

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler



Dr.-Ing. Efrain Bernal Alzate

1. EINLEITUNG

Bei DC-DC-Wandleranwendungen ermöglichen verpresste Induktivitäten aufgrund der Eigenschaften des magnetischen Materials sowohl kleinere Abmessungen als auch ein niedrigeres Profil. Die reduzierten Abmessungen aktueller Designs erfordern den Einsatz kleinerer Drosseln, die auch bei höheren Spannungen und Strömen unter extremen thermischen Bedingungen betrieben werden können. Die höheren elektrischen und thermischen Belastungen können im Laufe der Zeit zu einem Anstieg der Magnetkernverluste führen, was auf eine Materialverschlechterung im Zusammenhang mit dem Perkulationsphänomen zurückzuführen ist. Würth Elektronik eiSos hat als erstes Unternehmen dieses Phänomen als häufige Fehlerursache zwischen der Materialverschlechterung bei Hochspannungsbetrieb ([ANP126: Spannungsspezifikation für verpresste Induktivitäten^{\[1\]}](#)) und der Verschlechterung, die auftritt, wenn eine verpresste Induktivität hohen Temperaturen ausgesetzt wird ([ANP128: Einführung in die thermische Alterung bei verpressten Speicherinduktivitäten^{\[2\]}](#)), beschrieben.

Aber was ist dieses Perkulationsphänomen eigentlich? Welche Auswirkungen hat die Perkulation in einer verpressten Induktivität? Und noch wichtiger: Wie wirkt sich dies langfristig auf die Leistung eines DC-DC-Wandlers aus? Diese Fragen wollen wir in den folgenden Abschnitten beantworten.

2. HINTERGRUND

Früher wurden Tests zur thermischen Alterung über längere Zeiträume bei erhöhten Temperaturen durchgeführt, um die Zuverlässigkeit von Magnetmaterialien, Magnetkernen und induktiven Bauteilen zu verifizieren. Die Möglichkeiten zur Bewertung der Betriebsspannung an Speicherdrosseln beschränkten sich auf Burn-in Tests oder Spannungsimpulstests, um die Auswirkungen von transienten Spannungen auf die Isolationsintegrität zu beurteilen. Im konkreten Fall von verpressten Induktivitäten hat Würth Elektronik eiSos bei Tests mit höheren Spannungen oder Temperaturen eine Art fortschreitende Leistungsminderung bei höheren Frequenzen festgestellt. Die Ursache liegt im Auftreten einer Art von „mikroleitendem Netzwerk“ zwischen

den Metallpulverpartikeln des Kernmaterials. Dies ist auf die Zunahme der Materialleitfähigkeit zurückzuführen, die zu einem Anstieg der Kernverluste führt und mit der Zeit ein Perkulationsverhalten aufweist. Perkulationsverhalten beschreibt, wie sich in einem System ein zusammenhängender Pfad bildet, sobald ein gewisser Schwellenwert (Perkulationsschwelle) überschritten wird. Die Perkulationsschwelle ist der kritische Punkt, an dem das Material von isolierend zu leitend umschlägt.

2.1 Das Perkulationsphänomen bei verpressten Induktivitäten

Perkulation stößt in der Wissenschaft seit Jahrzehnten auf großes Interesse und hat die Entwicklung theoretischer Modelle und experimenteller Forschungsarbeiten zum Verständnis des Phänomens der Bildung zusammenhängender Strukturen vorangetrieben^[4]. Sie wurde von der Verkehrsanalyse über die Programmierung künstlicher Intelligenz bis hin zur Werkstoffgestaltung eingesetzt. Im Bereich der Werkstoffe ist die Perkulationstheorie eine Art analytisch-mathematisches Modell, das in der Literatur häufig für die Entwicklung und Modellierung der elektrischen Leitfähigkeit in verschiedenen Werkstoffen herangezogen wird^[5].

Generell beschreibt die Perkulationstheorie die langsame Ausbreitung eines Mediums durch ein Material mit feinen Poren oder Zwischenräumen sowie das Verhalten von Netzwerken beim Hinzufügen von Knoten oder Verbindungen.

Bei Verbundwerkstoffen tritt das Perkulationsphänomen auf, wenn die Menge an zugesetzten leitfähigen Metallpartikeln einen Punkt erreicht, an dem die elektrische Leitfähigkeit abrupt zunimmt. Dies ist die sogenannte Perkulationsschwelle^[6]. In zahlreichen Experimenten wurde nachgewiesen, dass die Leitfähigkeit von Verbundwerkstoffen in nichtlinearer Beziehung zur Dotierung der leitfähigen Partikel steht^[7]. Verbundwerkstoffe sind solche, die durch die Kombination von zwei oder mehr natürlichen oder künstlichen Elementen hergestellt werden, die in ihrer Kombination stärker sind als einzeln.

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

Im Fall von verpressten Induktivitäten sind weichmagnetische Verbundwerkstoffe (Soft Magnetic Composites, SMC) die Lösung, um eine bessere Leistung zu erzielen. Es handelt sich hierbei um fortschrittliche Werkstoffe, die gezielt aufgrund ihrer magnetischen Eigenschaften entwickelt wurden. Im Gegensatz zu herkömmlichen Magnetmaterialien bestehen SMC aus Pulverpartikeln einer Eisenlegierung, die mit einer dünnen Isolationsschicht überzogen und in einer nicht leitenden Matrix, wie z. B. einem Epoxid- oder Polymerbindemittel, dispergiert sind. Verpresste Induktivitäten auf SMC-Basis sind auf die Isolationsschicht und die Bindemittel angewiesen, um die Gesamtmenge der Wirbelstromverluste, d. h. die Leitfähigkeit zwischen den Partikeln^[2], zu reduzieren, wie in Abbildung 1 gezeigt:

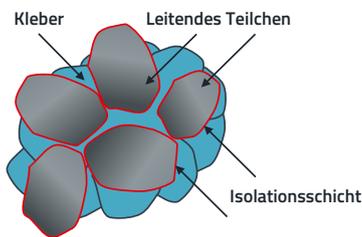


Abbildung 1: Typische Bestandteile von SMC^[2].

