

## APPLICATION NOTE

### ANP128 | Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten



Ing. Carlos Farnos, Dr.-Ing. Efrain Bernal

#### 1. EINLEITUNG

Die konstante Marktnachfrage nach Produkten mit höherer Leistungsdichte und -effizienz bei einer gleichzeitig stetigen Verringerung der Größe der elektronischen Netzteile hat dazu geführt, die einzelnen Komponenten im System bis an ihre Grenzen zu optimieren. Höhere Anforderungen in Bezug auf Hochleistungsanwendungen und Miniaturisierung tragen zudem dazu bei, dass passive elektronische Bauelemente immer höheren Temperaturen standhalten müssen, was die Wahrscheinlichkeit einer thermischen Alterung erhöht. Dieses bekannte Phänomen tritt sogar bei Speicherinduktivitäten mit AEC-Q200 Grade 0-Qualifikation (Betriebstemperaturbereich von  $-55\text{ °C}$  bis  $150\text{ °C}$ ) auf. In dieser Application Note werden die Probleme erörtert, die auftreten, wenn Induktivitäten für längere Zeit hohen Temperaturen ausgesetzt sind, mit speziellem Fokus auf verpressten Hochstrom-Speicherdrosseln und auf der Notwendigkeit, Wärmealterungseffekte bei der Auswahl der Induktivitäten zu berücksichtigen.

#### 2. VERPRESSTE SPEICHERINDUKTIVITÄTEN

Viele SMT-Speicherinduktivitäten basieren auf einer gegossenen Konstruktion, bei der anstelle eines separaten Kerns eine magnetische Metallpulverlegierung um die Spule herum gepresst wird. Diese Bauteile zeichnen sich durch eine hervorragende magnetische Schirmung bei geringem magnetischen Streufeld, einem reduzierten Potenzial für Geräuschentwicklung (hohe Töne im Betrieb) und weiche Sättigungseigenschaften aus. Verpresste Induktivitäten sind häufig langlebiger und zuverlässiger als andere Arten von Speicherinduktivitäten, wie Induktivitäten mit zwei- oder einteiligem Kern (Trommelkern) mit Epoxidharzbeschichtung. Das macht sie ideal für die Verwendung in rauen oder anspruchsvollen Umgebungen.

Die in verpressten Speicherinduktivitäten verwendeten Pulvermaterialien zeichnen sich durch einen minimalen Drift über der Temperatur aus und erreichen erst verzögert eine magnetische Sättigung. Dies zeigt sich in Spezifikationen mit höheren Sättigungsströmen  $I_{\text{sat}}$ , wodurch die Induktivität für

den Einsatz in Hochstrom- und

Hochtemperaturanwendungen geeignet ist, die kontrollierte Induktivitätswerte benötigen.

Eine neue Generation von SiC- und GaN-Leistungshalbleitern hat die Anforderungen in Bezug auf Arbeitsfrequenz und Leistungsdichte erhöht. Während traditionelle MOSFET-Technologien bislang in Arbeitsfrequenzbereichen von 100 kHz bis 500 kHz, in einigen Ausnahmefällen bis zu 1 MHz, und mit einer Leistungsbegrenzung von  $2\text{ kW/m}^3$  eingesetzt werden, können die neuen Halbleiter bei zehnmal höheren Frequenzen (in der Regel bis zu 10 MHz) bei einer Leistungsdichte bis zu  $10\text{ kW/m}^3$  arbeiten.<sup>[1]</sup> Dies stellt neue Anforderungen an die Belastungskapazität aller anderen Stromversorgungs-komponenten, also auch der Induktivitäten.

