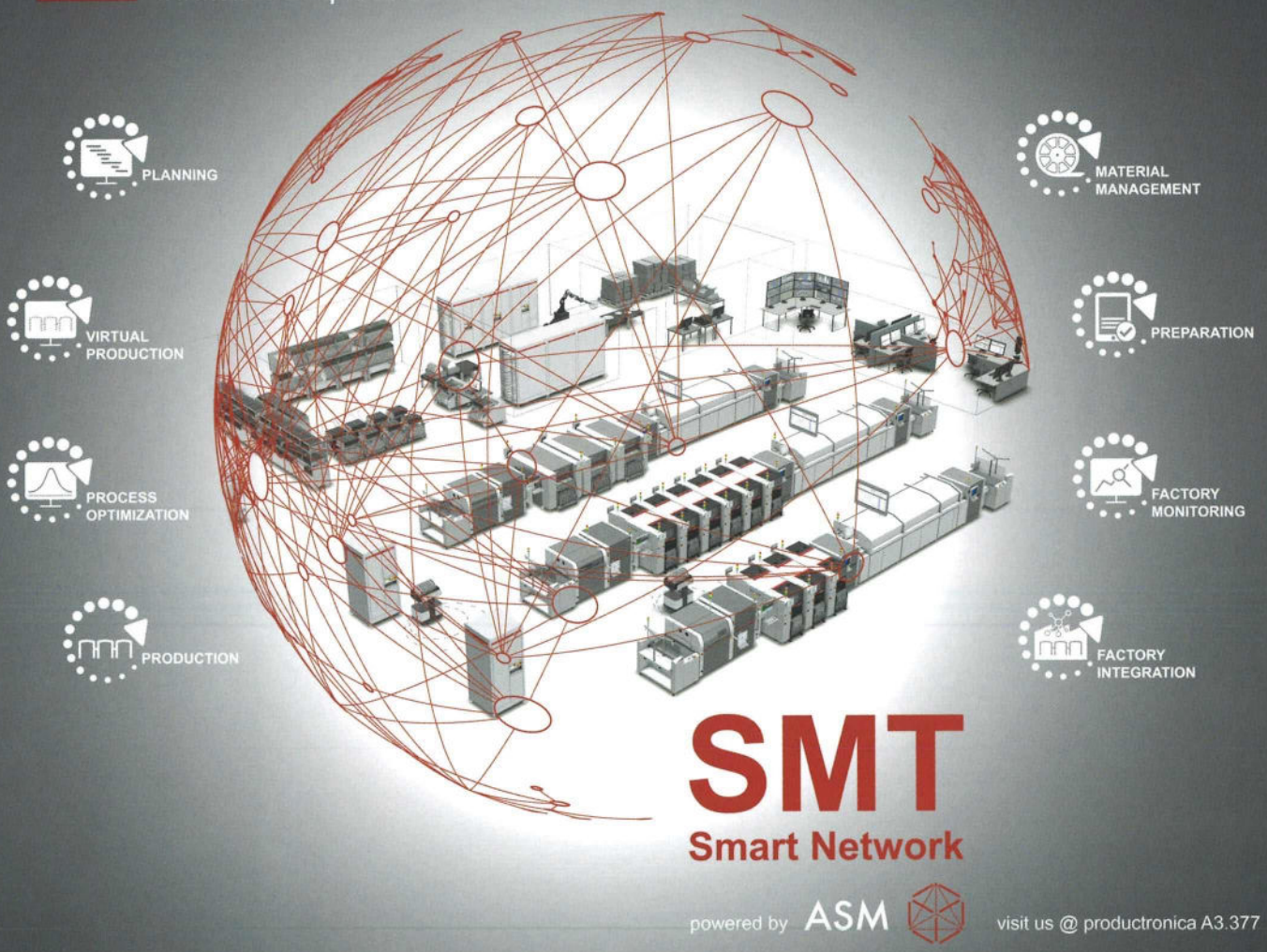
need power? think GlobTek
www.GlobTek.de

ELEKTRONIK PRAXIS
www.elektronikpraxis.de

Wissen. Impulse. Kontakte.