Forscher haben jedoch herausgefunden, dass bei hohen Spannungen oder hohen Temperaturen das Phänomen der leitfähigen Perkolation auch dann auftritt, wenn die Menge der einem Polymer zugesetzten leitfähigen Materialien gering ist^[8]. Die Theorie besagt, dass unter dem Einfluss einer starken äußeren Umgebung, wie z. B. eines starken elektrischen Feldes, leitende Partikel in Bewegung geraten, was zu einer Bewegung elektrischer Ladungen führt, wodurch die Partikel häufig miteinander kollidieren. Diese Ladungsbewegung kann elektrische Ströme erzeugen und zu einem Emissionseffekt beitragen, der es Elektronen ermöglicht, die Isolationsschicht in einem Material zu überwinden^[9]. Dies kann mit ungünstigen oder sogar destruktiven Auswirkungen verbunden sein^[10]. Tatsächlich haben wir festgestellt, dass bei höherer Stromstärke, aufgrund hoher Spannungen oder bei kontinuierlicher Einwirkung höherer Temperaturen der Verlust der Isolationseigenschaften des Bindemittels und der Isolationsschicht selbst zur Bildung weiterer mikroleitender Netzwerke führt, d. h. zum Phänomen der Perkolation in SMC. Zur Veranschaulichung des Konzepts wird wie in Abbildung 2 gezeigt, eine schematische Darstellung des Perkulationsnetzwerks in Verbundwerkstoffen^[11] verwendet.:

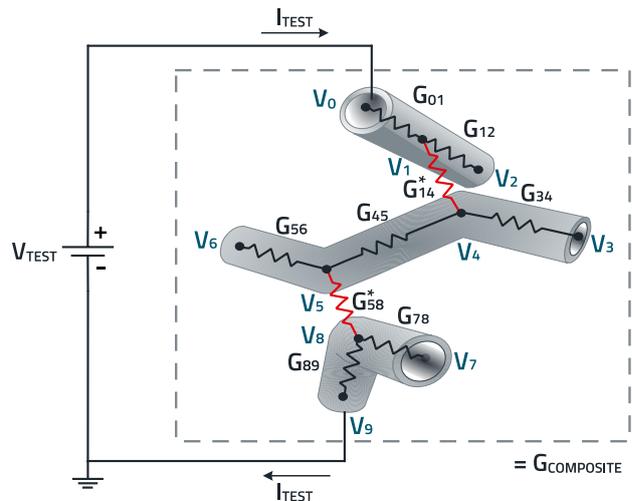
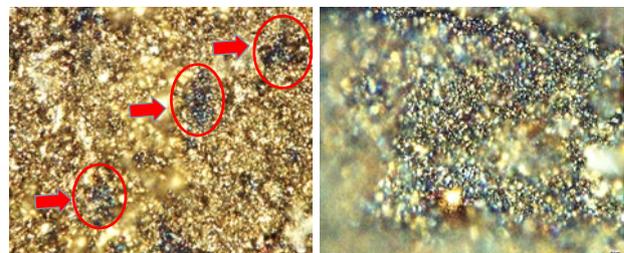


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Wachstums eines Perkulationsnetzwerks in Verbundwerkstoffen basierend auf^[11]

In der Abbildung stellen die roten Widerstände die neuen leitenden Verbindungen zwischen den exponierten Eisenpartikeln des Werkstoffs selbst dar. Diese Verbindung führt zur Bildung von Clustern, die die verpresste Induktivität schädigen können. Dabei reicht das Spektrum von geringfügigen Beeinträchtigungen bis hin zur vollständigen Schädigung des Materials, wie in Abbildung 3 dargestellt.



a. Erste durch Perkolation entstandene Clusterformationen.

b. Material mit ausgeprägter Perkolation.

Abbildung 3: Die Bilder zeigen einige Brandstellen und wurden mit einem Mikroskop bei einer 1000-fachen Vergrößerung nach einem Belastungstest an einer verpressten Induktivität aufgenommen.

Zusammenfassend **definieren wir das Perkulationsphänomen in einer verpressten Induktivität als materialbedingte Degradierung infolge erhöhter Spannung oder Temperatur, bei der es zu einem Übergang vom isolierenden zum leitenden Zustand kommt und infolgedessen die Kernverluste durch vermehrte Wirbelströme steigen.**

Die nichtlineare Beziehung zwischen dem Verlust der Isolationsfähigkeit und der Zunahme der elektrischen Leitfähigkeit (infolge des Auftretens der gelben Netzwerke) in einem SMC ist in Abbildung 4 dargestellt.

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

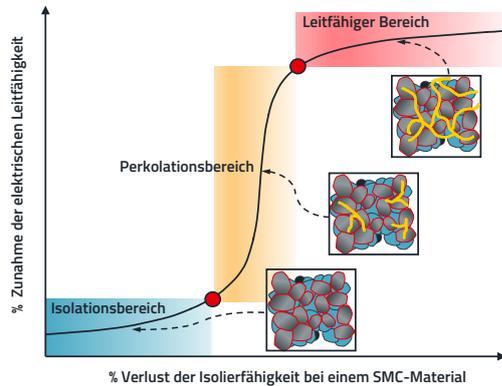


Abbildung 4: Perkolationschwelle bei verpressten Induktivitäten.

Solange der Verlust der Isolationsfähigkeit unter dem Schwellenwert liegt, steigt die Leitfähigkeit des Verbundwerkstoffs allmählich mit steigender Temperatur oder angelegter Spannung. Wird das Material jedoch höheren Spannungen oder höheren Temperaturen ausgesetzt, erhöht sich die Leitfähigkeit, was schließlich zur Perkolation führt. An diesem Punkt durchläuft der Perkulationspfad das Bindemittel, verbindet dabei die Eisenpartikel und bildet die in Abbildung 3a dargestellten Cluster. Mit der Zeit nehmen die leitenden Pfade des Materials erheblich zu: Aus dem vormaligen Isolationsmaterial wird nun ein leitfähiger Werkstoff. Es handelt sich um ein irreversibles Phänomen, das die Leistung der betroffenen Drossel beeinträchtigt.