#### 3. Eigenschaften von verpressten Speicherinduktivitäten

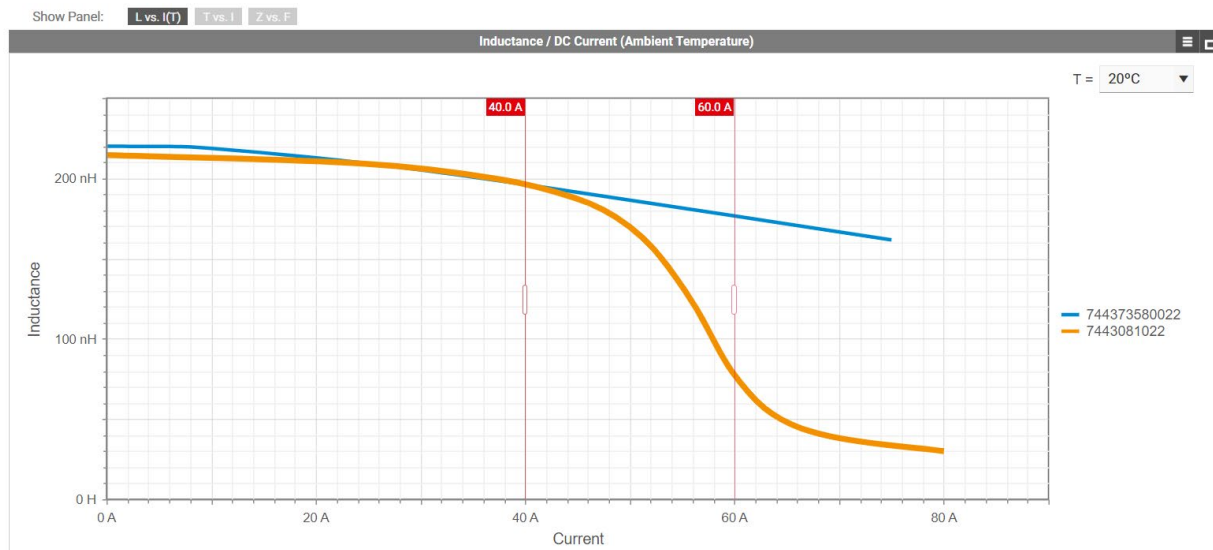
Je stärker Betriebsstrom und Temperatur ansteigen, desto anfälliger werden Speicherinduktivitäten mit Ferritkernen für eine magnetische Sättigung, die durch den plötzlichen Abfall der Induktivitätswerte einen Systemausfall zur Folge haben kann. Daher verwenden manche Entwickler verpresste Speicherinduktivitäten, deren Kernmaterial aus magnetischen Metallpulverlegierungen besteht. Sie bieten eine stabilere Leistung bei hohen Temperaturen im Hochstrombetrieb, was in Abbildung 1 gezeigt wird.

Der Sättigungsstrom ( $I_{\text{sat}}$ ) ist jedoch nur eines der vielen wichtigen Kriterien, die bei der Auswahl der richtigen Speicherinduktivität zu berücksichtigen sind<sup>[2]</sup>. Induktivität (L), Temperaturanstieg basierend auf Nennstrom ( $I_{\text{r}}$ ), DC-Widerstand ( $R_{\text{DC}}$ ), Wechsel- und Gleichstromverluste<sup>[3]</sup> sind je nach vorgesehener Anwendung weitere wichtige Parameter. Verpresste Speicherinduktivitäten dürfen nur minimale Leistungsverluste aufweisen, um die Anforderungen in puncto Effizienz von über 95 % bei hoher Temperaturbeständigkeit (sowohl in Bezug auf die magnetischen Eigenschaften als auch auf die Langzeitzuverlässigkeit) zu erfüllen.

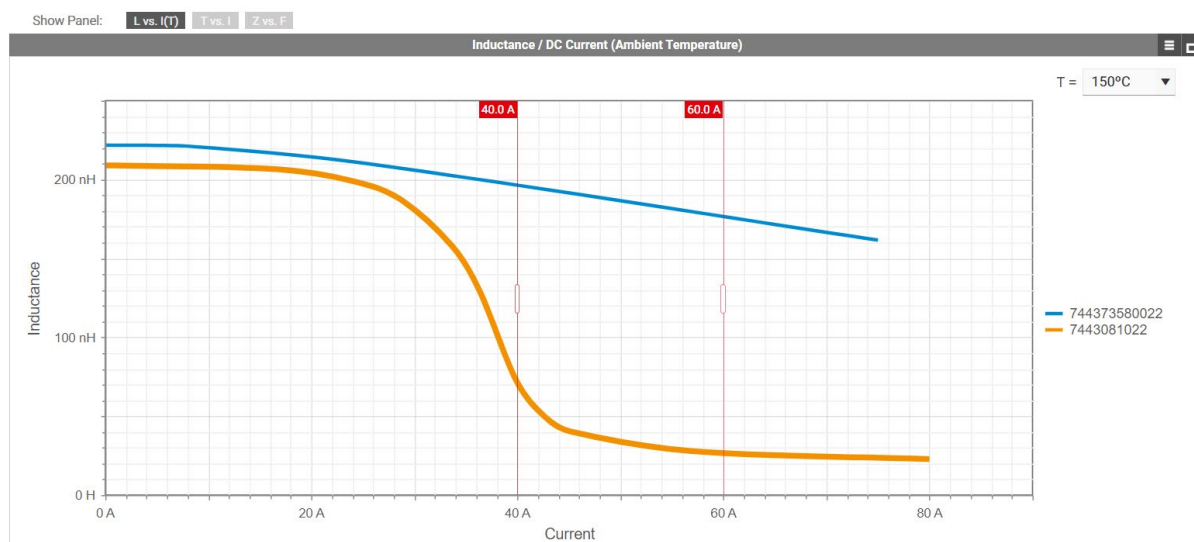
Die Leistungsverluste in einer magnetischen Komponente lassen sich in zwei Arten unterteilen: Kernverluste und Wicklungsverluste.

# APPLICATION NOTE

## ANP128 | Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten



a. Sättigung bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C



b. Sättigung bei einer Umgebungstemperatur von 150 °C

Abbildung 1: Vergleich des Sättigungsstroms ( $I_{sat}$ ) von einer Speicherinduktivität mit harten Sättigungseigenschaften (orange) und weichen Sättigungseigenschaften (blau) bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen, wie in **REDEXPERT** angezeigt.

