

Annika Frankemöller
Power Magnetics

AUSWIRKUNGEN ERHÖHTER SPANNUNG UND TEMPERATUR AUF VERPRESSTE INDUKTIVITÄTEN IN DC/DC-WANDLERN

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

AGENDA

- **Einleitung**
 - Markttrends
 - Auswirkungen Perkolation
 - Herstellungsprozess und Materialien von verpressten Induktivitäten
- **Perkolutionsphänomen**
 - Definition
 - Materialdegradierung in verpressten Induktivitäten
- **Frühere Erkenntnisse**
 - ANP126: Spannungsspezifikation
 - ANP128: Thermische Alterung
- **Auswirkungen der Perkolation**
- Q-Faktor
- Zuverlässigkeit
- **Auswirkungen der Perkolation auf DC/DC-Wandler**
 - Unterschiedliche Perkulationsstufen
 - Wirkungsgrad
 - EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)
- **Zusammenfassung der Erkenntnisse**



EINLEITUNG

Markttrends

Dynamiken und Treiber 2024



Die Größe des Marktes für verpresste Induktivitäten wurde 2022 auf 2.5 Milliarden USD geschätzt und soll bis **2030 4.0 Milliarden USD** erreichen, mit einer durchschnittlichen Wachstumsrate (CARG) von **6.5%** zwischen 2022 und 2030.

Übersicht des Marktes für verpresste Induktivitäten



Quelle: <https://www.cognitivemarketresearch.com/molded-inductors-market-report>

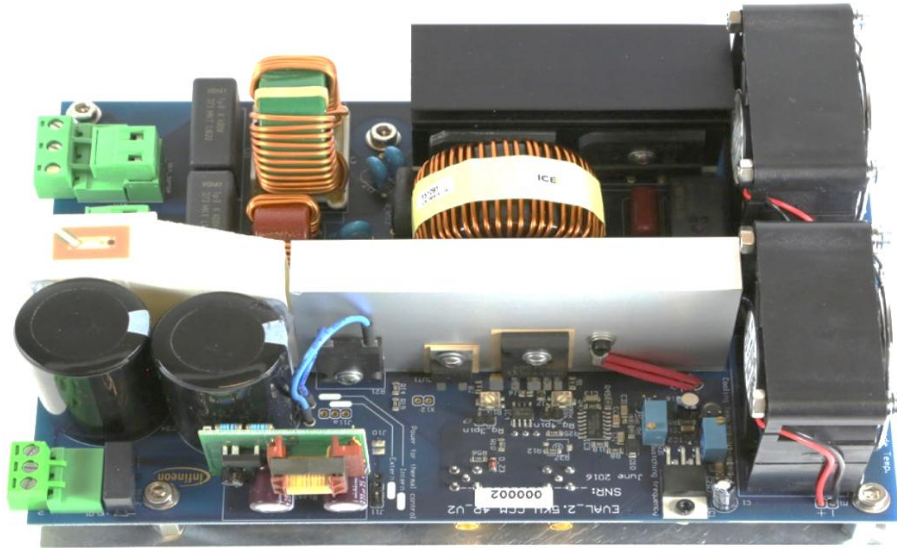
- Wachsende **Beliebtheit verpresster Induktivitäten** mit verteiltem Luftspalt
- Steigende **Effizienz und Leistungsfähigkeit** verpresster Induktivitäten
- Zunehmender Fokus auf **Energieeffizienz und nachhaltige Lösungen** treibt Nachfrage nach verpressten Induktivitäten an
- **Schlüsselfaktor:** Stark wachsender Markt für verpresste Induktivitäten, da sie zentrale Rolle bei der elektrischen Energieumwandlung spielen
- **Herausforderungen:** Gesteigerte Nachfrage nach zuverlässigen und hocheffizienten Induktivitäten

EINLEITUNG

Markttrends

Silicon PFC @ 2kW

Leistungsdichte: 37 W/in³



Quelle: www.TI.com/GaN



2.8-fache Leistungsdichte

GaN PFC @ 2kW

Leistungsdichte: 104 W/in³

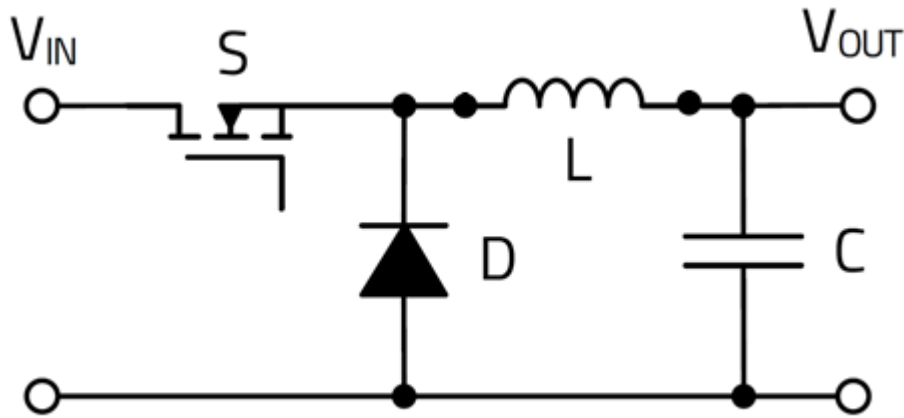


Abbildung 1: Beispiel für die Miniaturisierung eines DC/DC-Wandlers mit GaN-Technologie von Texas Instruments.

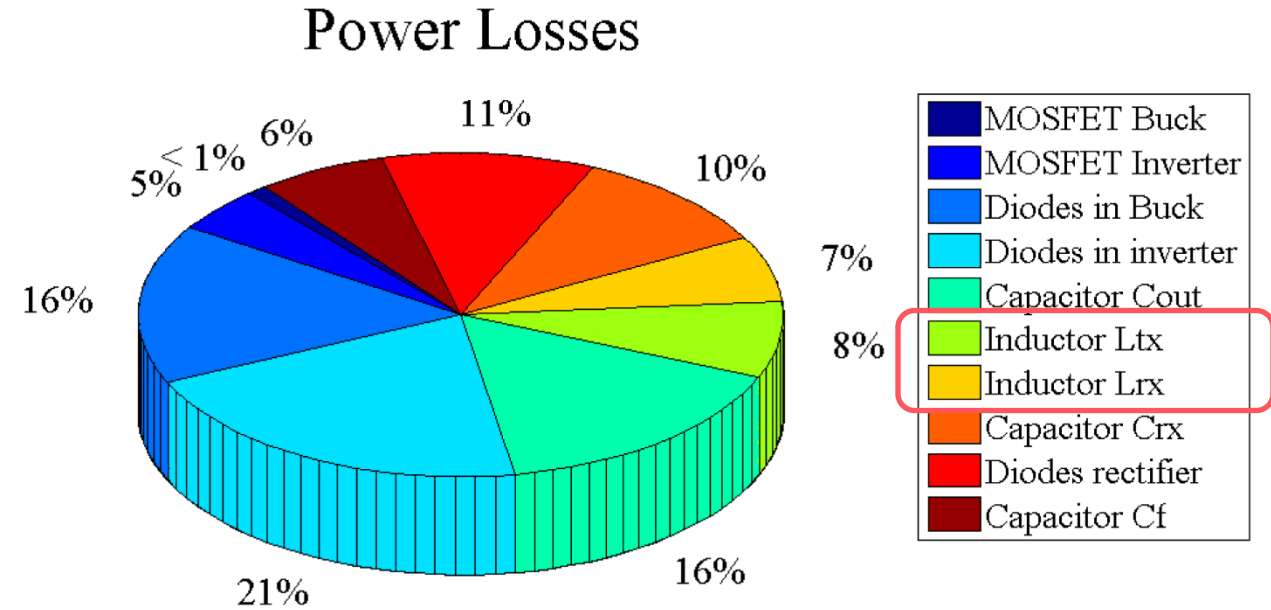
EINLEITUNG

Rolle der Induktivität in DC/DC-Wandlern

Das Design der Induktivität hat entscheidenden Einfluss auf die Effizienz durch Leistungsverluste sowie auf die allgemeine Zuverlässigkeit des Systems:



a. Referenzschaltbild eines Abwärtswandlers

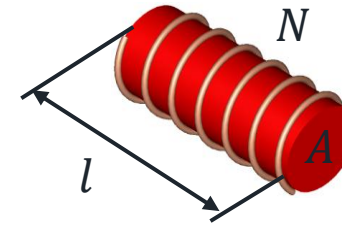


b. Leistungsverluste innerhalb eines Leistungswandlers

Abbildung 2: Topologie eines Abwärtswandlers und typische Leistungsverluste in den Schlüsselkomponenten.

EINLEITUNG

Rolle der Induktivität in DC/DC-Wandlern



$$L = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A \cdot N^2}{l}$$

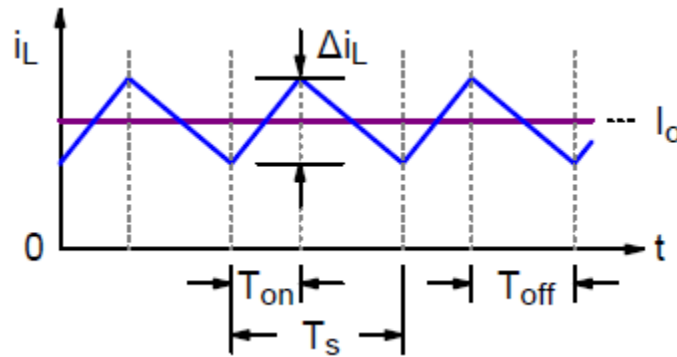
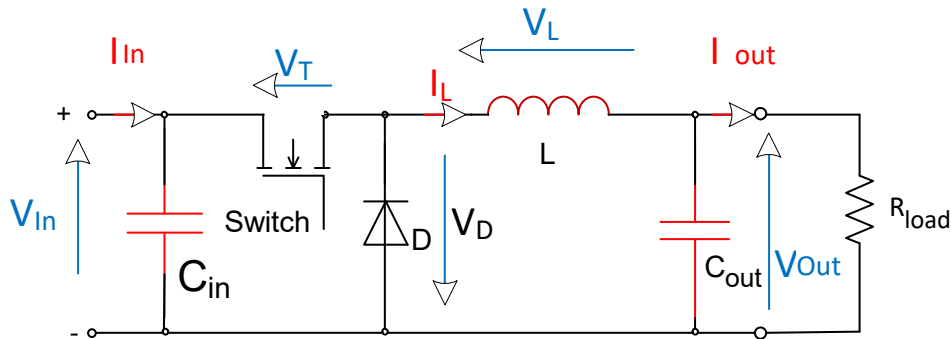


Abbildung 3: Funktionsprinzip eines Abwärtswandlers.