3. AUSWIRKUNGEN DER PERKOLATION AUF DIE LEISTUNG EINER VERPRESSTEN INDUKTIVITÄT

Wie bereits erwähnt, tritt das Phänomen der Perkolation während der Lebensdauer einer verpressten Induktivität auf und ist in frühen Stadien schwer zu erkennen. Eine verpresste Induktivität mit AEC-Q200-Qualifizierung für Temperaturen über 125 °C kann von Perkolation betroffen sein, die mit den üblichen Vor- und Nachmessungen, wie sie in der Norm empfohlen werden, nicht erkannt wird. Dies wurde von Würth Elektronik eiSos bereits in den beiden vorherigen Application Notes [ANP126](#) und [ANP128](#) erläutert.

Diesen Application Notes ist gemeinsam, dass ein beschädigtes Bauteil bei Messungen mit niedrigen Frequenzen (z. B. 100 kHz) keine Veränderung von Induktivität oder Widerstand zeigt. Erst bei hohen Frequenzen (z. B. 2 MHz) mit einem Impedanzanalysator deutet ein reduzierter Q-Wert auf eine Leistungsminderung hin.

Um das Phänomen der Perkolation aufgrund höherer Spannung oder Temperaturen zu bestätigen, wurde für die

vorliegende Application Note ein neuer Testaufbau entwickelt. Insgesamt wurden 20 Exemplare einer 4,7- μ H-Drossel aus derselben Fertigungsladung entnommen, die alle vergleichbare elektrische Eigenschaften aufwiesen. Für die Versuchsreihe wurden zehn Drosseln einem Hochspannungstest und zehn weiteren einem thermischen Alterungstest zugeführt. Die Messungen erfolgten jeweils bei einer Umgebungstemperatur von 20 °C.

Beim Alterungstest wurde die Schädigung durch die fortgesetzte Einwirkung einer Temperatur von 160 °C über einen längeren Zeitraum von 300 Stunden ausgelöst. Der Hochspannungstest wurde mit einem modularen Impulsgenerator durchgeführt, der eine Abfolge kontrollierter Impulse an die Drosseln abgab.

Beim Hochspannungstest wurde die erste Sequenz der Spannungsimpulse auf knapp 120 VDC festgelegt, was dem im Datenblatt des Herstellers empfohlenen Grenzwert entspricht. Die angelegten Impulse hatten eine Dauer von jeweils 36 μ s und erfüllten damit die Empfehlung der Norm IEC61000-4-5 für die Impulsanstiegs- und -abfallzeit. Insgesamt wurden 35 Impulse an jede Drossel angelegt, um die jeweiligen Auswirkungen zu bewerten.

Nach dieser Validierung wurden die Drosseln einer Reihe von Überspannungsimpulsen unterzogen. Die Zusammenfassung der Ergebnisse vor und nach den Tests ist in Abbildung 5 zu sehen.

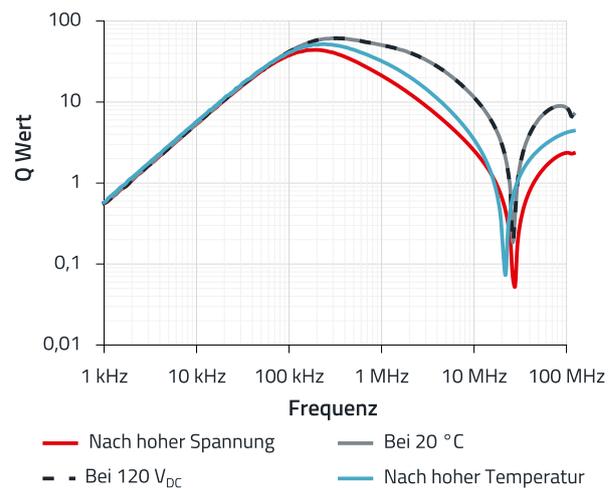


Abbildung 5: Änderung des Q-Faktors infolge hoher Temperatur oder hoher Spannung.

Die graue Linie zeigt den durchschnittlichen Gütefaktor Q bezogen auf die Frequenz der ersten zehn Prüflinge vor der Einwirkung höherer Temperaturen, und die schwarze gestrichelte Linie entspricht den anderen zehn Tests nach der

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

ersten Impulsrunde bei 120 VDC. Es ist zu erkennen, dass beide Kurven dasselbe Verhalten aufweisen. Die rote Linie entspricht dem durchschnittlichen Q-Wert in Abhängigkeit von der Frequenz nach Hochspannungsbelastung mit Impulsen im höheren Spannungsbereich um 190 VDC und die blaue Kurve dem 160 °C Test

Der Spannungswert von 190 VDC stellt eine 60-prozentige Erhöhung gegenüber der Spannungsgrenze dar, die von der zuvor erwähnten nichtleitenden Matrix unterstützt wird. Frühere Erfahrungen mit der ausgewählten Drossel haben gezeigt, dass eine Spannung von 240 VDC bei den ersten Impulsen zu Rissen am Bauteil führt.

Insgesamt wurden zehn 190-VDC-Impulse angelegt. Zwar wurden keine Risse festgestellt, aber es ist eine deutliche Veränderung der Q-Kurve zu erkennen. Die blaue Linie, der Q-Durchschnittswert nach einer Einwirkung hoher Temperaturen, zeigt erwartungsgemäß die gleiche Wirkung. Allgemein ist zu beobachten, dass beide Mittelwerte der Tests, d.h. die erhöhte Spannung und die erhöhte Temperatur, die gleiche Reduzierung des Q-Faktors bei höheren Frequenzen und eine leichte Änderung der Resonanzfrequenz aufweisen.

