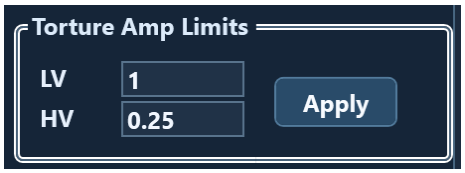
4. Änderungen im Schaltungsverhalten
    - Überhitzung: Verursacht durch übermäßigen Rippelstrom oder übermäßige Spannung, was zu einer weiteren Degradation des Kondensators führt.
    - Rauschen oder Verzerrung: Ein defekter Kondensator in Audio- oder Signalschaltungen kann Brummen, Verzerrungen oder Instabilität verursachen.
    - Schaltungsausfall oder Fehlfunktion: Ein Kondensatorausfall kann zu einer instabilen Stromversorgung oder zu einer vollständigen Fehlfunktion der Schaltung führen.

5. Durch Prüfung

    - ESR-Prüfung: Die Messung des ESR kann eine innere Degradation oder einen Ausfall aufdecken.
    - Kapazitätsprüfung: Ein deutlicher Rückgang der Kapazität weist auf einen Ausfall hin.
    - Sichtprüfung mit Infrarotthermometer: Erhöhte Temperaturen können auf Überhitzung oder einen Ausfall hindeuten.

Unter diesen verschiedenen Methoden zur Fehlererkennung überwacht Cybenetics den Strom, der durch den Kondensator fließt. Wird der Kondensator schwächer, lässt er mehr Strom durch, was ein Zeichen der Degradation ist. Sobald der Strom den in der Software festgelegten Grenzwert erreicht, wird die Prüfung abgebrochen, um eine Verschmutzung zu vermeiden, da der Kondensator kurz vor dem Ausfall steht.

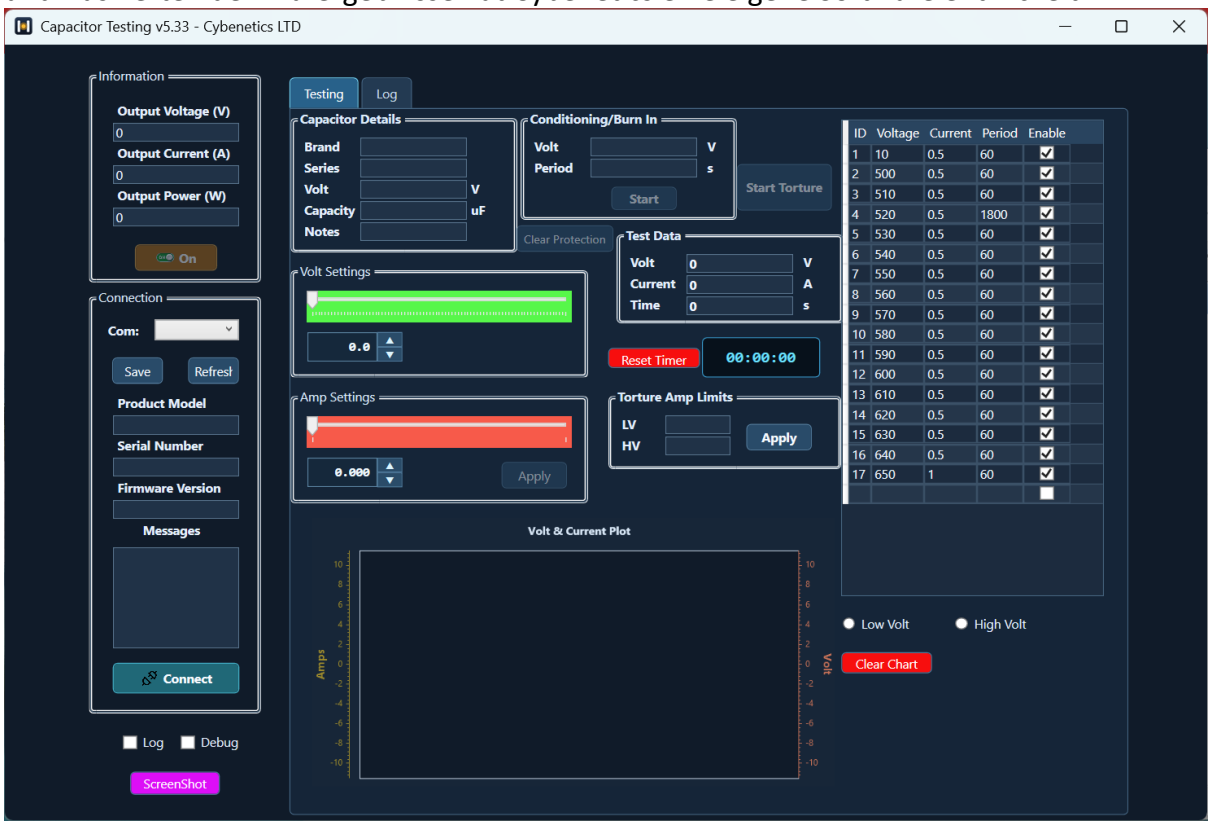
Die von Cybenetics verwendeten Grenzwerte sind die folgenden:



Dabei steht LV für Low Voltage (Niederspannung) und HV für High Voltage (Hochspannung).