- **Induktivitätswert** wird durch die physikalischen Eigenschaften und die Geometrie des Bauelements bestimmt
- Induktivitätswert ist empfindlich gegenüber **Sättigungseffekten**, insbesondere durch Abnahme der relativen Permeabilität (μ_r) infolge der magnetischen Sättigung des Kernmaterials

$$L = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot T_{ON}}{\Delta_{IL}} \quad \Delta_{IL} = \frac{(V_{in} - V_{out}) \cdot V_{out}}{f_{switch} \cdot L \cdot V_{in}}$$

- **Rippelstrom** (Δ_{IL}) steht in direktem Zusammenhang mit Spannung, Schaltfrequenz und Induktivitätswert

EXKURS

Sättigungsverhalten

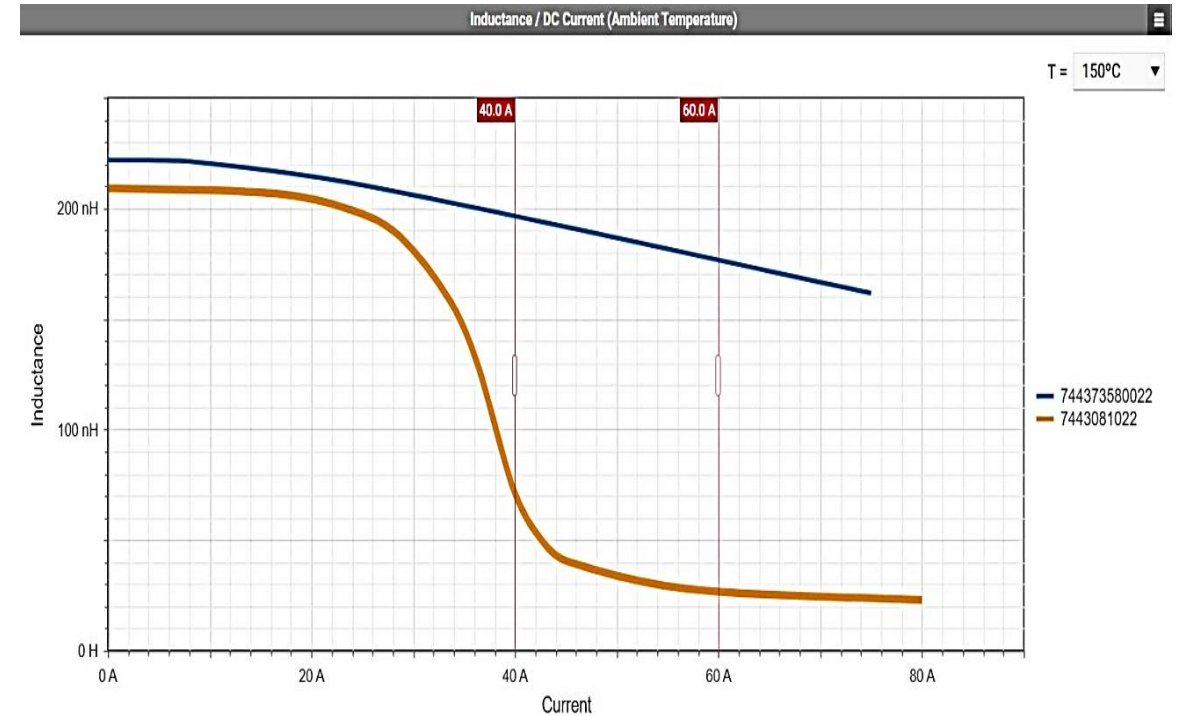
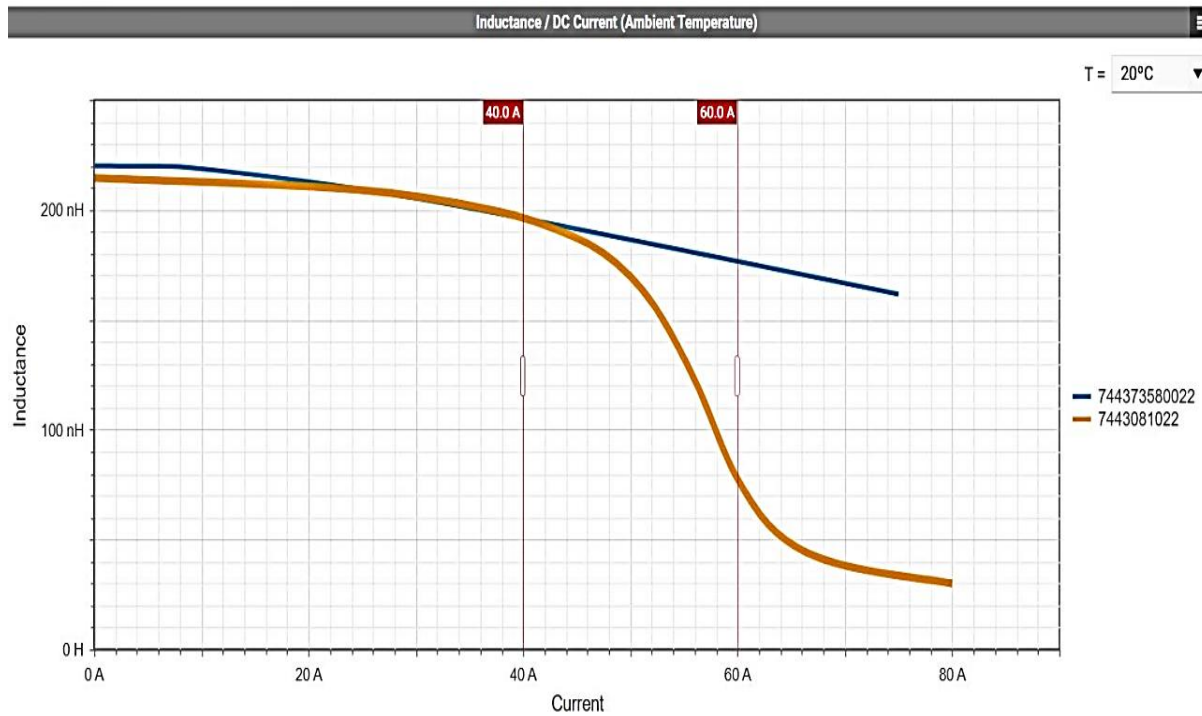
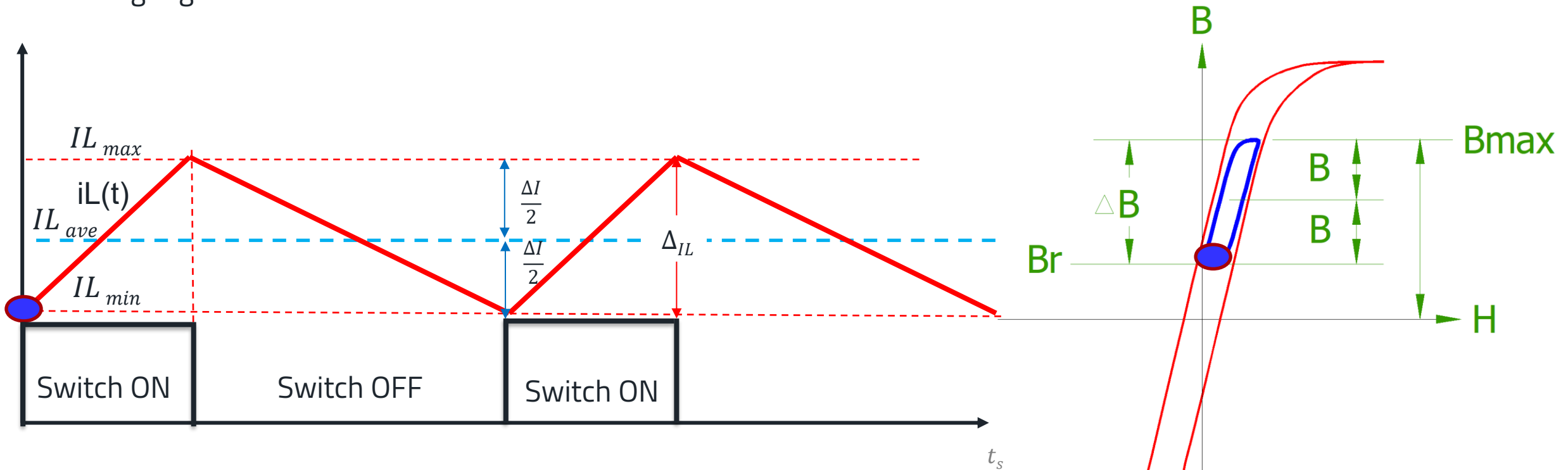


Abbildung 4: Vergleich des Sättigungsstroms (I_{sat}) von einer Speicherinduktivität mit harten Sättigungseigenschaften (*orange*) und weichen Sättigungseigenschaften (*blau*) bei unterschiedlichen Umgebungstemperaturen.

EXKURS

Sättigungsverhalten

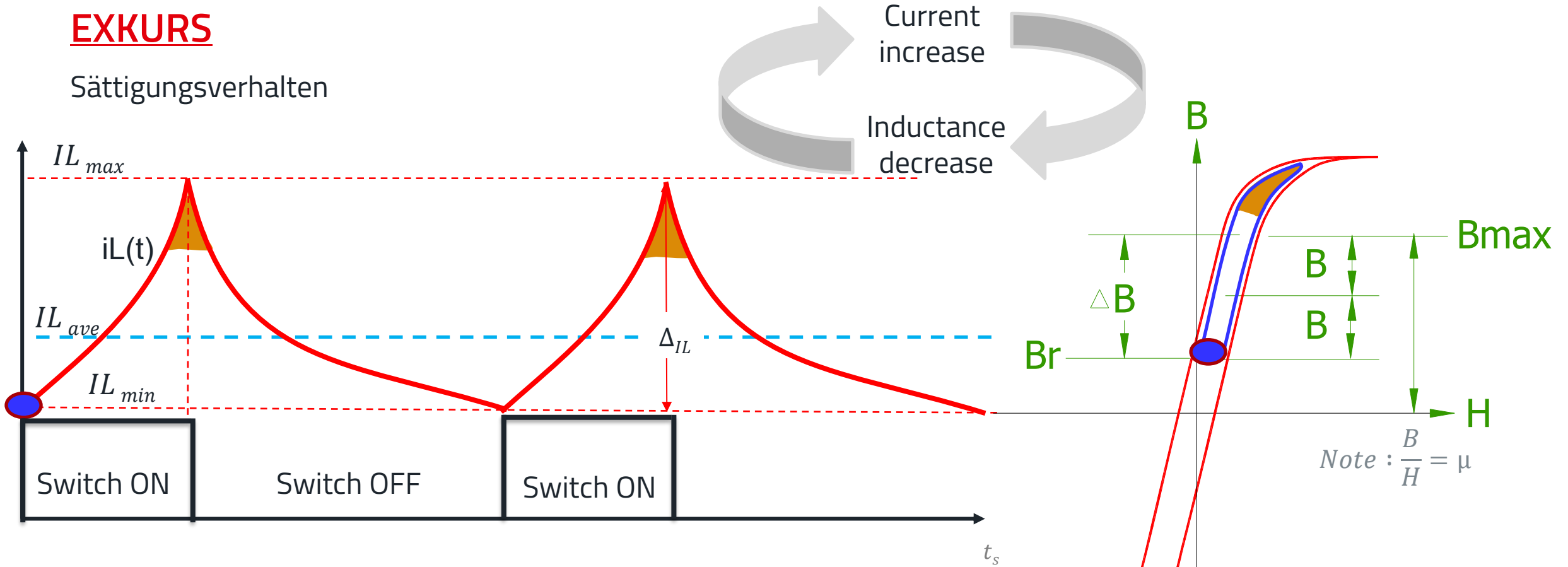


Zyklische Erklärung:

- Im eingeschwungenen Zustand arbeitet der Buck-Konverter im linearen Bereich der B-H-Kurve
- Keine Sättigung des Kernmaterials

EXKURS

Sättigungsverhalten



Zyklische Erklärung:

- Abrupter Abfall der Induktivität oberhalb der Sättigungsgrenze führt zu starkem Stromanstieg
- Harte Sättigung des Kernmaterials

EINLEITUNG

Würth Elektronik hat festgestellt, dass verpresste Induktivitäten unter hohen Temperaturen oder Spannungen ein **Perkulationsverhalten** aufweisen. Dies führt zu einer strukturellen Veränderung des Kernmaterials und **verschlechtert die Performance** des passiven Bauteils, was wiederum die **Langlebigkeit des DC/DC-Wandlers** beeinträchtigt.



a. Zunahme der Kernverluste und Harmonischen



b. Steigende Leistungsnachfrage

Abbildung 5: Perkulationseffekte in einer realen Anwendung.

EINLEITUNG

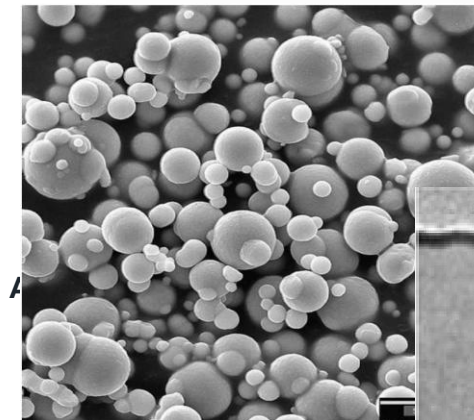
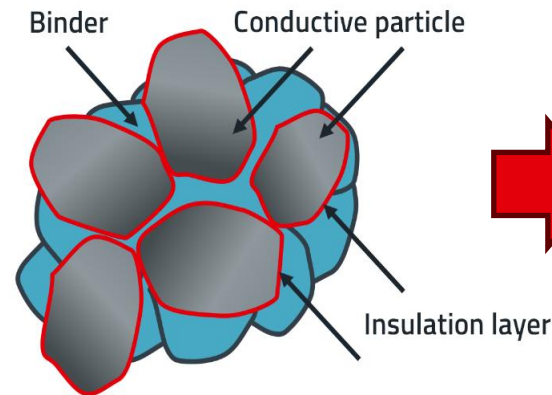
Herstellung und Materialien verpresster Induktivitäten

Produktionsprozess (vereinfacht)

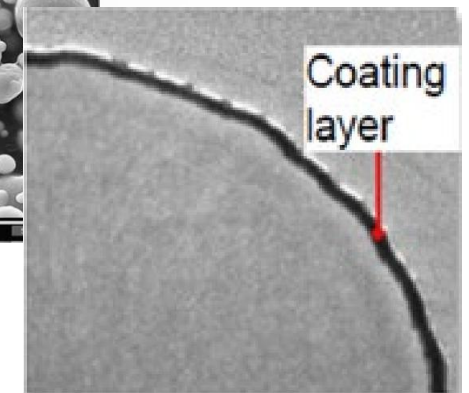
- Isolierter gewickelter Kupferdraht
- Materialmischung aus Eisenpartikeln und Bindemittel (Binder)
- Pressvorgang
- Aushärtung

Kernmaterial

- Feines Eisenpulver oder -legierungen
- Leitfähige Eisenpartikel
- Isolierende Beschichtung (Coating)
- Bindemittel



*Iron Powder Particles
- BASF Website*



*Iron Powder Particles Coating
- BASF Website*

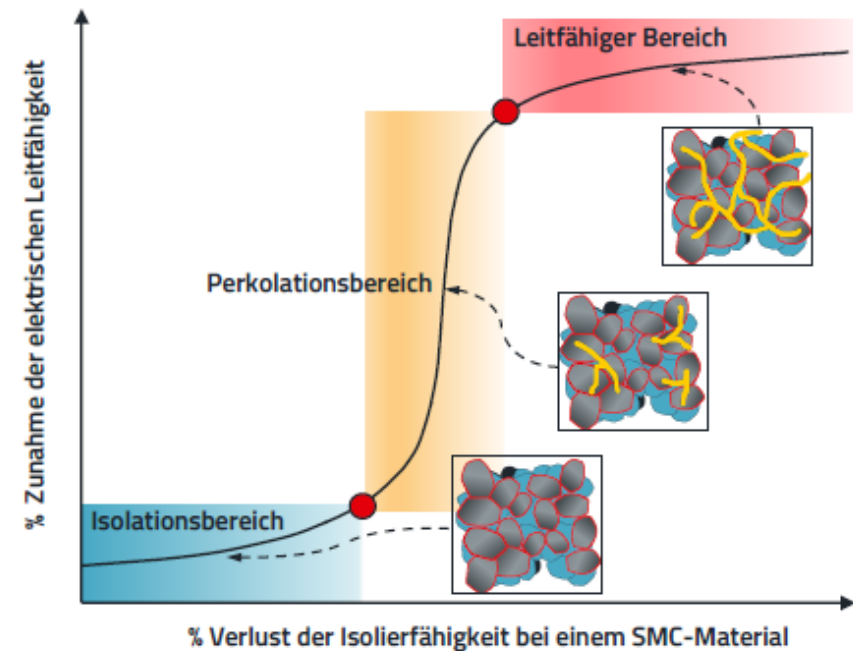
Abbildung 6: Aufbau einer verpressten Induktivität.

PERKOLATIONSPHÄNOMEN

Definition

"Das Perkulationsphänomen in einer verpressten Induktivität wird als materialbedingte Degradierung definiert, bei der es zu einem Übergang vom isolierenden zum leitenden Zustand kommt."

Die Perkulationsschwelle wird als der kritische Punkt eines Materials definiert, wenn es von einem isolierenden in einen leitenden Zustand übergeht:



b. Schwellenkurve

Abbildung 7: Perkulationsphänomen in Materialien.

PERKOLATIONSPHÄNOMEN

Materialdegradierung in verpressten Induktivitäten

- Hohe Spannung
- Hohe Temperatur

Elektrischer und thermischer Stress kann im Laufe der Zeit zu einer Erhöhung der Verluste im magnetischen Kern führen, hervorgerufen durch eine materialbedingte Degradierung, die mit dem Perkulationsphänomen zusammenhängt:

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

APPLICATION NOTE

ANP142 | Effects of molded power inductor degradation due to higher voltage or temperature in a DC/DC converter

Dr.-Ing. Efrain Bernal Alzate

1. INTRODUCTION

For DC-DC converter applications molded power inductors enable both smaller footprints and lower profile due to the properties of the magnetic material. The reduced dimensions of current designs demand the employment of smaller inductors capable of operating at elevated voltages and currents in more extreme thermal conditions. The higher electrical and thermal stresses can lead to an increase in magnetic core loss over time due to material degradation related to the percolation phenomenon. Würth Elektronik eiSos has pioneered the introduction of these phenomena as the common failure mechanism between the material degradation found under high voltage operations [ANP126 – Voltage specification for molded inductors](#)^[1] and the degradation obtained when a molded power inductor is exposed to high temperatures [ANP128 – Introduction to thermal aging in molded power inductors](#)^[2].

But what are these percolation phenomena? What are the repercussions of percolation in a molded power inductor? And more importantly, how does it affect the long-time performance of a DC-DC converter? Let us answer these questions in the following sections.

2. BACKGROUND

Historically thermal aging tests performed over extended periods of time at elevated temperatures have been used to

percolation threshold is the critical point where the material turns from insulating to conductive.

2.1 Percolation phenomenon on molded power inductors

Percolation has generated great interest in the scientific community for decades and has promoted the development of theoretical models and experimental research work in understanding connectivity phenomenon^[4]. It has been used from traffic analysis, artificial intelligence programming, to materials design. In the materials field, percolation theory is a type of analytical-mathematical model, commonly referenced in the literature for the development and modeling of electrical conductivity in different materials^[5].

In general, percolation theory refers to the slow movement of liquid through a material with tiny spaces or holes, as well as describes the behavior of a network when nodes or links are created.

For composite material, percolation phenomenon occurs when the increasing amount of added conductive metallic particles reaches a point where the electrical conductivity increases abruptly. This is called the percolation threshold^[6]. Particularly, many experiments have demonstrated that the conductivity of composites has a nonlinear relationship with the doping of conductive particles^[7]. Composites are materials made by combining two



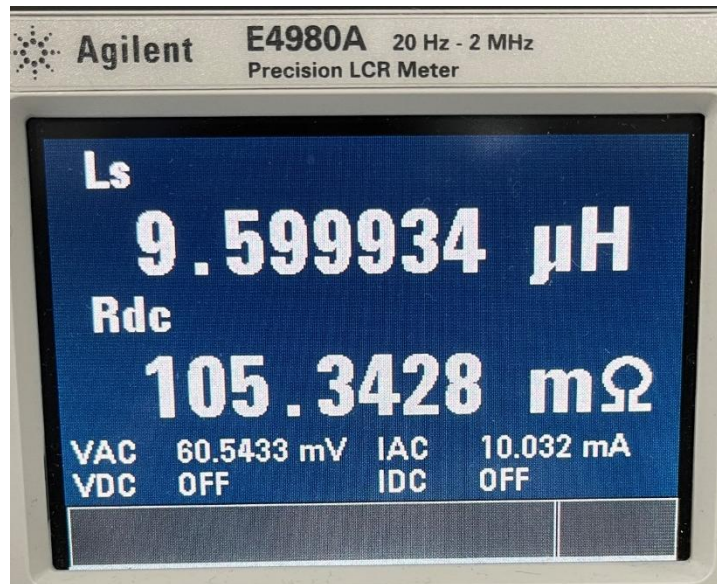
WE

Abbildung 8: Perkolation in verpressten Induktivitäten.