Dabei ist zu beachten, dass die Perkolation aufgrund der durch den Test induzierten physikalischen Effekte an verschiedenen Stellen im Kern der Drossel beginnt, was entweder mit elektrischer oder mit thermischer Perkolation in Verbindung gebracht werden könnte. Der Trend ist allerdings nicht zu übersehen, die Perkolation führt bei längerer Einwirkzeit zu einer stetigen Abnahme der Q-Kurve in kürzerer Zeit, wie in [ANP128^{\[2\]}](#) beschrieben. Die Ergebnisse für den Fall der thermischen Alterung bei 200 °C über 5.000 Stunden sind in der folgenden Abbildung dargestellt.

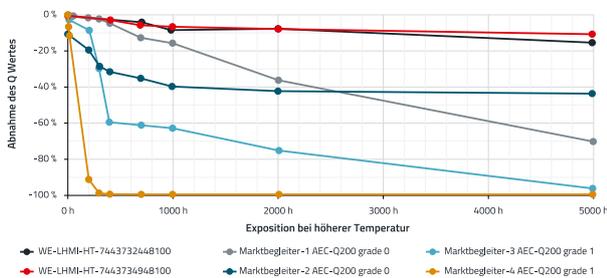


Abbildung 6: Verringerung des Q-Werts bei 2 MHz nach 5.000 Stunden bei 200 °C.

Die Messergebnisse zeigen, dass selbst das Produkt des besten Marktbegleiters einen Rückgang des Q-Wertes von mehr als 40 % aufweist, während die Hochtemperaturversion unserer neuen Produktfamilie WE-LHMI [7443732448100](#)

und WE-LHMI [7443734948100](#) nur einen minimalen Leistungsabfall verzeichnet.

An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass die in Abbildung 5 dargestellten Kurven nach dem Test nicht der abschließenden leitfähigen Phase entsprechen. Wenn eine verpresste Induktivität an ihre Grenzen stößt, wie im Fall der Marktbegleiter in Abbildung 6, kann das Bauteil selbst dann, wenn es einige Risse aufweist, immer noch als Speicherdrossel fungieren, allerdings mit deutlich veränderten elektrischen Eigenschaften im Vergleich zur ursprünglichen Spezifikation. Dies wiederum hat Auswirkungen auf die Anwendung, in der die Drossel eingesetzt wird.

Um das Perkulationsniveau in der Kurve darzustellen, die den Qualitätsfaktor bezogen auf die Frequenz zeigt, werden die Messergebnisse für die gleiche 4,7-µH-Drossel in Abbildung 7 unter langzeitiger Belastung dargestellt:

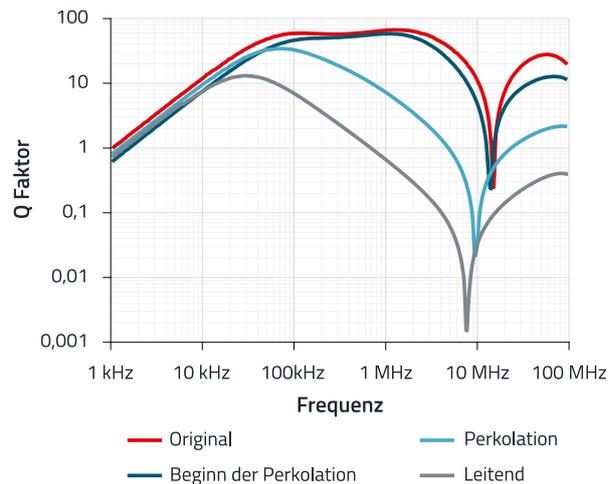


Abbildung 7: Verringerung des Q-Werts infolge des Perkulationsphänomens.

Zusammenfassend lässt sich die Perkolation in verpressten Induktivitäten als Abnahme des Q-Faktors und der Induktivität bei hohen Frequenzen sowie als Abnahme der Resonanzfrequenz in Abhängigkeit des Fortschritts des Phänomens an sich identifizieren.

Als Entwickler:in und/oder Endnutzer:in fragen Sie sich jetzt vielleicht, wie lange eine verpresste Induktivität mit Perkulationsproblemen bei hohen Temperaturen oder hohen Betriebsspannungen ohne Ausfall funktionieren kann?

Zur Klärung dieser Frage wurde ein Arrheniusgraph erstellt (Abbildung 8), der den Empfehlungen in IEC 60216-1 („Elektroisoliertstoffe – Eigenschaften hinsichtlich des thermischen Langzeitverhaltens. Teil 1: Warmlagerungsverfahren und Auswertung von

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

Prüfergebnissen“) in Kombination mit dem gleichwertigen Standard ASTM D2307 entspricht. Als Endpunktkriterium wurde eine Verringerung des gemessenen Q-Werts bei 5 MHz um 40 % ermittelt, was einer kritischen Zunahme der Wechselstromverluste um 100 % für eine 5,6- μ H verpresste Induktivität eines Marktbegleiter entspricht.

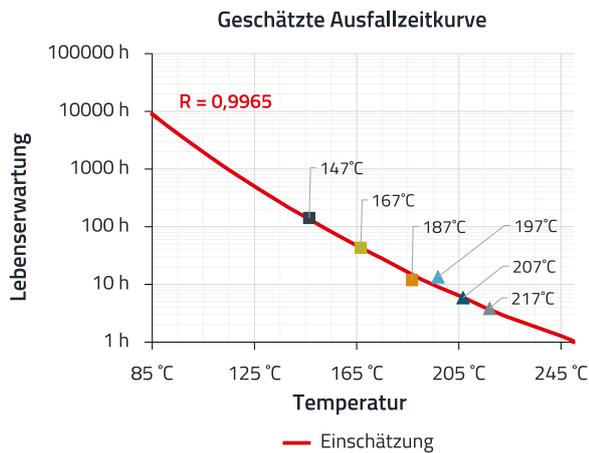


Abbildung 8: Arrheniusgraph zur Abschätzung der Perkolationsanforderungen an der getesteten verpressten Induktivität im zeitlichen Verlauf und bei verschiedenen Temperaturen.