21
B19126
2. November 2017
€ 12,00



Netzwerke und Workflows für die intelligente SMT-Fabrik

Wie smart kann die Elektronikfertigung heute schon sein? Konkrete Antworten gibt Technologieführer ASM auf der productronica 2017

Optoelektronik in Wearables

Fitnessarmbänder messen mit der sogenannten Photopletysmogramm-Methode den Puls. Seite 22

Maschinen lernen Sprechen

Stumme Automaten werden zu sprechenden Maschinen, die miteinander kommunizieren. Seite 40

Sicherheit von Anfang an

Wer Security-Anforderungen von IoT-Geräten früh berücksichtigt, spart teure Nachrüstungen. Seite 58

Vogel Business Media

Mit Eisen-Pulver-Legierungen ohne lange Wartezeit elektrisch tanken

Eisen-Pulver-Legierungen sorgen für beachtliche Steigerung der Leistungsdichte und verkürzen den Boxenstopp von Elektroautos erheblich.

REINER NOWITZKI, CHRISTOPH KAMMENHUBER *

Die Leistungsdichte ist neben der Betriebssicherheit der wichtigste Faktor, der den Zukunftsmarkt Elektroautomobilität bestimmt. Hinter dem Begriff Leistungsdichte steht das Kürzel W/cm³, also Watt pro Kubikzentimeter. Lapidar ausgedrückt ist hier nichts anderes gemeint als „wie schnell lädt mein Akku?" – eine Frage, die Millionen von Smartphone-Besitzern zukünftig auch beim Autokauf stellen werden.

Vom Verbrennungsmotor zum Elektroantrieb

Elektromobilität ist der Zukunftsmarkt kommender Jahre. Der beginnende Wandel, weg vom klassischen Verbrennungsmotor, fordert Automobilherstellern- und Zulieferern eine hohe Flexibilität ab. Seit der ersten Realisierung und Nutzung von Elektromobilität ist die primäre Herausforderung für Entwickler und Industrie die Steigerung der Energiedichte in Batterien. Einer höheren Energiedichte (speicherbare Energiemenge) folgt aber sofort die Forderung einer verbesserten Leistungsdichte (Speicher-und Abrufgeschwindigkeit der Energie) auf dem Fuß.

Hier hat die Lithium-Ionen-Technik bereits einen entscheidenden Fortschritt im Vergleich zu Blei- oder NiMH-Batterien geliefert. Und nach wie vor besteht ein großes Entwicklungspotenzial neuer Batterietechnologien.

Bilder: Finepower

Nur die effektive Steigerung von Leistungsdichte ermöglicht es zukünftig, die Batterien in Elektrofahrzeugen rasch elektrisch zu „betanken": *Mithilfe von Magnetika aus Eisenpulver-Legierungen ist diese ehrgeizige Aufgabe lösbar, erfordert aber auch jahrelanges Knowhow und den Einsatz modernster frei konfigurierbarer Pulverpressen.*

Entwicklung und Prognosen zur Energiedichte zeigen deutlich, dass die Anforderungen der Automobilindustrie endlich erfüllt und Reichweiten über der magischen 500-Kilometer-Grenze, mit nur einer Batterieladung, realisierbar sind.

Für die Elektronik in den Fahrzeugen, insbesondere für On-Board-Ladegeräte, bedeutet das eine unabdingbare Steigerung der Leistungsdichte. Denn innerhalb weniger Stunden müssen nicht wie bisher 22 kWh Batterien aufgeladen werden, sondern künftig sind 100 kWh und mehr elektrisch zu „betanken". Das klare Ziel der Automobilindustrie ist es, in den Bauraum eines Ladegerätes mit einer bisherigen Leistung von 3,5 kW nun 7,5 oder gar 11 kW zu integrieren.

Trend zu bidirektionalen Ladegeräten

Neben der Steigerung der Leistungsdichte nimmt auch der Wunsch nach Bidirektionalität von Ladegeräten zu. Das einseitige Nehmer-

*** Reiner Nowitzki**
... ist Head of Engineering bei der Finepower GmbH,

Christoph Kammenhuber
ist Entwicklungsleiter Induktivitäten bei HARTU Induktive Bauelemente, Phoenix Mecano Power Quality GmbH & Co KG.