FRÜHERE ERKENNTNISSE

ANP126: Spannungsspezifikation

Die Materialdegradation ist durch standardmäßige Qualifikationstests der AEC-Q200 nicht nachweisbar:



a. Induktivität ohne Beschädigung

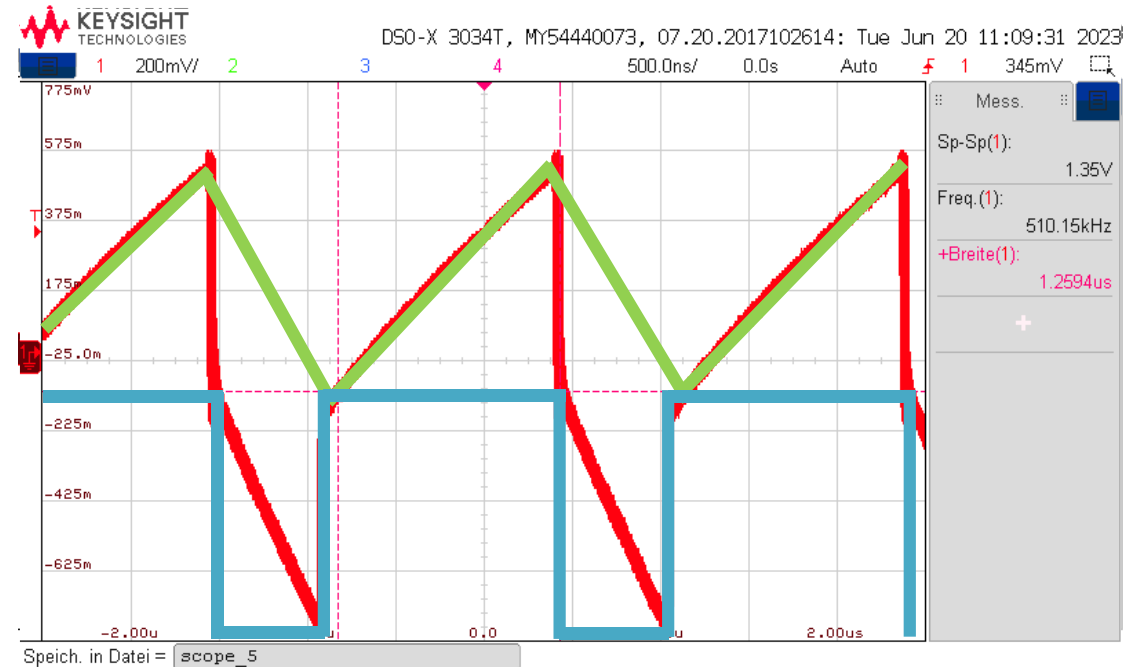
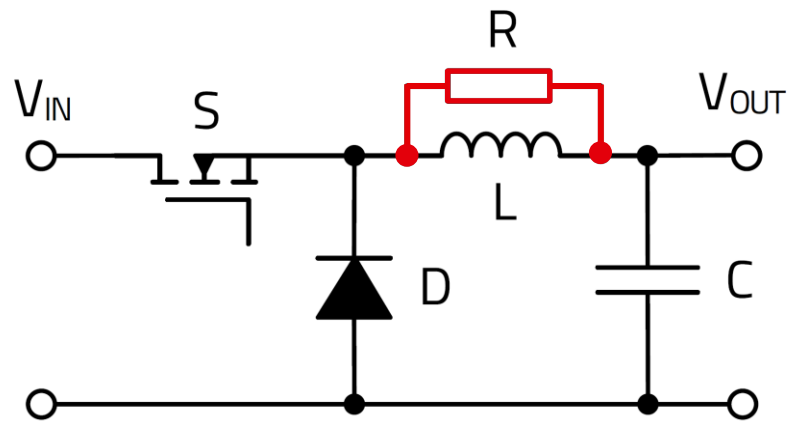


b. Induktivität mit Beschädigung

Abbildung 9: LCR Messungen bei 100 kHz 10 mA.

FRÜHERE ERKENNTNISSE

ANP126: Spannungsspezifikation



— Induktives Verhalten

— Resistives Verhalten

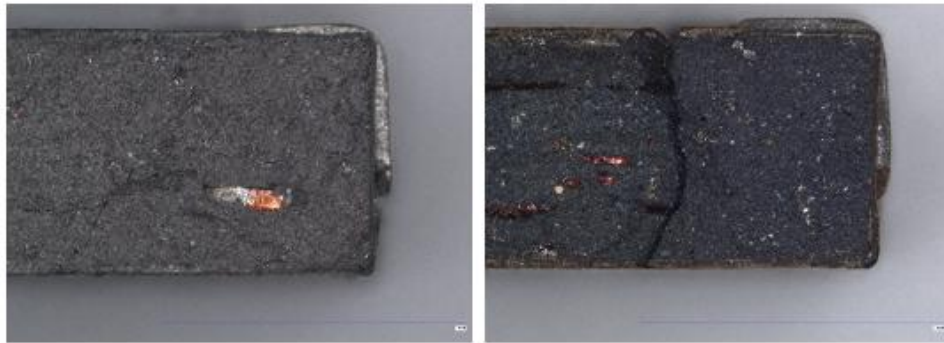
a. Vereinfachter Abwärtswandler mit einem Parallelwiderstand R

b. Ripplestrom des Abwärtswandlers mit einem Parallelwiderstand R

Abbildung 10: Interpretation der Verluste durch Perkolation.

FRÜHERE ERKENNTNISSE

ANP128: Thermische Alterung



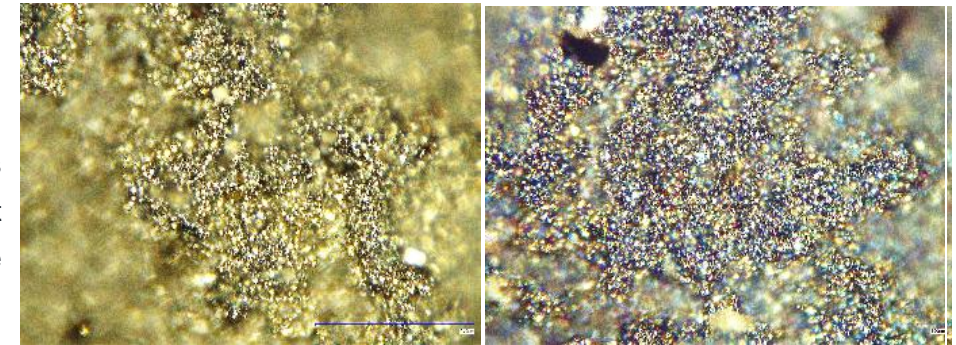
a) *Traditional metal/alloy soft magnetic material*



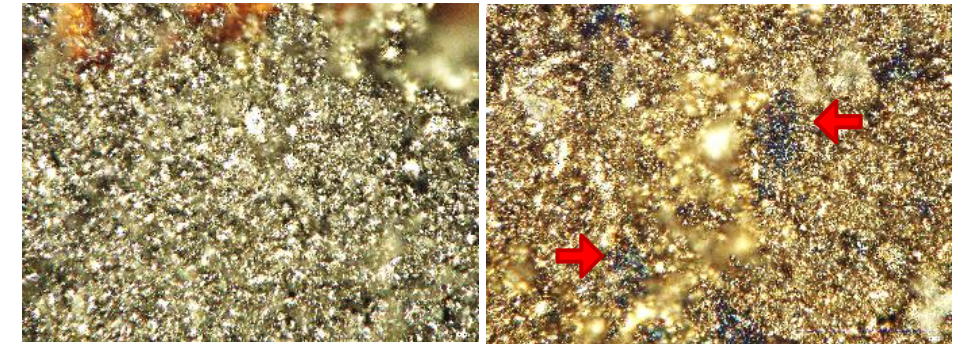
b) *SMCs*

Abbildung 11: Verpresste Induktivitäten vor dem Test (*links*) und nach dem Test (*rechts*) mit 10-facher Vergrößerung.

AEC-Q200 Grade 1
Competitor samples
with a 165 °C max part
temperature



AEC-Q200 Grade 0
Competitor samples
-55 °C bis +150 °C



AEC-Q200 Grade 0
WE-LHMI HT
-55 °C bis +150 °C

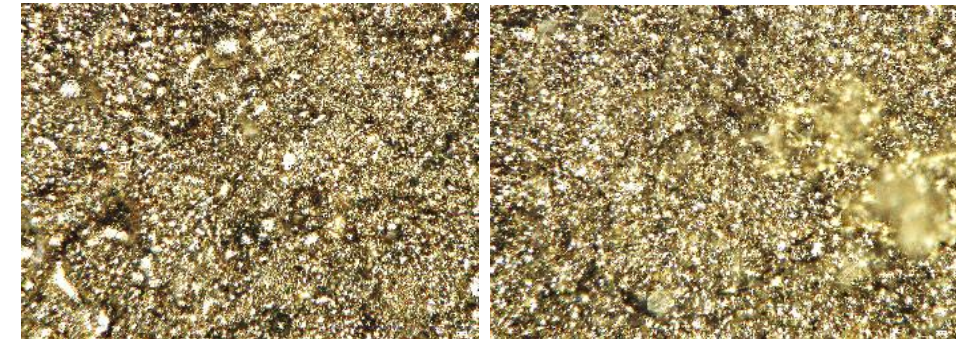


Abbildung 12: Verpresste Induktivitäten vor dem Test (*links*) und nach dem Test (*rechts*) mit 1000-facher Vergrößerung.