Wicklungsverluste entstehen durch den Gleichstromwiderstand abhängig vom Gesamtquerschnitt des Leiters und durch den Wechselstromwiderstand in Form des Skin- und Proximity-Effekts eines Leiters.<sup>[4]</sup>

Ein hoher  $R_{DC}$  wirkt sich durch den hohen Wechselstrom, der durch die Spule der Speicherdrösel fließt, direkt auf den  $I^2R$ -Leistungsverlust und einen Spannungsabfall aus. Aufgrund der geringen Permeabilität magnetischer Metallpulverlegierungen muss die Anzahl der Windungen in der Spule erhöht werden, um den gewünschten Induktivitätswert zu erhalten. Hierfür ist ein längerer Wicklungsdraht erforderlich, wodurch der  $R_{DC}$  ansteigt.

Kernverluste wiederum sind abhängig vom Kernmaterial, das für die Herstellung der Induktivität verwendet wird. In diesem Fall müssen Parameter wie geometrische Form, Volumen,

Betriebstemperaturbereich, Arbeitsfrequenzbereich und Grad der magnetischen Sättigung berücksichtigt werden.<sup>[5]</sup>

Kernverluste setzen sich vorwiegend aus Hysterese- und Wirbelstromverlusten zusammen. Hystereseverluste stehen mit der Ausrichtung der magnetischen Dipole der Domänen im Material in Zusammenhang, wenn Energie für die Änderung der Flussdichte verbraucht wird, was zu thermischer Erhitzung führt (Entstehung überflüssiger Energie). Andererseits werden Wirbelströme im Kern der Induktivität induziert, weil dieser leitfähig ist. An der Kernoberfläche fließen Wirbelströme in die gleiche Richtung wie die Ströme in der Spule, während die induzierten Ströme im Kerninneren aufgrund der Gegeninduktion in die andere Richtung fließen. Diese Eigenschaften können durch die Wahl der Materialien für die Konstruktion der Speicherinduktivität verbessert werden.<sup>[6]</sup>

## APPLICATION NOTE

### ANP128 | Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten

Derzeit sind viele verschiedene magnetische Materialien für die Herstellung von Induktivitäten auf dem Markt verfügbar, darunter herkömmliche weichmagnetische Ferrite (Mn-Zn, Ni-Zn und Ni-Cu-Zn), weichmagnetische Metalle (Si-Fe, amorphes, nanokristallines Kernmaterial) oder Metallpulverlegierungen (Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Co). Zwar weisen die Basismaterialien von Pulverkernen aus Metalllegierungen eine hohe Permeabilität auf, jedoch entsteht durch die gegeneinander isolierten Körner ein verteilter, nicht-magnetischer Luftspalt über dem magnetischen Pfad, der ihre effektive Permeabilität  $\mu_e$  auf unter 200 (in der Regel 14–300) senkt. Bei Ferriten und weichmagnetischen Metallen, die beide eine hohe Permeabilität ( $> 1000$ ) aufweisen, muss für die Linearisierung der Hystereseurve zur Vermeidung einer schnellen Sättigung ein Luftspalt eingefügt werden, wodurch sich die effektive Permeabilität verringert. Durch das Einfügen eines Luftspalts wird der resultierende magnetische Widerstand aus Ferrit und Luftspalt durch den Spalt erhöht. An den Spalträndern findet eine Feldkonzentration statt, die hohe Wirbelströme verursacht, während dies bei einem verteilten Luftspalt nicht der Fall ist.

Als Alternative zu keramischen Werkstoffen mit niedriger Sättigungsflussdichte bieten magnetische Metallpulverlegierungen eine zwei- bis dreimal höhere Sättigungsflussdichte und sind in vielen verschiedenen Materialkombinationen für die Optimierung spezifischer Anwendungen erhältlich.

Die Partikel der magnetischen Metalllegierung werden mit einer dünnen, elektrisch isolierenden Schicht überzogen und mit einem Bindemittel aus Polymer oder einem anderen Material verpresst.

Die Mikrostruktur ist in Abbildung 2 dargestellt. Diese Art von Magnetkern wird als weichmagnetischer Verbundwerkstoff (Soft Magnetic Composite, SMC) bezeichnet.