Die Kurve in Abbildung 8 zeigt, dass das Bauteil des Marktbegleiters nach den ersten 100 Stunden Dauereinwirkung einer hohen Temperatur von 147 °C ausfällt. Man könnte nun annehmen, dass die Drossel bei einer mäßig hohen Temperatur, die geringfügig über der angegebenen Maximaltemperatur von 125 °C liegt, nicht ausfallen würde.

Allerdings zeigt die Schätzung im Arrheniusgraphen, dass die Drossel mit einem robusten Vertrauensintervall in R selbst bei einer Betriebstemperatur von nur 85 °C nach 10.000 Stunden Dauerbetrieb versagen wird; dies entspricht etwas mehr als eineinhalb Jahren. Dagegen sind die meisten industriellen Anwendungen für eine Lebensdauer von mindestens 10 bis 20 Jahren ausgelegt. Die nächstliegende Frage lautet: Wie wirkt sich das Perkolationsphänomen auf eine reale Anwendung aus?

4. AUSWIRKUNGEN DER ALTERUNG EINER VERPRESSTEN INDUKTIVITÄT IN EINEM DC-DC-WANDLER.

Heutzutage stoßen Halbleiter wie GaN- und SiC-Schalttransistoren mit sehr kurzen Schaltzeiten und hohen maximalen Drain-Source-Spannungen bei Entwicklern auf verstärktes Interesse^[12].

DC-DC-Anwendungen mit Schaltfrequenzen von über 1 MHz sind weit verbreitet, beispielsweise in „Power Supply on Chip“ (PwrSoC). Sie zielen mit kompakten „Embedded Designs“ auf eine höhere Effizienz z.B. für Anwendungen zur Stromversorgung von CPUs für Künstliche Intelligenz ab^{[13][14]}. Sie alle belegen einen Trend im Hinblick auf maximalen Leistungsbedarf, hochfrequente Spannungsbelastung und Drosselenergie. Viele verpresste Induktivitäten namhafter Hersteller würden unter diesen neuartigen Betriebsbedingungen jedoch aufgrund des Perkolationsphänomens vorzeitig ausfallen. Um die möglichen Auswirkungen der Perkolations zu demonstrieren, wurde der in der folgenden Abbildung gezeigte Abwärtswandler (Buck-Converter) mit $V_{in} = 14 \text{ V}$, $V_{out} = 5 \text{ V}$ bei 1,3 A, der bei 1.020 kHz betrieben wird, ausgewählt:

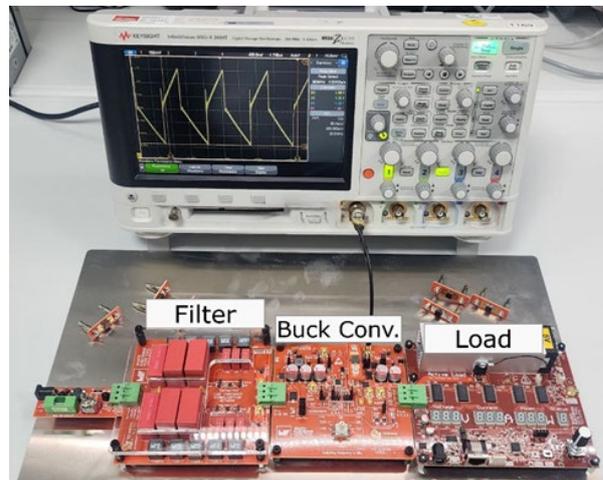


Abbildung 9: DC-DC-Abwärtswandler zum Testen der Auswirkungen der Perkolations.

Bei den Schaltnetzteilen ist der Buck-Wandler sicherlich die am weitesten verbreitete Topologie^[15]. Hierfür wurde eine typische 10- μ H-verpresste Induktivität ausgewählt. Wie die folgende Abbildung zeigt, bietet das Demoboard die Möglichkeit, die Drossel auszutauschen, ohne den Aufbau durch Löten und Entlöten der Drosseln zu beeinträchtigen.

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

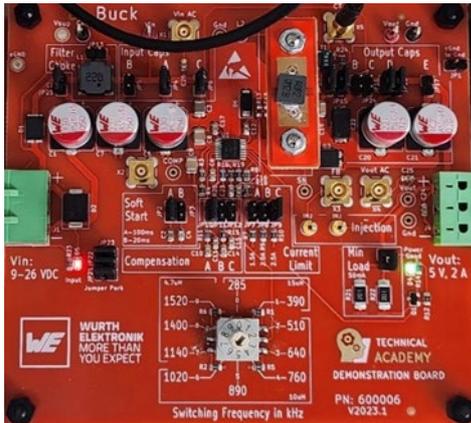


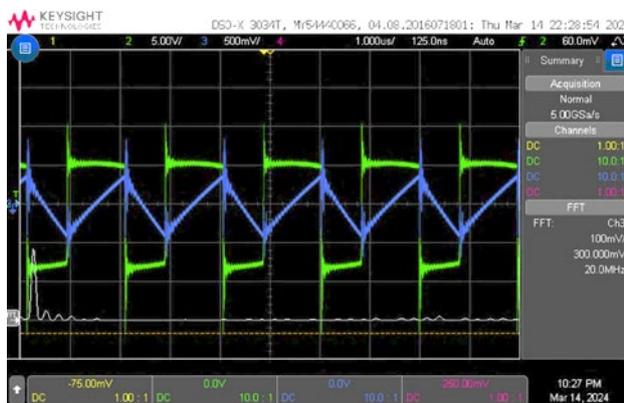
Abbildung 10: Für den Test verwendeter Buck-Wandler.