Prüfsoftware

Zur Bedienung und Überwachung der Prüfausrüstung sowie zum Anzeigen, Protokollieren und Auswerten der Prüfergebnisse hat Cybenetics eine eigene Software entwickelt.



Die Software ermöglicht es dem Anwender, Prüfdaten einzugeben, sich mit dem Labornetzteil zu verbinden, dieses zu steuern und die Ergebnisse zu überwachen.

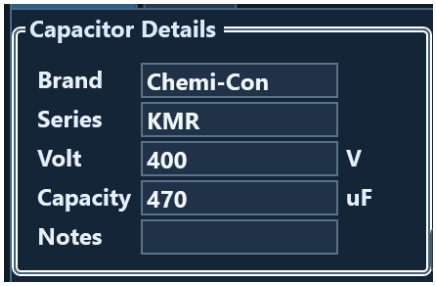
Prüfmethodik

Der erste Schritt besteht darin, das LCR-Messgerät einzuschalten und es gemäß den Herstellerangaben mindestens 30 Minuten laufen zu lassen, bevor wir es verwenden. In der Zwischenzeit kann die Spannungsbehandlung beginnen.

Um den Kondensator an das Labornetzteil anzuschließen, müssen wir den Plus- und den Minusanschluss des Kondensators bestimmen. Ist der Kondensator neu und unbenutzt, hilft die Länge der Anschlussdrähte bei der Identifizierung, da der längere der Pluspol ist.

Andernfalls können Minus- und Plussymbole auf dem Gehäuse des Kondensators aufgedruckt sein.

Sobald der Kondensator angeschlossen und in die Prüfbox eingesetzt ist, schalten wir das Labornetzteil ein und starten die Prüfsoftware auf dem Computer. Anschließend müssen wir die Eigenschaften des Kondensators eingeben, konkret Marke, Serie, Spannung und Kapazität.



Danach geben wir die Informationen zur Spannungsbehandlung ein.

Nach dem Anschließen des Kondensators und der Eingabe der Informationen kann die Spannungsbehandlung beginnen. Beim Start müssen wir prüfen, ob die Anzeigen am Labornetzteil unseren Eingaben in der Software entsprechen.

Nach Abschluss der Spannungsbehandlung ist das LCR-Messgerät ausreichend aufgewärmt und bereit für die Messungen.

Das LCR-Messgerät dient zur Messung des Gütefaktors (Q), des Verlustfaktors (DF) und des äquivalenten Serienwiderstands (ESR). Wir schließen den Kondensator an die Messfassung des LCR-Messgeräts an. Über sein Menü stellen wir die Frequenz auf 120Hz ein, mit der wir Q und DF messen, während wir für den ESR die Frequenz auf 1KHz ändern.

Die letzte Prüfphase ist der Überspannungs- bzw. Torture-Teil. In dieser Phase beaufschlagen wir den Kondensator mit Überspannung, um den Ausfallpunkt zu ermitteln. Dazu müssen wir den Kondensator wieder an das Labornetzteil anschließen.

Bei Niederspannungskondensatoren mit einer Nennspannung unter 100 V beginnen wir bei der Nennspannung und erhöhen sie in Schritten von 20%. Der Kondensator wird bei jeder Prüfspannung fünf (5) Minuten betrieben; dieses Verfahren läuft automatisch über die Software ab.

Bei Hochspannungskondensatoren mit einer Nennspannung von 100 V oder höher beginnen wir mit 10V für eine (1) Minute, gefolgt von einer (1) Minute bei 500V; anschließend erhöhen wir die Spannung jeweils um 10V und führen jede Prüfung eine Minute lang durch. Die einzige Ausnahme ist die Einstellung 520V, bei der wir den Kondensator 30 Minuten lang betreiben. Fällt der Kondensator wie zuvor beschrieben aus, notieren wir die Prüfdauer () und die maximal angelegte Spannung.t_{DUT}

Berechnung der Gesamtleistungsbewertung

Nach Abschluss aller Prüfungen und der Erfassung der Ergebnisse müssen wir die Gesamtleistung des geprüften Kondensators berechnen. Dazu verwenden wir eine Leistungsformel, die sich für Niederspannungskondensatoren mit einer Nennspannung unter 100 V und Hochspannungskondensatoren mit einer Nennspannung von 100 V oder höher unterscheidet. Ein Kondensator mit genau 100 V Nennspannung verwendet die Hochspannungsformel.