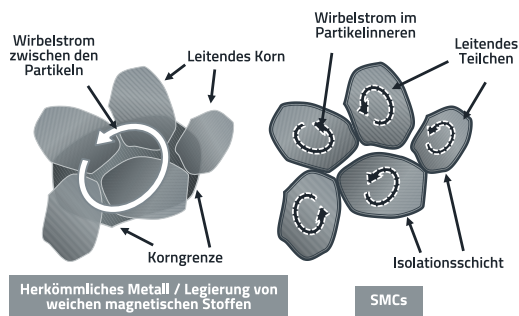


Abbildung 2: Typische Mikrostruktur und schematische Darstellung der Wirbelstrompfade von (links) traditionellen weichmagnetischen Metall-/Legierungs- und (rechts) SMC-Materialien.<sup>[2]</sup>

Die beschichteten Partikel werden zusammen mit einem Bindemittel unter hohem Druck in die gewünschte Kerengeometrie verpresst. Diese verteilte Isolationsschicht trennt die Partikel voneinander, sodass viele kurze, unverbundene elektrische Pfade entstehen, wodurch Wirbelstromverluste effektiv reduziert werden. Darüber hinaus sorgen Isolationsschicht und Bindemittel für einen gleichmäßig verteilten Luftspalt entlang des Magnetpfades. SMC-Kerne sind somit für Hochstrom- und Hochfrequenzanwendungen geeignet.

In einem idealen Szenario sind die Wirbelströme in einem einzelnen Kernpartikel deutlich geringer als bei untereinander leitenden Partikeln. Hierin unterscheiden sie sich von Ferritkernen, die von Natur aus eine hohe Materialbeständigkeit haben, oder von leitfähigen weichmagnetischen Metallen, die in isolierenden, dünnen Folien oder Streifen verwendet werden. Bei Hochfrequenzanwendungen ermöglicht dieser Konstruktionsunterschied, Leistungseinschränkungen zu überwinden. Wegen des verteilten Luftspalts zeichnen sich weichmagnetische Verbundmaterialien durch eine hervorragende Gleichstromvorspannung und außergewöhnliche Temperaturstabilität im Vergleich zu Ferritmaterialien aus. Dank dieser Eigenschaften sind SMC besonders gut für den Einsatz in Hochstromanwendungen und eine hohe Leistungsdichte geeignet.

Die von verpressten Speicherinduktivitäten erwartete langfristige Temperaturstabilität wird jedoch manchmal beeinträchtigt, wenn die Komponente über einen längeren Zeitraum hohen Temperaturen ausgesetzt ist und bei hohen Frequenzen verwendet wird.

Besonderes Augenmerk liegt hier auf der Degradation des magnetischen Materials, insbesondere den Zerfall der Isolierungsbeschichtung der Pulverpartikel im Drosselkern, und darauf, wie sich dieser auf den Abfall der Leistung der Induktivität auswirkt.

## APPLICATION NOTE

### ANP128 | Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten

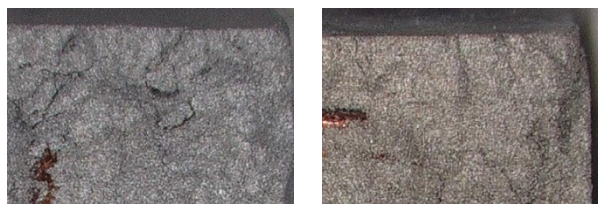
#### 4. THERMISCHE ALTERUNG BEI VERPRESSTEN SPEICHERINDUKTIVITÄTEN

##### 5. Effekt der thermischen Alterung bei verpressten Materialmischungen

Bei Kernen aus weichmagnetischen Verbundwerkstoffen zeigt sich thermische Alterung in langfristigen, irreversiblen Veränderungen von Struktur, Zusammensetzung und Morphologie. Der Degradationsprozess wird durch die kontinuierliche Exposition gegenüber hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum ausgelöst, wodurch die elektrische Isolierung zwischen den Kernpartikeln verändert wird. Dies führt zu einem deutlichen Anstieg der Kernverluste, wodurch die Leistung der Induktivität und ihre Funktion in einem Schaltregler beeinträchtigt wird.

Einige Anzeichen dieses unerwünschten Phänomens sind erhöhte Leistungsverluste, steigende Eigenerwärmung, Anstieg der elektromagnetischen Emissionen (EMI) und eine Verschlechterung des Gütefaktors Q bei hohen Frequenzen. Auch das Aussehen des Kernmaterials verändert sich und steht ebenfalls mit dem Leistungsrückgang in Zusammenhang.

Das Ausmaß dieser Veränderungen ist direkt von der Kerntemperatur, der Expositionsdauer und dem Kernmaterial selbst abhängig. Um den ersten Effekt der thermischen Alterung besser zu verstehen, wurden verschiedene verpresste Speicherinduktivitäten zum Vergleich über einen Zeitraum von 1000 Stunden bei 200 °C getestet. Abbildung 3 zeigt, wie sich hohe Temperaturen allgemein auf das Erscheinungsbild des Materials auswirken.