Testbedingung: 1000 h bei 200 °C

AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS

Einfluss auf den Q-Faktor

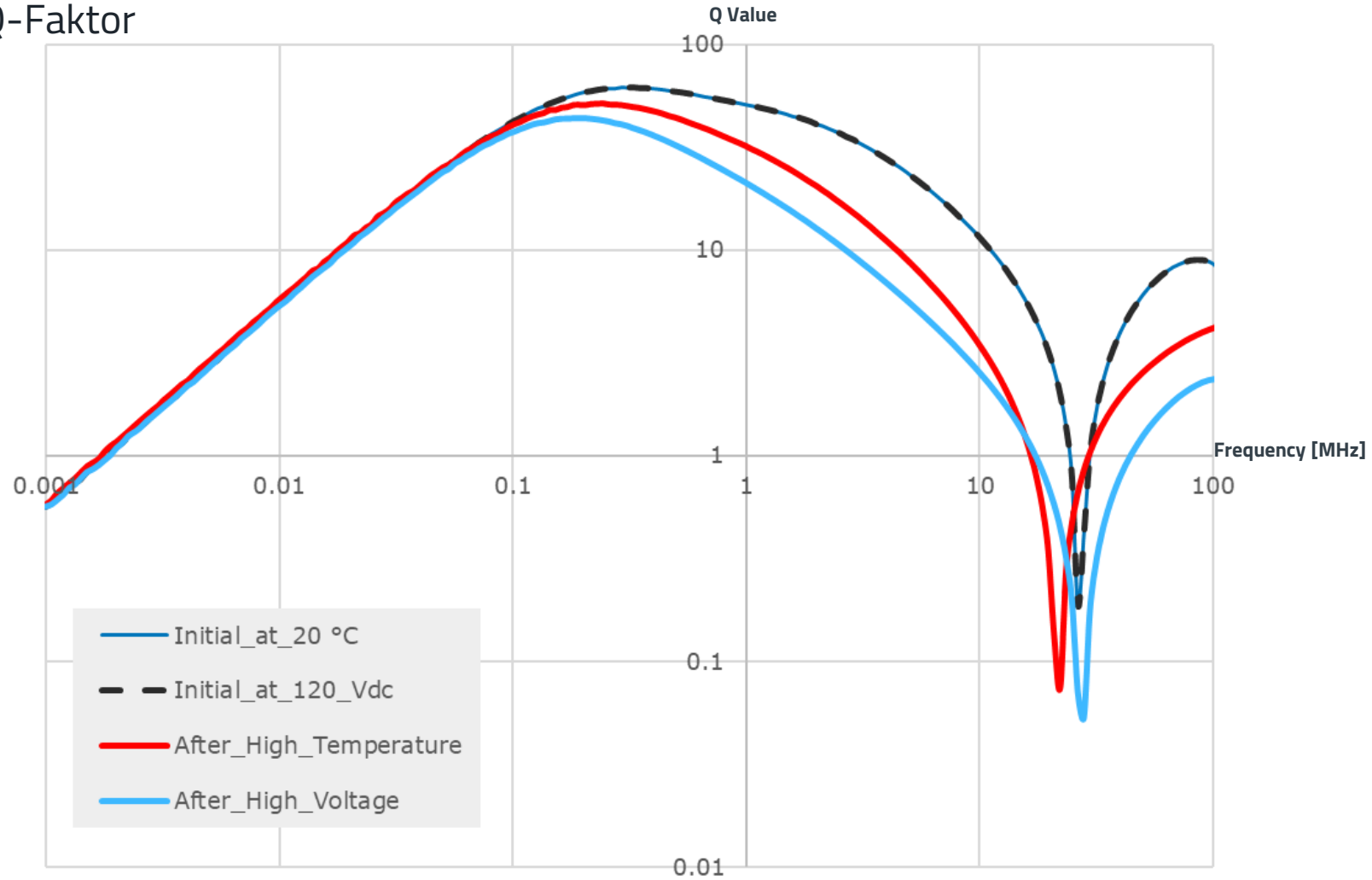


Abbildung 13: Änderung des Q-Faktors aufgrund von hohen Temperaturen oder hoher Spannung.

AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS

Einfluss auf die Zuverlässigkeit

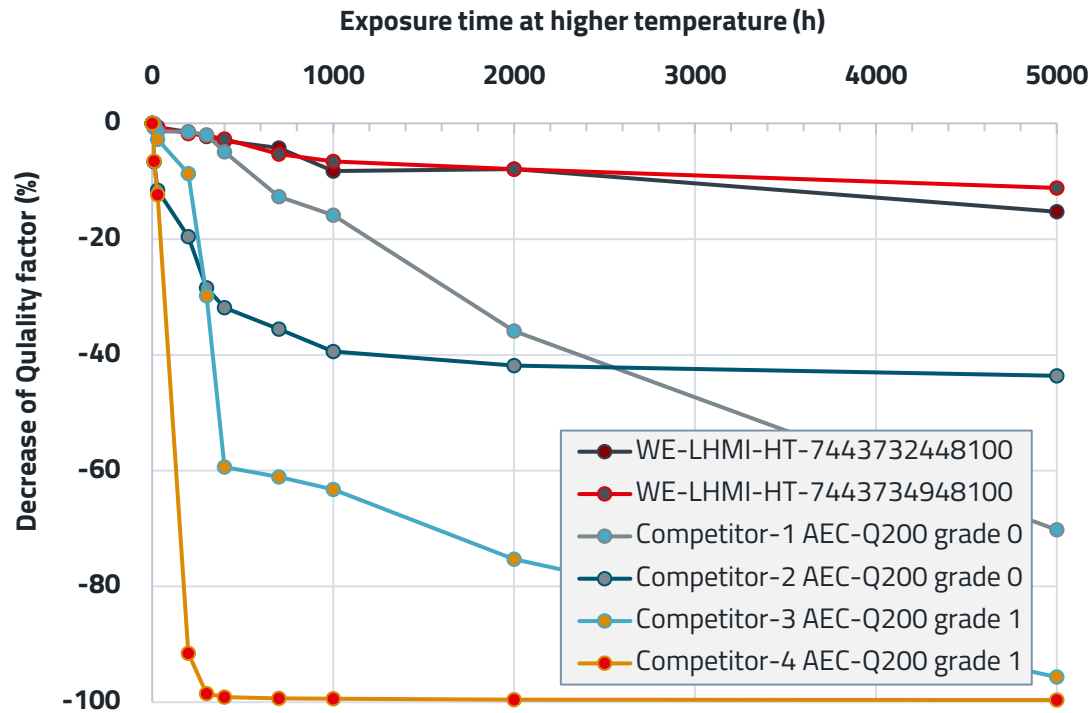


Abbildung 14: Verringerung des Q-Werts bei 2 MHz nach 5.000 Stunden bei 200 °C.

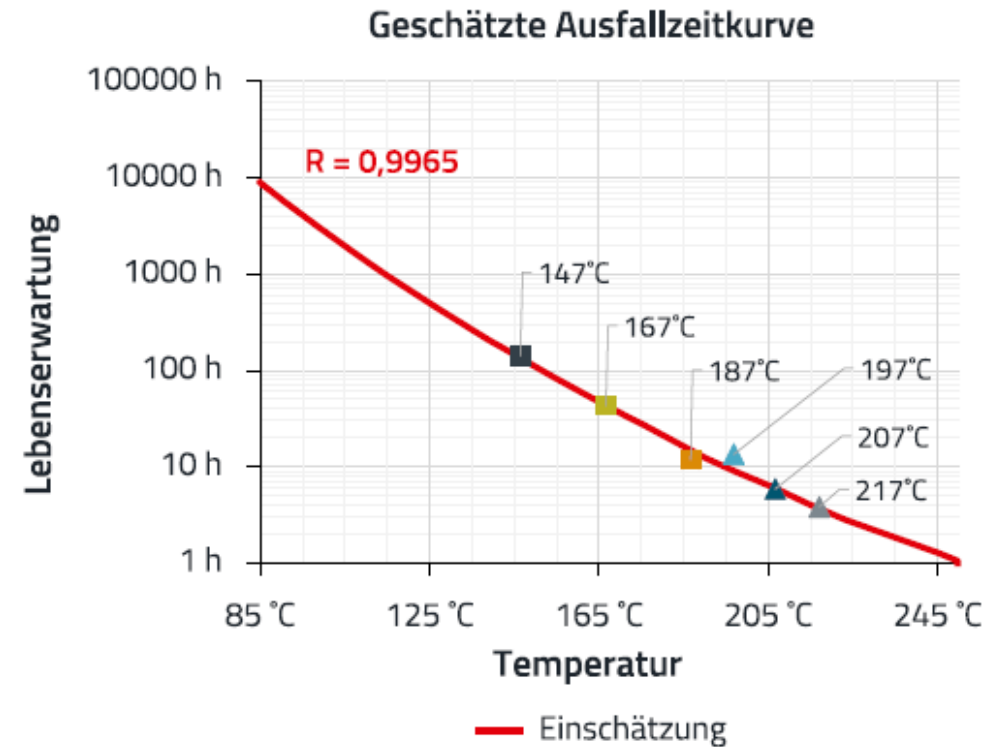


Abbildung 15: Arrheniusgraph zur Abschätzung der Perkolation an der getesteten verpressten Induktivität im zeitlichen Verlauf und bei verschiedenen Temperaturen.

AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS IN EINEM DC-DC-WANDLER

Demoboard

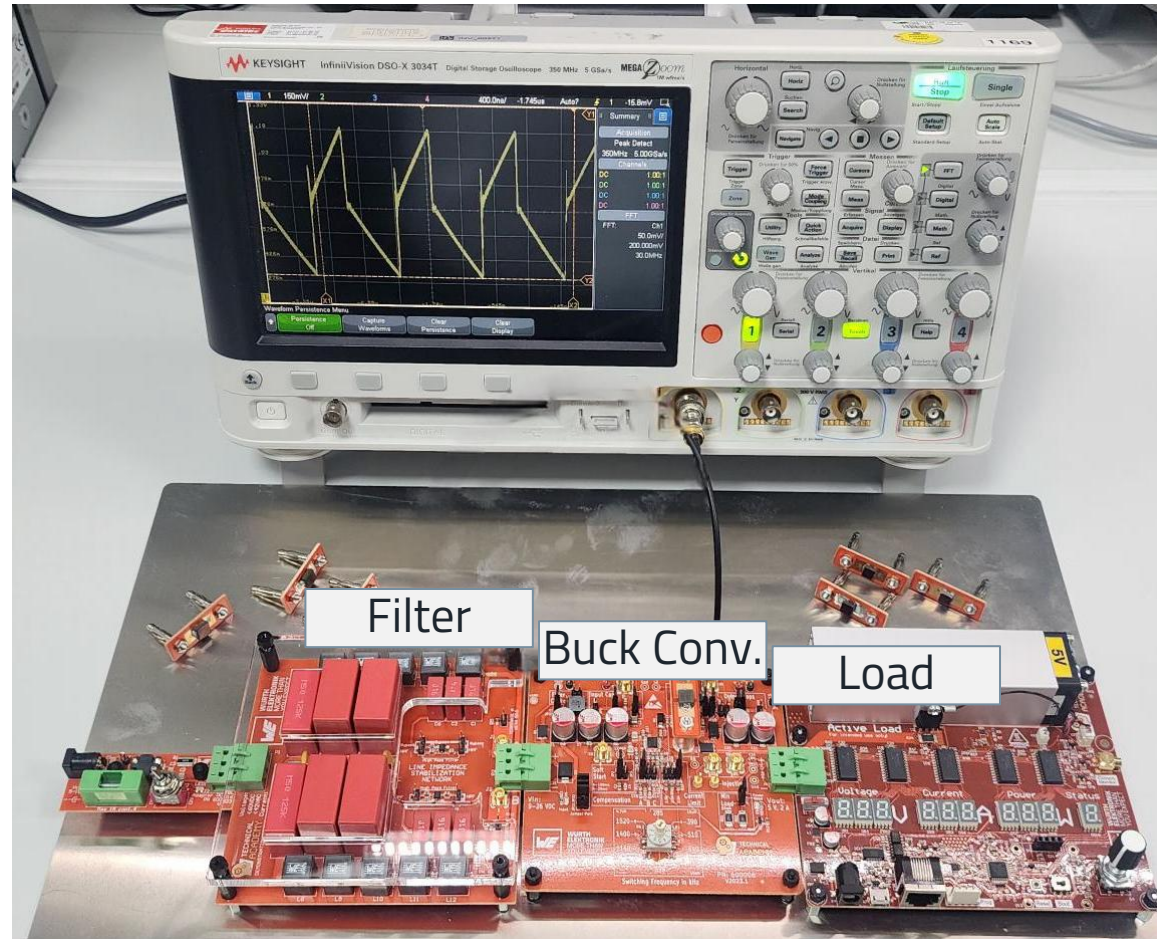


Abbildung 16: Abwärtswandler zum Testen der Auswirkungen der Perkolation.

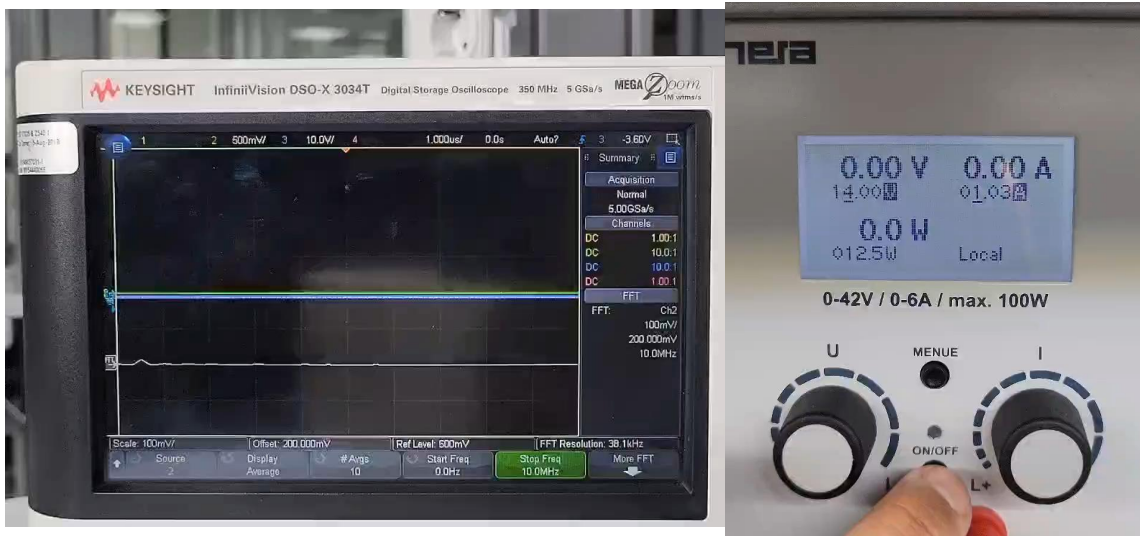
Konventioneller Abwärtswandler mit einer Eingangsspannung (V_{in}) von 9 V bis 26V, einer Ausgangsspannung (V_{out}) von 5 V und einem maximalen Ausgangsstrom von 2 A.

Testaufbau:

- Verpresste Induktivität 10 μH
- Eingangsspannung der externen Stromversorgung 14 V
- Schaltfrequenz 1020 kHz
- Programmierbare Last 6,5 W

AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS IN EINEM DC-DC-WANDLER

Demoboard



Unterschiedliche Perkulationsstufen:

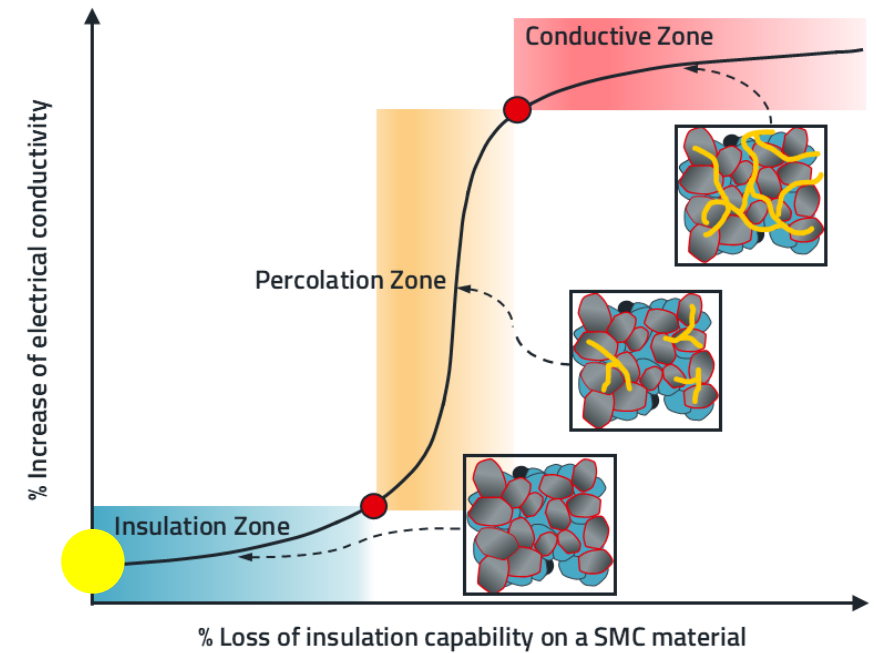
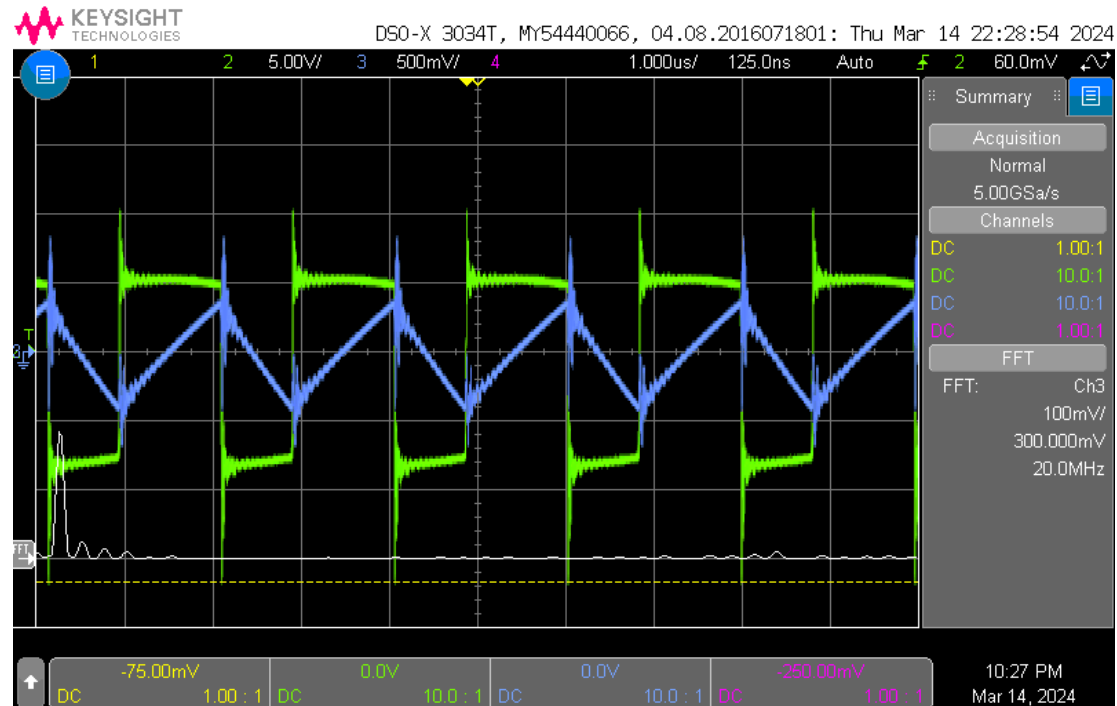


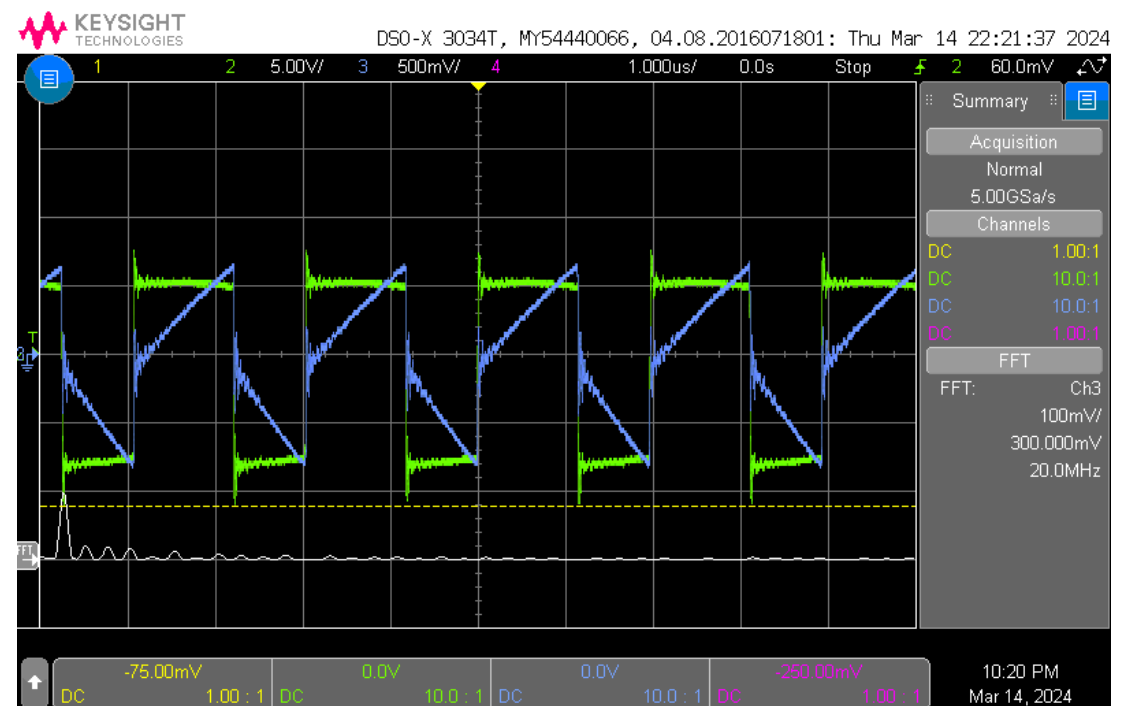
Abbildung 17: Einfluss einer durch Perkolation geschädigten verpressten Induktivität auf einen DC/DC-Wandler.

AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS IN EINEM DC-DC-WANDLER

Betrachtung unterschiedlicher Perkulationsstufen



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

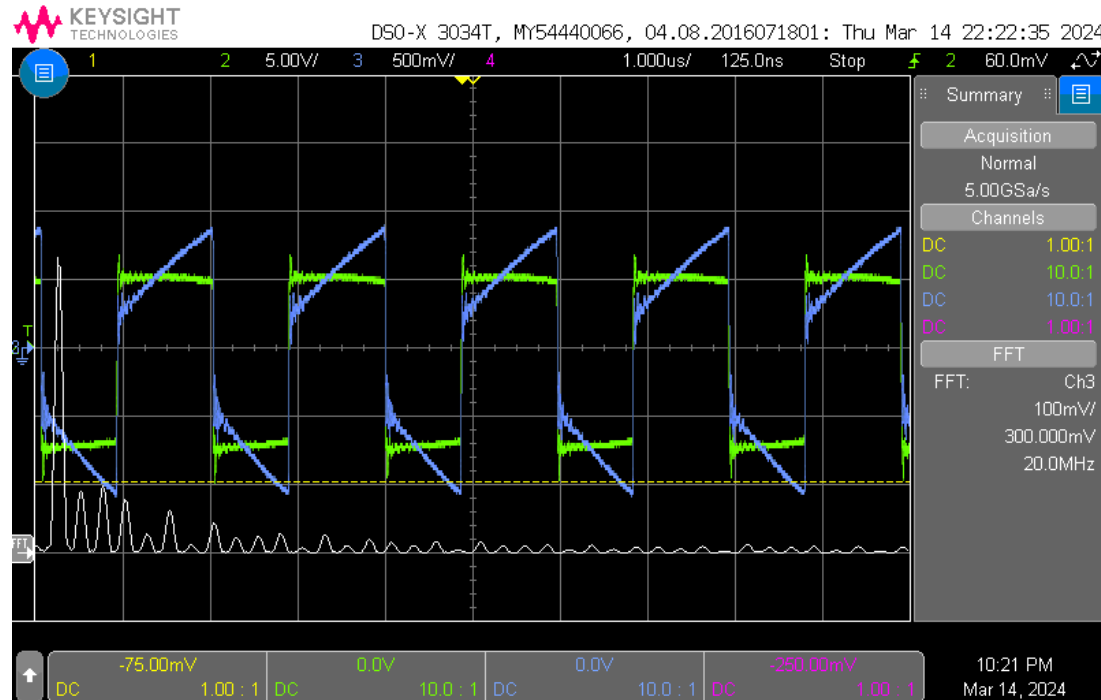


b. Einsetzen des Perkulationsphänomens.

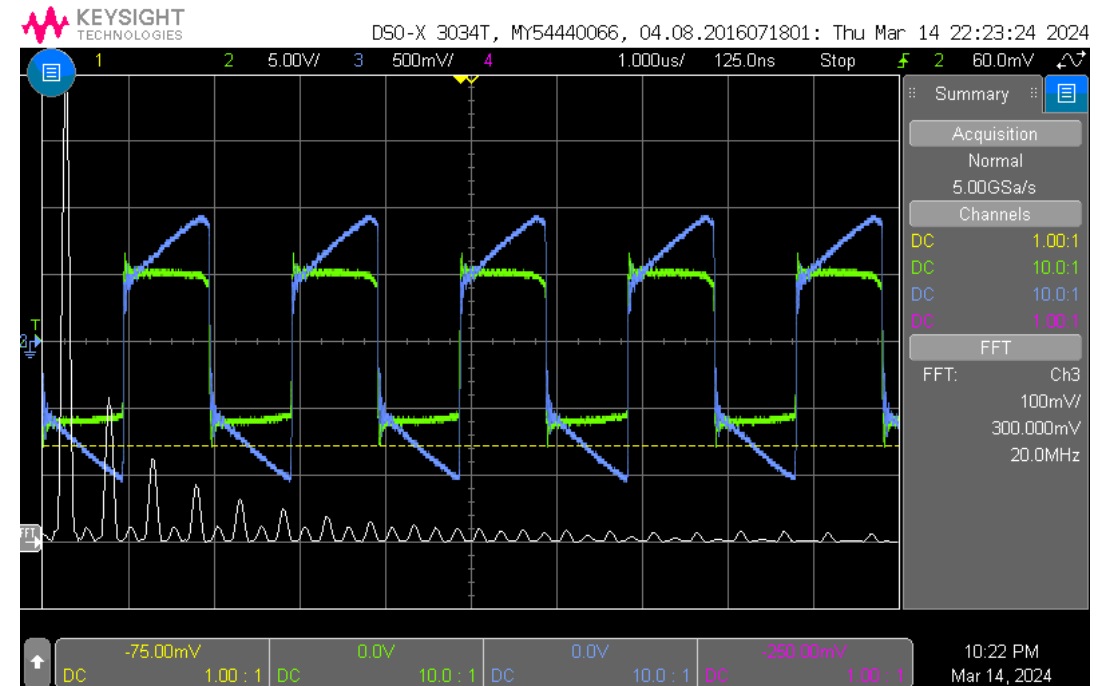
Abbildung 18: Nachweise über Auswirkungen auf den Ripplestrom aufgrund von Perkolation.

AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS IN EINEM DC-DC-WANDLER

Betrachtung unterschiedlicher Perkulationsstufen



c. Hochpegel des Perkulationsphänomens.



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

Abbildung 19: Nachweise über Auswirkungen auf den Ripplestrom aufgrund von Perkolation.

AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS IN EINEM DC-DC-WANDLER

Einfluss auf den Wirkungsgrad

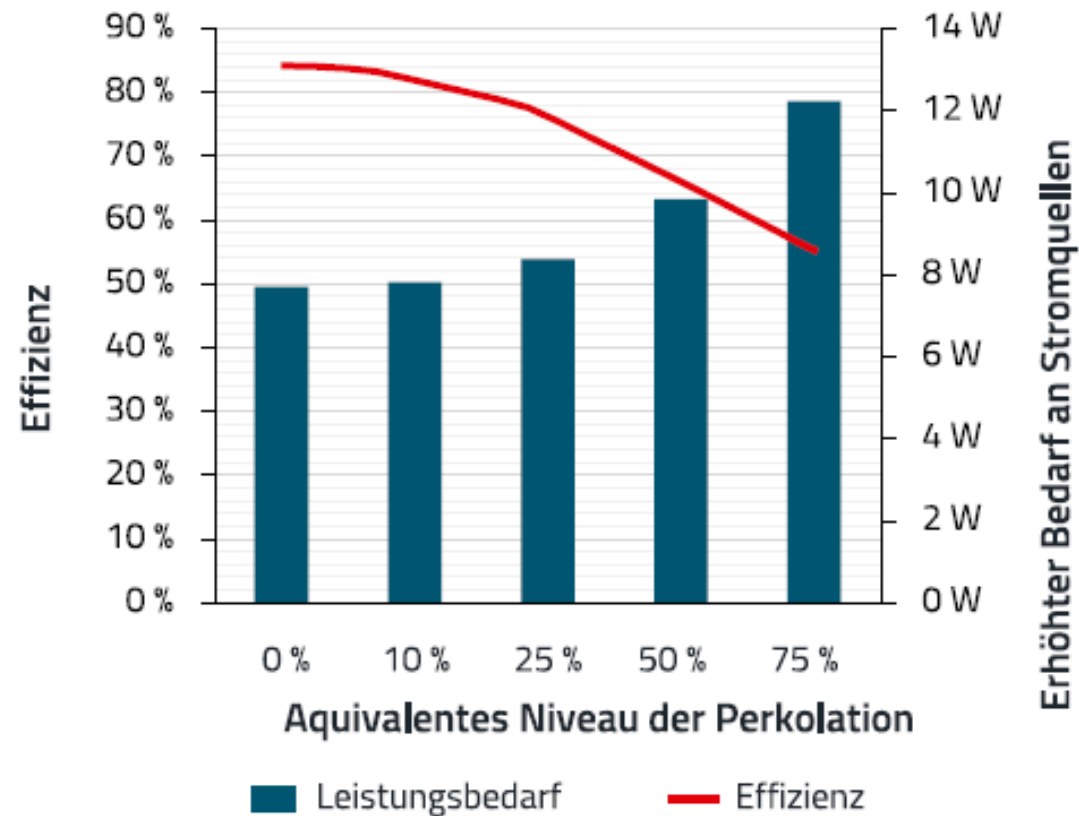
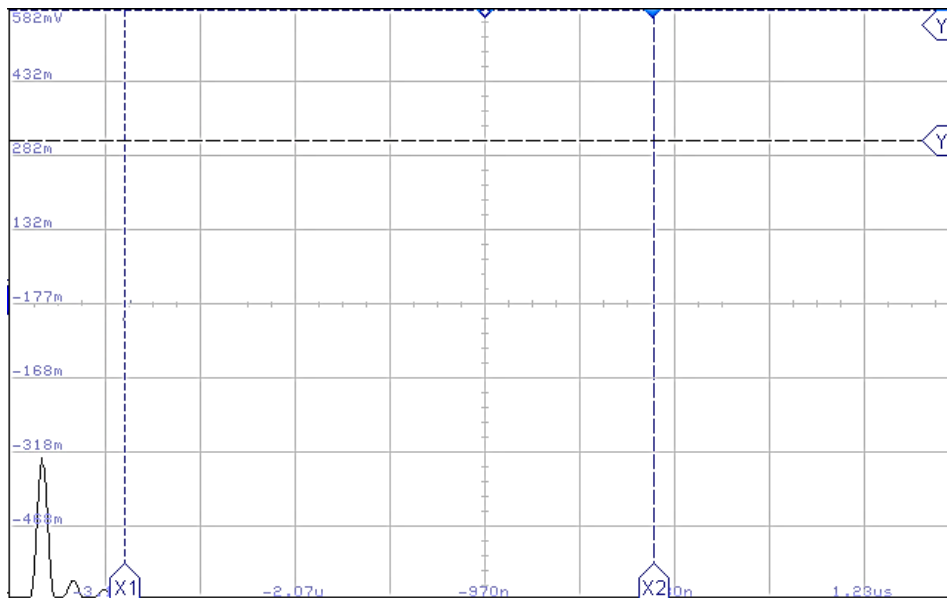


Abbildung 20: Abnahme des Wirkungsgrads aufgrund der Perkolation der verpressten Induktivität.