Für die Berechnung der Gesamtbewertung des Kondensators berücksichtigen wir die grundlegenden Parameter:

- RC: Prozentsatz der tatsächlichen Kapazität - die bei 120 Hz gemessene Kapazität geteilt durch die Nennkapazität (angegebene Kapazität), multipliziert mit 100 (zum Beispiel ergibt eine gemessene Kapazität von 950 uF bei einer Nennkapazität von 1000 uF RC = 95)
- Gütefaktor (Q) @ 120 Hz
- ESR @ 1 kHz
- DS: Durchschlagfestigkeit/Überspannungstoleranz (Sekunden)

$$Capacitor\ Performance_{\ Low\ Voltage} = \frac{DS}{12.5} + \frac{(1500 - ESR * 3000)}{15} + Q * 6 + RC$$

$$Capacitor\ Performance_{\ High\ Voltage} = \frac{DS}{18} + \frac{(1500 - ESR * 600)}{20} + Q * 4.5 + RC$$

Wie Sie den obigen Gleichungen entnehmen können, verwenden wir für Nieder- und Hochspannungskondensatoren nicht dieselben Multiplikatoren und Divisoren, da die durchschnittlich gemessenen Werte der berücksichtigten Faktoren bei unseren Stichproben unterschiedlich ausfallen.

Sobald wir die Listen mit den Gesamtleistungswerten haben, ist es recht einfach, alle Messwerte zu normieren, indem wir die Gesamtleistung eines einzelnen Kondensators (100% Leistung) als Referenz verwenden und die folgende Gleichung anwenden.

$$Relative\ Performance_{Sample\ Capacitor} = \frac{100}{Overall\ \ Performance_{Reference\ Capacitor}} * Overall\ \ Performance_{Sample\ Capacitor}$$

Epilog

Die Prüfung von Kondensatoren ist ein kritischer Prozess, um die Zuverlässigkeit und Funktionsfähigkeit elektronischer Schaltungen sicherzustellen und um die Qualität verschiedener Hersteller vergleichen zu können. Da Kondensatoren in jedem elektronischen Gerät verwendet werden und ein wesentlicher Bestandteil davon sind, der Zuverlässigkeit und Leistung beeinflusst, ist es entscheidend, über tatsächliche Prüfdaten zu ihrer Leistung und Belastbarkeit zu verfügen.

Mit unseren Prüfungen und unserer Kondensator-Leistungsdatenbank wollen wir mit einigen Mythen aufräumen, etwa dass Marke „X“ mittelmäßige Kondensatoren herstellt, während Marke „Y“ gute produziert. Zunächst einmal hat jede Marke unterschiedliche Kondensatormodelle mit unterschiedlichen Spezifikationen, die ihre Leistung beeinflussen. Man kann also nicht einen Kondensator nehmen und ihn mit einem anderen mit abweichenden Spezifikationen vergleichen. Zweitens können wir uns nicht länger auf im Internet verbreitete Gerüchte und auf Nutzermeinungen zur Kondensatorqualität verlassen; wir benötigen tatsächliche Daten, und der einfachste und beste Weg zur Bewertung von Kondensatoren wurde in diesem Artikel bereits beschrieben.

Wir hoffen, dass unsere Kondensatordatenbank Herstellern, Marken und Anwendern dabei hilft, die besten Produkte zu finden, und dass sie zu geringeren Produktionskosten führt, da sie zeigen wird, dass einige teure und schwer erhältliche Kondensatormodelle durch andere ersetzt werden können, die weniger kosten und in größeren Mengen verfügbar sind. Dies ist das letztliche Ziel unserer Kondensatordatenbank: der Industrie voranzuhelfen, da nicht alle Hersteller und insbesondere Marken über die Möglichkeit verfügen, Qualität und Leistung von Kondensatoren zu prüfen, und ihnen somit das vollständige Bild fehlt, um die am besten geeigneten Bauteile für ihre Produkte auszuwählen.

Literaturverzeichnis

[1] Robert L. Boylestad and Louis Nashelsky, "Electronic Devices and Circuit Theory," 11th edition, Pearson, 2013.
[2] S. M. Sze, "Semiconductor Devices: Physics and Technology," 2nd edition, John Wiley & Sons, 2002.
[3] Edward Hughes, John Hiley, Keith Brown and Ian McKenzie-Smith, "Hughes Electrical and Electronic Technology," 12th edition, Pearson, 2016.
[4] Paul Horowitz and Winfield Hill, "The Art of Electronics," 3rd edition, Cambridge University Press, 2015.
[5] PSW-Series Programmable Switching D.C. Power Supply. https://www.gwinstek.com/en-global/products/detail/PSW-Series (zuletzt abgerufen am 3. Oktober 2026)
[6] Compact LCR Meter ST2832. https://www.sourcetronic.com/shop/en/lcr-meter-st2832.html (zuletzt abgerufen am 3. Oktober 2026)