Dies ermöglichte es uns, schnell verschiedene Exemplare zu testen, die vom Perkulationsphänomen betroffen waren. Der Grad der Perkulation der Proben reicht von den frühen Stadien bis hin zur Perkulationsschwelle, bei der die Leistung der Prüflinge näher an der leitfähigen Zone liegt. Zusätzlich wurde ein Demoboard mit einer Netznachbildung eingesetzt, um Einflüsse von elektromagnetischen Störungen durch die externe Stromversorgung zu reduzieren, auch wenn dies nicht unbedingt notwendig gewesen wäre.

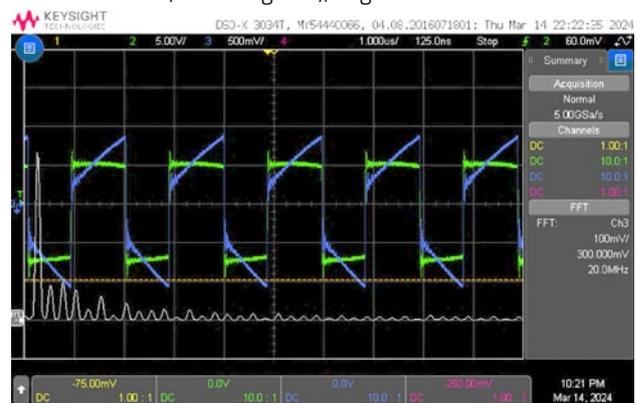
4.1 Messungen verschiedener Perkulationsgrade in der Beispielanwendung

In diesem Unterabschnitt untersuchen wir die Auswirkungen unterschiedlicher Perkulationsgrade bei verpressten Induktivitäten derselben Chargennummer. Die Proben stammen von Marktbegleiter 1 und wurden bereits im Test in Abbildung 6 verwendet.

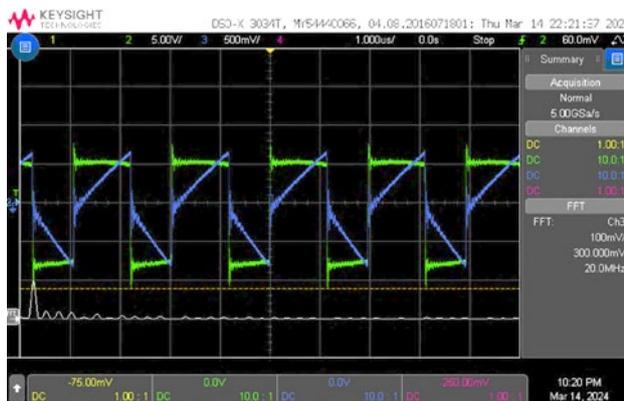
Die Oszilloskop-Screenshots des Rippelstroms für die verschiedenen verpressten Induktivitäten sind in Abbildung 11 dargestellt. Dabei ist die Spannung an der Drossel in Blau, der Rippelstrom in Grün und die FFT der Wellenform durch die Drossel in Grau dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Form des Ripplestroms im Vergleich zum guten Bauteil verändert hat. Die Entwicklung der Veränderung liefert sehr interessante Ergebnisse. Erstens kommt es zu einer Zunahme der Kernmaterialverluste, die durch das Perkulationsphänomen verursacht werden. Dies entspricht einem Widerstand parallel zur Drossel für die ersten Schritte der Perkulation, wie bereits in unserer ANP126 erläutert und in Abbildung 12 dargestellt. Wenn jedoch die Perkulationsschwelle erreicht ist und der Eintritt der leitenden Zone bevorsteht (Abbildung 11d), beginnt auch der



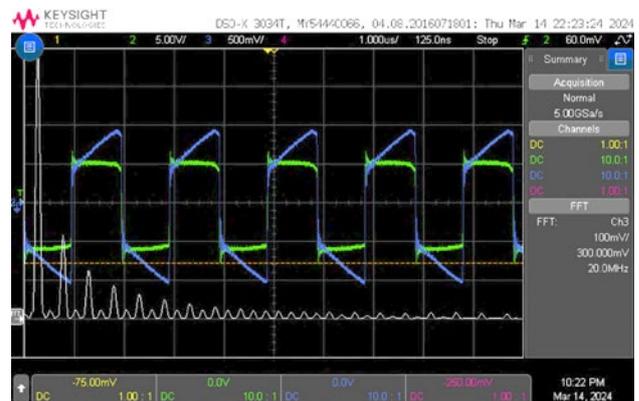
a. Strom-/Spannungswellenformen für die Drossel ohne Perkulation.



c. Hochpegel des Perkulationsphänomens.



b. Einsetzen des Perkulationsphänomens.



d. Wellenformen für die Drossel kurz vor der leitenden Zone.

Abbildung 11: Nachweise über Auswirkungen auf den Ripplestrom aufgrund von Perkulation.

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

Welligkeitsgradient abzunehmen, und das Modell des Parallelwiderstands ist nicht mehr zutreffend.

Die zweite Beobachtung betrifft die Zunahme der Harmonischen. Die Harmonischen können nicht auf externe Störquellen zurückgeführt werden aufgrund des Filters zwischen Stromquelle und Buck-Wandler.

Auch die typischen Schaltüberschwinger, die in Abbildung 11a zu sehen sind, scheiden als Ursache aus. Tatsächlich nehmen diese Effekte ab, wenn das Perkulationsphänomen sich verstärkt. Die hier festzustellende Zunahme der Harmonischen geht mit einem erheblichen Anstieg des DC-Offsets einher. Bezogen auf die Fourier-Reihe entspricht dies einer Stufenfunktion, die durch eine unendliche Anzahl von Harmonischen dargestellt wird. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, auf die Gesamtverzerrung der Dreieckschwingung der Drossel hinzuweisen. Diese Verzerrung beeinflusst das Verhältnis zwischen dem Spitzenstrom und dem Ausgangsstrom des Wandlers. Folglich wird die Cycle-by-Cycle-Strombegrenzung des Steuer-IC bei einem niedrigeren Ausgangsstrom ausgelöst als vom Entwickler ursprünglich beabsichtigt. Unter bestimmten Bedingungen kann dies mit dem von der Anwendung benötigten Nennstrom zusammenfallen.