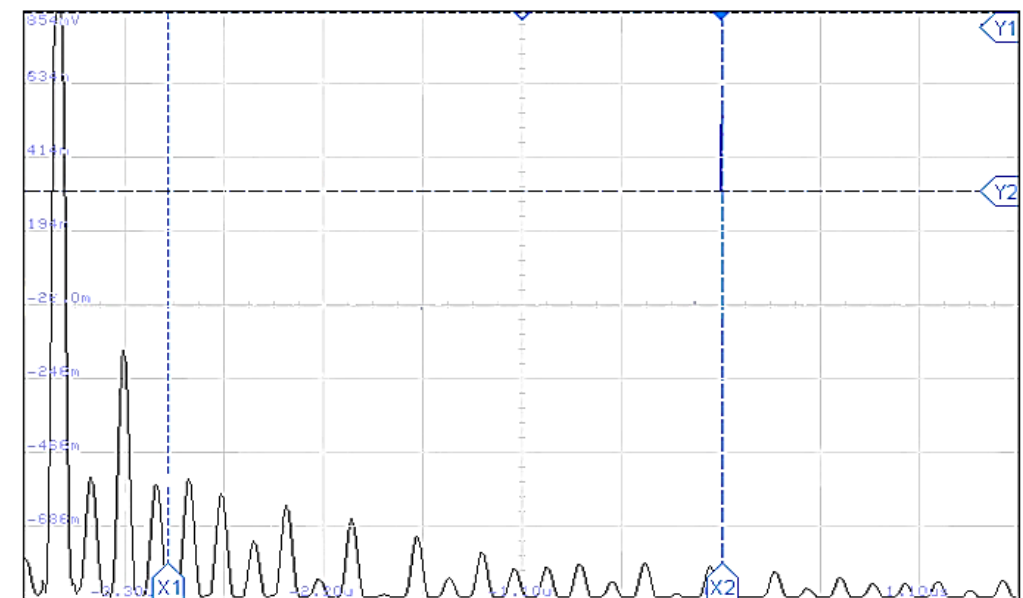
AUSWIRKUNGEN DES PERKOLATIONSPHÄNOMENS IN EINEM DC-DC-WANDLER

Einfluss auf die EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit)

Signifikante Präsenz von Harmonischen = Mehrere EMV-Probleme, sowohl bei leitungsgebundenen als auch bei abgestrahlten Störungen:



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



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

Abbildung 21: Zunahme der Harmonischen bezogen auf das Perkulationsphänomen an der verpressten Induktivität (Skala: 100 mV/div bis 30 MHz).

ZUSAMMENFASSUNG DER WICHTIGSTEN ERKENNTNISSE



- Das **Perkolationsphänomen** in einer verpressten Induktivität ist definiert 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 Perkolation lässt sich als **Abnahme des Q-Faktors** und der Induktivität bei hohen Frequenzen sowie als **Abnahme der Resonanzfrequenz** identifizieren
- Wenn die Induktivität in einem DC/DC-Wandler eingesetzt wird, zeigt sich die Perkolation durch die **Veränderung des Rippelstroms** der Spule, den **Anstieg der Harmonischen** und folglich durch **Abnahme der Effizienz**

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

APPLICATION NOTE

ANP142 | Effects of molded power inductor degradation due to higher voltage or temperature in a DC/DC converter



Dr.-Ing. Efrain Bernal Alzate

1. INTRODUCTION

For DC-DC converter applications molded power inductors enable both smaller footprints and lower profile due to the properties of the magnetic material. The reduced dimensions of current designs demand the employment of smaller inductors capable of operating currents in more extreme thermal, electrical and thermal stresses. Magnetic core loss over time due to the percolation phenomenon is a common failure mechanism. eISos has pioneered the introduction of the common failure mechanism degradation found under high voltage and temperature. **Voltage specification for molded power inductors** degradation obtained when a power inductor is exposed to high temperatures and **thermal aging in molded power inductors**.

2.1 Percolation phenomenon on molded power inductors

percolation threshold is the critical point where the material turns from insulating to conductive.

great interest in the scientific community has promoted the development of experimental research work in the field of percolation phenomenon^[4]. It has been used in artificial intelligence programming, to model the percolation phenomenon in the materials field, percolation theory is a mathematical model, commonly referenced in the development and modeling of composite materials^[5].

Percolation refers to the slow movement of particles through tiny spaces or holes, as well as the formation of a network when nodes or links are connected.

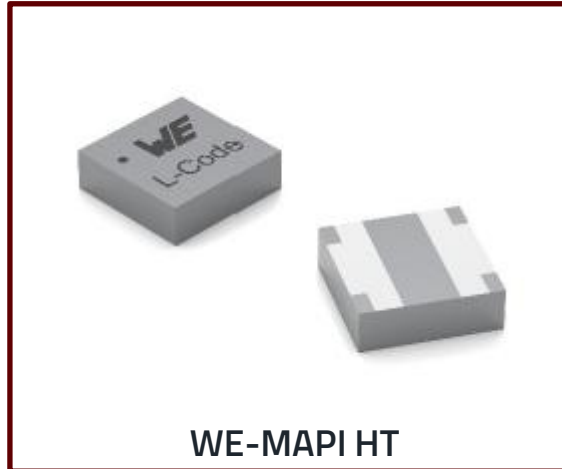
Percolation phenomenon occurs when a critical amount of added conductive material is present. Above the electrical conductivity threshold, the material is called the percolation threshold. Many experiments have shown that the activity of composites has a significant impact on the doping of conductive materials made by combining two



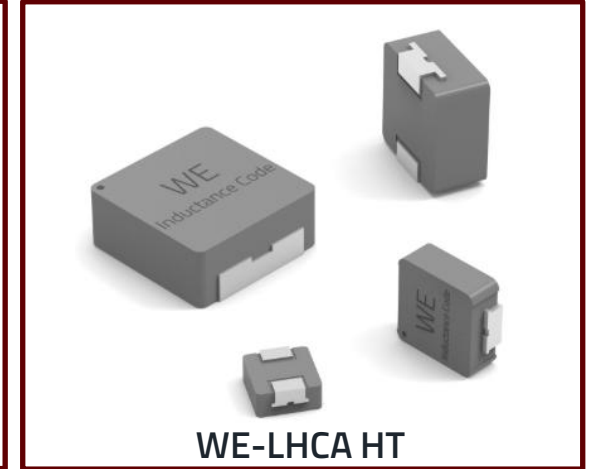
WÜRTH ELEKTRONIK: HIGH-TEMPERATURE MOLDED INDUCTORS

Verpresste Induktivitäten für anspruchsvolle Hochtemperaturanwendungen

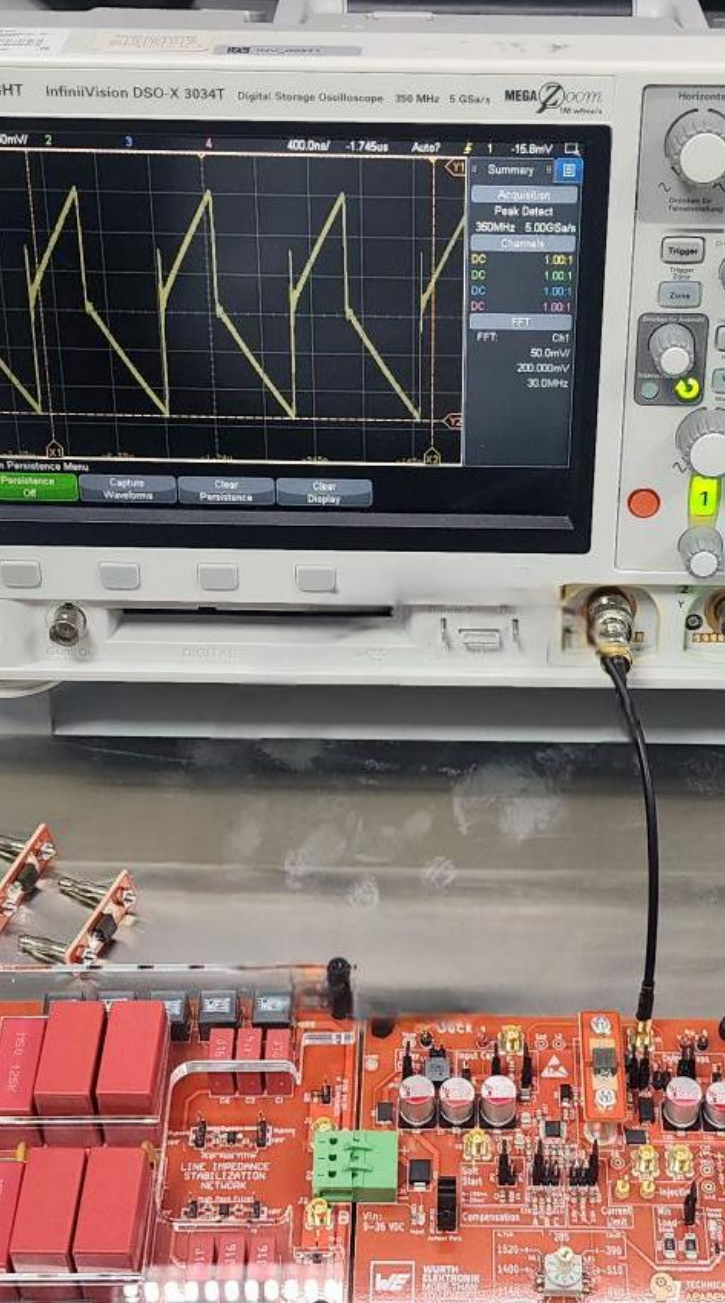
Standard



Automotive



- Speziell entwickelt, um hohen Temperaturen und Spannungen standzuhalten – ganz **ohne Bedenken hinsichtlich Perkolation**
- Getestet für **mehr als 5000 Stunden bei 200 °C** ohne Veränderung der elektrischen Performance



VIELEN DANK!



Annika Frankemölle

Annika.Frankemoelle@we-online.de

Kontaktieren Sie uns für weitere Fragen!