a. vor dem Test

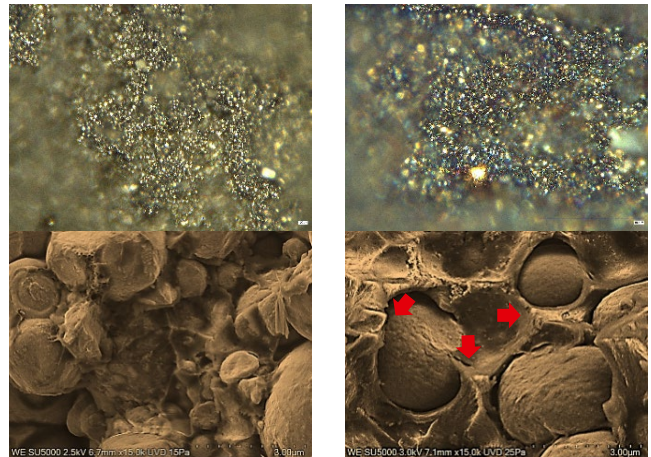
b. nach dem Test

Abbildung 3: Verpresste Speicherinduktivitäten derselben Artikel- und Losnummer mit AEC-Q200 Grad 0-Qualifikation (-55 °C bis +150 °C) vor dem Test (linke Spalte) und nach dem Test (rechte Spalte) bei 200 °C über 1000 Std.

Bei Exposition bei hohen Temperaturen über einen längeren Zeitraum beginnen sich Isolationsbeschichtung und Bindemittel im Eisenpulverkern zu zersetzen, was zu einer reduzierten Beständigkeit des Materials führt. Manche Hersteller bieten verpresste Speicherinduktivitäten mit AEC-Q200-Qualifikation an. Dennoch gibt es bedeutende Unterschiede zwischen Drosseln mit entsprechender

Qualifikation, die zusätzlich widerstandsfähig gegenüber thermischer Alterung sind, und solchen, bei denen dies nicht der Fall ist.

Dies wird noch deutlicher, wenn die getesteten Komponenten im Detail untersucht werden, wie in Abbildung 4 gezeigt.



a. Linke Spalte: vor dem Test.

b. Rechte Spalte: nach dem Test.

Abbildung 4: In der ersten Reihe sind bei Betrachtung unter einem Mikroskop mit 1000-facher Vergrößerung nach dem Test einige verbrannte Bereiche zu erkennen. In der zweiten Reihe sind Aufnahmen mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) dargestellt, auf denen eine signifikante Verringerung der Bindemitteldicke sowie eine Degradation zu sehen sind, wo die verbrannten Materialien eine Art zweite Schicht bilden.

Der in Abbildung 3 zu sehende Verfärbungseffekt wird durch das Verbrennen der Isolierung zwischen den Materialpartikeln und das Verschmelzen des Beschichtungsmaterials verursacht. Die Ergebnisse zeigen, dass manche Bestandteile bei höheren Temperaturen von außen in die Pulverpartikel einzudringen scheinen, wodurch die Isolationsbarriere auf der Partikeloberfläche <sup>[8]</sup> und mit ihr auch der kleine Luftspalt des SMC-Materials reduziert wird.

Die in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellten Ergebnisse veranschaulichen die Auswirkungen hoher Temperaturen auf das Kernmaterial der Induktivitäten, auch wenn die Induktivität eine AEC-Q200 Grad 0-Qualifikation (-55 °C bis +150 °C) besitzt.

Als Entwickler könnte man sich fragen, warum dieser Mangel nicht beim Standardtest für die Qualifikation entdeckt wird. Der Hauptgrund hierfür ist, dass die Tests meist nur auf dem Datenblatt und den allgemeinen Bauteilspezifikationen des Anwenders (d. h. Umgebungsbedingungen usw.) basieren und Leistungsverluste über die Zeit unter Umständen nicht berücksichtigt werden. Die Eigenschaften von Speicherinduktivitäten sind häufig mit 100 kHz, 100 mV/10 mA und ohne DC-Vorspannung angegeben. Normalerweise wirkt sich dieses Degradationsphänomen bei



# APPLICATION NOTE

## ANP128 | Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten

dieser niedrigen Frequenz nur geringfügig aus, ist jedoch im MHz-Bereich erheblich. Daher bleibt der Effekt der thermischen Alterung bei einer Prüfung gemäß den AEC-Q200-Akzeptanzkriterien häufig unentdeckt.

### 6. Auswirkungen der thermischen Alterung auf die Leistung von Induktivitäten

Wird eine verpresste Speicherinduktivität in einem Schaltnetzteil als Speicherdrossel eingesetzt, macht sich der Effekt der thermischen Alterung bei höheren Spannungen und Frequenzen stärker bemerkbar.

Je größer der Wechselstromanteil im Spulenstrom ist, desto größer ist der Anteil der AC-Verluste an den Gesamtverlusten. Durch den Anstieg der AC-Verluste entsteht zusätzliche Wärme, die an die Umgebung abgeführt werden muss. Dies schlägt sich wiederum in höheren Betriebstemperaturen nieder, die diesen Degradationsprozess zusätzlich beschleunigen können. Der Prozess birgt das Risiko, zu einem katastrophalen thermischen Durchgehen (Runaway) mit Ausfall zu führen, der die Zuverlässigkeit des gesamten Systems beeinträchtigt.