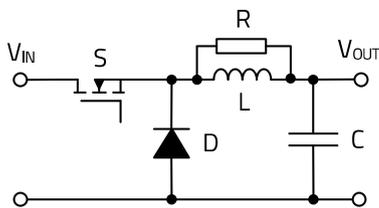


Abbildung 12: Schematische Darstellung des Widerstands parallel zur Drossel^[1].

Diese Situation hat dann einen Abfall der Ausgangsspannung zur Folge. Im Idealfall erkennt der Power-IC dieses Problem und schaltet sich ab. Im ungünstigsten Fall hingegen läuft die Anwendung jedoch mit unzureichender Spannung weiter, was zu unerwünschten Bedingungen führen kann.

4.2 Perkulation als Wirkungsgradkiller in DC-DC-Wandlern

Die Ursache von Verlusten in einem Buck-Wandler sind gut dokumentiert und leicht nachvollziehbar. Daher können Buck-Wandler mit einem Wirkungsgrad von mehr als 95 % entwickelt werden. Die Verluste sind im Wesentlichen Schaltverluste, Leitungsverluste, Diodenverluste und – in geringerem Maße – Kernverluste^{[16][17]}.

Sobald ein Wandlerdesign definiert ist, konzentrieren sich die Entwickler auf die Alterung von Kondensatoren und Schaltreglern als Hauptausfallursache in einer realen Anwendung.^{[18][19]}

Dank unserer engen Beziehungen zu unseren Kunden konnten wir jedoch das Entstehen von Problemen im Zusammenhang mit Drosseln erkennen, bei denen bei Verwendung bestimmter Bauteile von Marktbegleitern im Verlauf der Nutzungsdauer ihrer Anwendungen ein abnehmender Wirkungsgrad festgestellt wurde.

Um den Einfluss in der Beispielanwendung zu validieren, wurde der erhöhte Eingangsleistungsbedarf gemessen und in Bezug auf den Wirkungsgrad relativ zum Perkulationsgrad verglichen. Die Ergebnisse sind in der nachstehenden Abbildung 13 zu sehen.

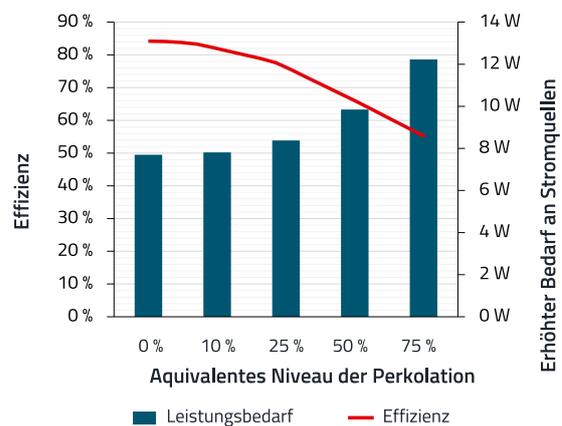


Abbildung 13: Abnahme des Wirkungsgrads aufgrund der Perkulation der verpressten Induktivität.

Es ist festzustellen, wie der Wirkungsgrad des Buck-Wandlers auf ein niedriges Niveau abfällt, wenn die verpresste Induktivität nahe an der leitenden Zone betrieben werden. Eine Messung der Werte für eine höhere Perkulation war nicht möglich, da die Eigenerwärmung schneller ist und der Buck-Wandler innerhalb weniger Sekunden ausfällt.

In Abbildung 13 wird ein Wirkungsgrad von 85 % verzeichnet, wenn in der Drossel – bei einer Eingangsleistung von 7,6 W für eine feste Last von 6,5 W – keine Perkulation auftritt. Tritt die Perkulation ein, beträgt der Wirkungsgradabfall weniger als 10 %. Sobald die Perkulation jedoch etwa 40 % erreicht, steigt die benötigte Eingangsleistung auf 10 W. Im Laufe der Zeit nimmt die Eingangsleistung bei starker Perkulation von 75 % auf 12,5 W zu, was einem Wirkungsgradverlust von 60 % gegenüber der ursprünglichen Konfiguration entspricht.

Der anfängliche Rückgang der Effizienz ist hauptsächlich auf Kernverluste zurückzuführen. Über diese Kernverluste

APPLICATION NOTE

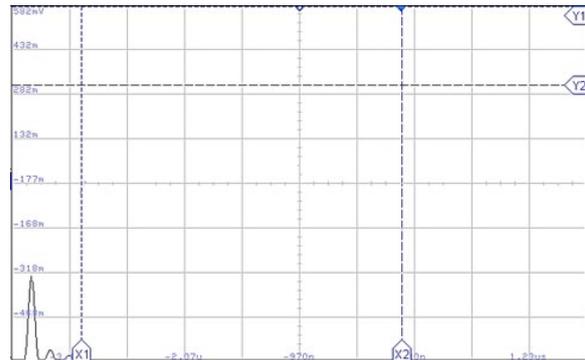
ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

hinausgehend tragen jedoch die unterschiedlichen Stromwellenformen und die erhöhte Wechselstromwelligkeit zu weiteren Verlusten in der Wicklung und den Halbleitern bei.

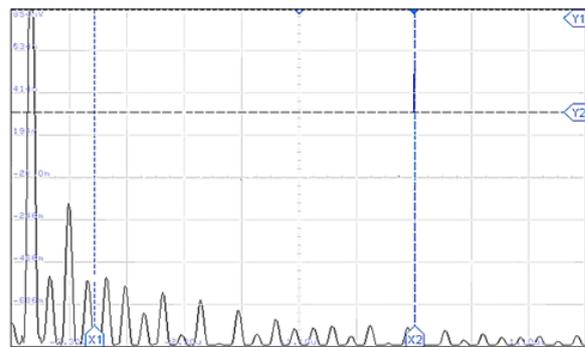
Außerdem kann bei einem hohen Perkulationsniveau auch die korrekte Funktion des Regelkreises in Stromregelsystemen beeinträchtigt werden. Der DC-DC-Wandler kann instabil werden, was zu Schwankungen oder sprunghaftem Verhalten bei Ausgangsspannung oder -strom führt. Durch die Einwirkung der höheren Belastung und dem erhöhten Anteil an Harmonischen kann sich die Lebensdauer von Bauelementen wie Kondensatoren und Halbleitern verringern.

4.3 Das Perkulationsphänomen aus der EMV-Perspektive

Der Wirkungsgradverlust in der Beispielanwendung hängt eindeutig mit der Eigenerwärmung der perkolierten verpressten Induktivität zusammen, die auf den erhöhten Kernverlust zurückzuführen ist. Es ist wichtig, dass ein DC-DC-Wandler so energieeffizient wie möglich betrieben wird. Allerdings verdient auch das EMV-Verhalten gesonderte Beachtung, da ein DC-DC-Wandler andere Schaltkreise in der Umgebung „EMV-technisch“ nicht beeinflussen sollte^[15]. EMV-Messempfänger werden häufig zur Messung elektromagnetischer Störungen (EMI) in leistungselektronischen Systemen eingesetzt. Je nach Anwendung kann die EMV-Messung äußerst zeitaufwendig sein^[20]. Die Pre-Compliance kann durch Einsatz eines Oszilloskops mit FFT-Funktion festgestellt werden. Wesentlich ist vor allem, die Bedeutung der in den Ergebnissen beobachteten Harmonischen zu betonen, da sie verschiedene Probleme im Bereich der leitungsgebundenen wie auch der abgestrahlten EMV verursachen können. Die Zunahme der Kernverluste kann im Frequenzbereich analysiert werden, wo sie zu einem Spektrum aus Harmonischen beiträgt^[22], was in unseren Ergebnissen deutlich wird. Die für eine verpresste Induktivität ohne Perkulation sowie eine betroffene Drossel ermittelten FFT-Wellenformen sind in Abbildung 14 dargestellt.



a. Aufgezeichnete FFT-Wellenform für den anfänglichen Aufbau ohne Perkulation.



b. Aufgezeichnete FFT-Wellenform für eine verpresste Induktivität mit Perkulation.

Abbildung 14: Zunahme der Harmonischen bezogen auf das Perkulationsphänomen an der verpressten Induktivität (Skala: 100 mV/div bis 30 MHz)

Die Diagramme zeigen deutlich, dass die durch eine verpresste Induktivität mit Perkulation induzierten Harmonischen deutlich zunehmen. Diese Harmonischen können zu einem etwas größeren Effektivstrom durch die Drossel und damit zu höheren Verlusten beim RDC führen.

Es gibt jedoch hinsichtlich der Leistung der Gesamtkonstruktion zwei zentrale Bedenken: Werden diese Harmonischen in Bezug auf die Energie in Wärme umgewandelt und abgeführt, wodurch die Effizienz des Wandlers noch weiter sinkt? Oder werden diese Harmonischen zu einer Ursache elektromagnetischer Störungen (EMI) und werden diese unerwünschten Störstromanteile auf die Last übertragen, oder können sie zusätzliche leitungsgebundene und/oder abgestrahlte Emissionen erzeugen, die andere Bereiche des Geräts oder sogar externe Geräte stören und Fehlfunktionen verursachen können?

Es gibt keine allgemeingültige Antwort auf diese Fragen, da dies von der Gestaltung der Anwendung selbst und den darin umgesetzten EMV-Maßnahmen abhängt.

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

Nichtsdestoweniger können Sie sich gerne an uns wenden, um Ihre aktuelle Konstruktion bewerten und jegliche sonstigen Fragen zu den Auswirkungen einer Schädigung von verpressten Induktivitäten durch hohe Spannungen oder Temperaturen in Ihrer Konstruktion beantworten zu lassen.

5. FAZIT

In dieser Application Note wurde das Perkulationsphänomen in einer verpressten Induktivität vorgestellt. Der Begriff bezeichnet die Schädigung des Isolationsmaterials beim Übergang von einem isolierenden in einen leitenden Zustand, wodurch die Kernverluste aufgrund erhöhter Wirbelströme zunehmen. Dieser Prozess beginnt nach der erstmaligen Einwirkung von hohen Temperaturen oder hoher Spannung. Er lässt sich eindeutig durch eine kritische Abnahme des Q-Werts bei hohen Frequenzen messen und zeigt sich in der Änderung des Rippelstroms der Drossel, einer Zunahme der Harmonischen und folglich in der Abnahme des Wirkungsgrads bei Verwendung in einem DC-Wandler im Laufe der Zeit.

Diese Abhandlung belegt eindeutig, dass die Perkulation den Wirkungsgrad des Bauteils beeinflusst und die Leistung erheblich verringert, und zeigt, dass dies bei der Auswahl einer Drossel ein relevanter Faktor sein sollte.

Darüber hinaus haben wir einen kleinen Einblick in die möglichen Auswirkungen der Perkulation in Bezug auf die EMV-Konformität und das Wärmemanagement gegeben. All dies wirkt sich direkt auf die Lebensdauer und Zuverlässigkeit des Geräts selbst aus.

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

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/apnotes



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



Toolbox
www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog
www.we-online.com/products

KONTAKT INFORMATION



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



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

APPLICATION NOTE

ANP142 | Auswirkungen der Degradierung einer verpressten Induktivität aufgrund höherer Spannung oder Temperatur in einem DC-DC-Wandler

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
ANP142a	2025/06/26	Ursprüngliche Version der Application Note

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