Wird eine Induktivität in einer EMV-Filteranwendung eingesetzt, wirkt sich die durch die thermische Alterung bedingte Reduktion der AC-Impedanz der Verbindung zwischen den Pulverpartikeln auf die Impedanzkurve aus. Gleichzeitig steigen die AC-Verluste im Kern. Diese Faktoren führen zu einem verringerten Wirkungsgrad.

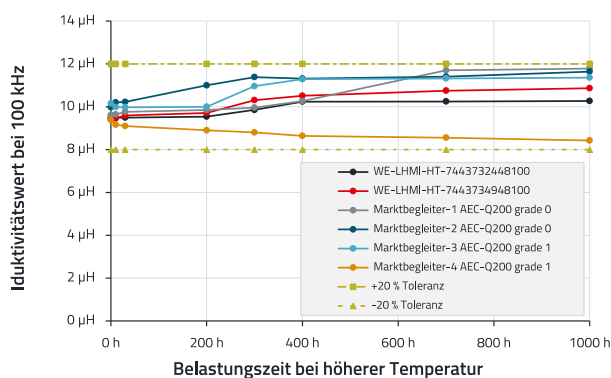
Der Degradationsprozess kann durch Messung des Q-Werts der Induktivität über die Zeit überwacht werden. Der Q-Wert ist definiert als induktive Reaktanz geteilt durch den Widerstand bei einer bestimmten Frequenz (es werden sowohl  $R_{DC}$ - als auch  $R_{AC}$ -Widerstand berücksichtigt). Der Q-Wert hängt somit direkt mit den Leistungsverlusten zusammen. Die neuen verpressten Speicherinduktivitäten

WE-LHMI [7443732448100](#) und WE-LHMI [7443734948100](#)

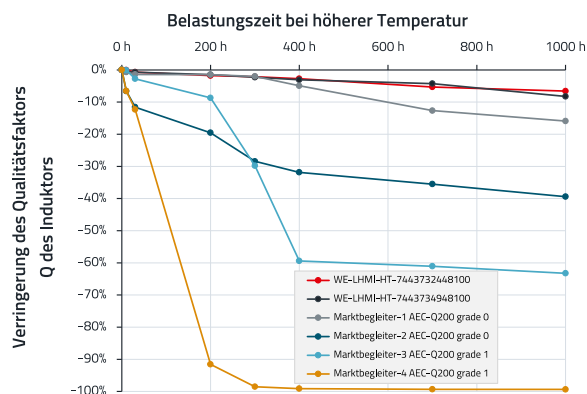
wurden einem Test mit einem Induktivitätswert von 10  $\mu\text{H}$  unterzogen und mit einigen beliebigen Bauteilen von Marktbegleitern mit ähnlicher Größe und ähnlichem Induktivitätswert verglichen. Alle getesteten Induktivitäten, insgesamt waren es 100 Musterteile, waren in einer Klimakammer einer konstanten Temperatur von 200 °C ausgesetzt und wurden in regelmäßigen Abständen gemessen, um die Veränderung des L- und Q-Werts während des 1000-Stunden-Tests zu beobachten. Bei den ausgewählten Induktivitäten handelte es sich um verpresste Speicherinduktivitäten mit AEC-Q Grad 0- bzw. Grad 1- Qualifikation, die laut Kennzeichnung für eine maximale Betriebstemperatur von über 150 °C geeignet waren. Wie in Abbildung 5-a zu sehen, bleibt der angegebene Induktivitätswert von 10  $\mu\text{H}$  bei den Testbedingungen von 100 kHz (bei AEC-Q-Tests üblich) über eine Testdauer von 1000 Stunden innerhalb des Toleranzbereichs von  $\pm 20\%$ . Dies zeigt, warum Entwickler bestimmte Leistungsveränderungen nicht allein durch Messung der Induktivität unter den typischen, im Datenblatt angegebenen Testbedingungen identifizieren können. Der Qualitätsfaktor Q nimmt jedoch bei höheren Temperaturen mit zunehmender Expositionsdauer ab, wie in Abbildung 5-b gezeigt. Der in der Abbildung dargestellte Qualitätsfaktor Q wurde bei einer Frequenz von 2 MHz ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Wert auch bei Induktivitäten mit der besseren AEC-Q200-Qualifikation erheblich sinken kann, selbst wenn die gemessenen Induktivitätswerte noch innerhalb der Toleranz liegen.

Während bei einigen Wettbewerberbauteilen der Q-Wert im Zeitverlauf kontinuierlich abnimmt, bleibt er bei den getesteten verpressten Speicherinduktivitäten der WE-LHMI-Serie nahezu konstant. In Hochtemperaturanwendungen lässt



a. L-Wert für die Induktivität bei 100 kHz über 1000 Std. bei 200 °C.



b. Verringerung des Q-Werts bei 2 MHz über 1000 Std. bei 200 °C.

Abbildung 5: Leistungsvergleich WE-LHMI HT mit Wettbewerbsbauteilen mit AEC-Q200-Qualifikation und angegebener Temperaturtoleranz von über 125 °C.

sich bei den getesteten Induktivitäten der Marktbegleiter somit ein kontinuierlicher Effizienzverlust feststellen, gefolgt von einer steigenden Betriebstemperatur, welche die langfristige Zuverlässigkeit des Systems gefährdet.

Bei niedrigen Frequenzen gibt es keine bemerkenswerten Unterschiede im Q-Wert entsprechend dem gemessenen L-Wert. Dennoch zeigen die Testergebnisse einen kritischen Leistungsabfall, wenn verpresste Speicherinduktivitäten bei Frequenzen über 100 kHz verwendet werden.

Würth Elektronik eiSos misst AC-Verluste durch Anlegen eines Rippelstroms in Dreieckform, d. h. einer Rechteckspannung ähnlich den realen Betriebsbedingungen eines Schaltnetzteils. Der Oberwellengehalt der rechteckigen Wellenformen im kurzen Tastverhältnis erfordert ein fortschrittliches Messsystem, um die AC-Verluste der Speicherinduktivität zu messen. Anhand der Wellenform von Hochfrequenzkomponenten lässt sich ein Anstieg der AC-Verluste beobachten, der die Eigenerwärmung des Bauteils verstärkt.

Würth Elektronik eiSos führt in seinem umfangreichen Portfolio an elektronischen Bauteilen ein komplettes Sortiment verpresster Speicherinduktivitäten, die für einen großen Temperaturbereich und zahlreiche Anwendungen geeignet sind. Die neue Generation der erhältlichen verpressten Speicherinduktivitäten weist unterschiedliche Eigenschaften auf, wie in Tabelle 1 dargestellt.

So können Entwickler aus einem riesigen Angebot in Bezug auf Größe, Leistung und Aufbau die passende verpresste Speicherinduktivität für ihre Anwendung auswählen. Die für moderne, anspruchsvolle Anwendungen ausgelegte Baureihe von verpressten Speicherinduktivitäten für Hochtemperaturapplikationen bietet einen großen Betriebstemperaturbereich von -55 °C bis +150 °C mit AEC-Q200 Grad 0-Qualifikation und ohne Bedenken bezüglich der thermischen Alterung.

## 7. ZUSAMMENFASSUNG

In dieser Application Note beschäftigt sich Würth Elektronik eiSos mit den Herausforderungen bei der Verwendung passiver Bauteile, insbesondere dem Effekt der thermischen Alterung auf die Leistung verpresster Speicherinduktivitäten, der von Kunden berichtet wurde.

Es wurden einige wichtige Aspekte angesprochen, wie die Auswirkungen einer Langzeitexposition gegenüber hohen Temperaturen auf Materialmischungen und die Folgen für die Leistung verpresster Speicherinduktivitäten.

Außerdem wurde auf eine kritische Abnahme des Q-Werts bei verpressten Speicherinduktivitäten der Marktbegleiter mit AEC-Q200 Grad 0-Qualifikation hingewiesen, die mit zunehmenden Leistungsverlusten verbunden ist und mit den herkömmlichen Messmethoden nur schwer erkannt werden kann.

Um der entscheidenden Rolle der Temperaturbeständigkeit in der Leistungselektronik Rechnung zu tragen, hat Würth Elektronik eiSos eine neue Baureihe hochtemperaturbeständiger Produkte entwickelt, die keine thermische Alterung zeigen.

Diese innovative Lösung gewährleistet verbesserte Zuverlässigkeit und Effizienz in anspruchsvollen Anwendungen und entspricht dem sich wandelnden Bedarf der Branche an widerstands- und leistungsfähigen passiven Bauteilen.

## APPLICATION NOTE

### ANP128 | Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten




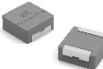


| WE Serie   | Größe  | Inductor $\mu\text{H}$ | $R_{DC}$ (typ) $\text{m}\Omega$ | $I_{\text{sat}}$ 30% A | $I_{\text{rp}}$ (40K) A |
|--|--------|------------------------|---------------------------------|------------------------|-------------------------|
| <b>WE-LHMI</b>    | 4020HT | 1.00 – 10.00           | 21.00 – 151.00                  | 8.50 – 2.40            | 7.00 – 2.40             |
|  | 5020HT | 1.00 – 10.00           | 15.00 – 186.00                  | 1.20 – 3.00            | 7.90 – 2.20             |
|  | 7030HT | 1.00 – 10.00           | 6.70 – 65.00                    | 18.50 – 6.00           | 13.50 – 4.30            |
|  | 7050HT | 1.00 – 10.00           | 5.42 – 40.00                    | 17.80 – 8.00           | 15.70 – 5.20            |
| <b>WE-MAPI</b>    | 2512HT | 0.33 – 4.70            | 23.20 – 319.60                  | 8.60 – 2.40            | 6.20 – 1.40             |
|  | 3015HT | 0.56 – 10.00           | 19.30 – 477.80                  | 7.80 – 2.40            | 7.30 – 1.20             |
|  | 3020HT | 0.68 – 6.80            | 24.40 – 197.40                  | 6.70 – 3.70            | 6.40 – 2.00             |
|  | 4020HT | 0.33 – 5.60            | 6.50 – 70.00                    | 14.80 – 4.90           | 13.30 – 3.50            |
|  | 6030HT | 0.33 – 3.30            | 2.60 – 17.70                    | 27.50 – 11.20          | 21.60 – 9.60            |
| <b>WE-XHMI</b>    | 4020   | 0.22 – 2.20            | 3.05 – 20.20                    | 24.20 – 6.30           | 20.00 – 7.20            |
|  | 4030   | 0.47 – 4.70            | 3.90 – 31.30                    | 19.20 – 5.80           | 17.10 – 5.30            |
|  | 5030   | 0.33 – 4.70            | 3.01 – 22.90                    | 33.00 – 7.50           | 21.20 – 6.80            |
|  | 7070   | 3.30 – 10.00           | 6.40 – 19.00                    | 18.60 – 12.60          | 18.20 – 9.60            |
| <b>WE-LHCA</b>   | 7030   | 0.47 – 22.00           | 3.80 – 163.00                   | 4.50-26.00             | 2.50 – 13.8             |
|  | 1040   | 1.00 – 68.00           | 2.70 – 215                      | 4.85-33.80             | 2.6 – 24.50             |
|  | 1365   | 1.00 – 47.00           | 1.70 – 72.00                    | 6.5-44.80              | 5.1 – 30.5              |
|  | 1770   | 5.60 – 68.00           | 5.80 – 90                       | 8.2 – 40.85            | 4.90 – 24.5             |
| <b>WE-MAIA</b>  | 4020HT | 0.33 – 5.60            | 6.50 – 70.00                    | 14.80 – 4.90           | 13.30 – 3.50            |
|  | 6030   | 0.18 – 4.70            | 1.32 – 31.00                    | 50.60 – 10.50          | 35.65 – 5.80            |
| <b>WE-XHMA</b>  | 6060   | 4.70 – 15.00           | 13.00 – 42.00                   | 13.00 – 7.40           | 9.60 – 4.90             |
|  | 8080   | 1.00 – 10.00           | 2.10 – 25.00                    | 38.15 – 10.70          | 30.25 – 8.50            |
|  | 1090   | 2.20 – 15.00           | 2.20 – 14.80                    | 32.10 – 16.95          | 32.05 – 10.75           |
|  | 1510   | 4.70 – 33.00           | 3.10 – 18.00                    | 47.40 – 18.15          | 29.37 – 10.80           |

Tabelle 1: Hochtemperatur WE-Molded Power Inductor Serie, mit AEC-Q200 grade 0 Qualifikation, dafür ausgelegt thermische Alterung zu vermeiden

### 8. Anhang

#### A.1 Referenzen

- [1] Kasper, Matthias J., et al. "Next Generation GaN-based Architectures: From 240W USB-C Adapters to 11kW EV On-Board Chargers with Ultra-high Power Density and Wide Output Voltage Range." PCIM Europe 2022; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. VDE. (2022)
- [2] APPLICATION NOTE Power Inductors 8 Design Tips: A practical guide for the selection of power inductors for DC/DC converters. (201x)
- [3] Bramanpalli, Ranjith. APPLICATION NOTE "Accurate Inductor Loss Determination Using Würth Elektronik's REDEXPERT." (2015)
- [4] Rodriguez-Sotelo, D., et al. "Power Losses Models for Magnetic Cores: A Review. Micromachines 2022, 13, 418." (2022).
- [5] Dobrzański, L. A., M. Drak, and Bogusław Ziębowicz. "Materials with specific magnetic properties." journal of achievements in materials and manufacturing engineering 17.1-2 (2006): 37-40.
- [6] Jose Martos, Heinz Zenkner, APPLICATION NOTE ANP074 Introduction to RF Inductors. (2023)
- [7] He, Jiayi, et al. "Soft magnetic materials for power inductors: State of art and future development." Materials Today Electronics. (2023)
- [8] Nolan, William Rane. "Electrically insulating phosphate coatings for iron powder based electromagnetic core applications." PhD diss., Massachusetts Institute of Technology, 2009.



# APPLICATION NOTE

## ANP128 | Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten

### 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](http://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/app-notes](http://www.we-online.com/app-notes)



**REDEXPERT** Design Plattform  
[www.we-online.com/redexpert](http://www.we-online.com/redexpert)



Toolbox  
[www.we-online.com/toolbox](http://www.we-online.com/toolbox)



Produkt Katalog  
[www.we-online.com/produkte](http://www.we-online.com/produkte)

### KONTAKTINFORMATION



[appnotes@we-online.de](mailto: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](http://www.we-online.com)