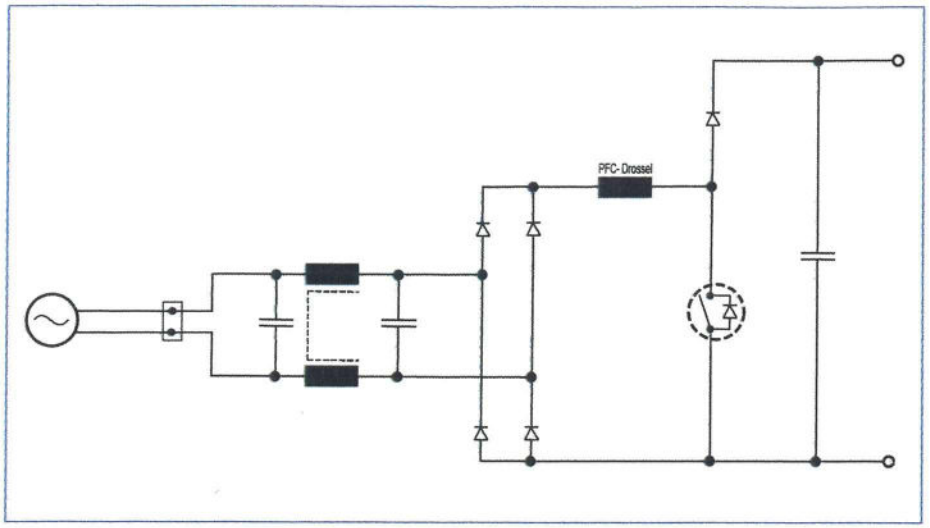


Bild 1: *Typische PFC-Stufe im kW-Bereich. Ein hoher Anteil der Verlustleistung der Drossel entsteht durch die sehr hohe Ummagnetisierungsenergie des Ferrits.*

Prinzip wird zum Nehmer-Geber-Prinzip ausgebaut. Große Batterien in Fahrzeugen können wesentlich zur Netzstabilität beitragen und in Haushalten mit dezentraler Stromerzeugung (z.B. durch Photovoltaik) eine höhere Eigennutzung der selbst erzeugten Energie ermöglichen. Die dazu deutschlandweit benötigte Energie stellt nur einen Bruchteil der zukünftig in Automobilbatterien gespeicherten Gesamtmenge dar. Das Ladegerät kann bei Frequenzschwankungen des Netzes im Phasenschieberbetrieb agieren. Hierdurch wird lediglich Blindleistung umgesetzt, ohne die Batterie nennenswert zu belasten.

Eine solche Funktion ist zum Beispiel in modernen Solarwechselrichtern schon lange Standard. In weiteren Szenarien fungiert die Fahrzeugbatterie während Netzunterbrechungen, Stromausfällen oder bei Außeneinsätzen (Baustellen, Campingplatz) als (Not)Versorgung. Auch die zusätzliche Absicherung kritischer Infrastruktur, beispielsweise von Krankenhäusern, stellt ein nicht zu vernachlässigendes Nutzungspotenzial dar.

Zukünftige Ziele brauchen neue Lösungen mit neuen Topologien

Wie die genannten Anforderungen mit Hilfe von Magnetika aus Eisenpulver-Legierungen erreicht werden können, soll die Fortentwicklung der typischen Eingangsstufe eines Ladegerätes darstellen.

Die sogenannte PFC-Stufe (Power Factor Correction = Leistungsfaktorkorrektur) ist nahezu in jedem elektronischen Konverter zu finden, der mit dem Niederspannungsnetz (230 V_{AC}) verbunden ist. Zweck der PFC ist es, die Stromaufnahme aus dem Netz so zu regeln, dass sich ein in Phase liegender Eingangsstrom in Relation zur Netzspannung ergibt. Somit wird zum einen das Netz optimal belastet, zum anderen kann die maximale Wirkleistung in Bezug auf die Netzabsicherung entnommen werden.

Ist eine Netzleitung zum Beispiel haushaltsüblich mit 16 A abgesichert, kann die maximale Leistung von 3,6 kW nur bei einem in Phase liegenden Sinusstrom effektiv genutzt werden, also dann, wenn keine Blindleistung durch die Leitung fließt.

Eine bisher übliche PFC-Stufe im Leistungsbereich bis 1 kW besteht aus einem Diodengleichrichter sowie einer Boost-Stufe, mit einem Silizium(Si)-Transistor und schneller Si-Diode. In diesen aktiven Bauteilen und der Boostdrossel (Induktivität) entstehen jedoch signifikante Verluste (Bild 1).

Ein typisches Taktungsschema für diese Stufe ist der Transition-Mode (TM), bei dem der Strom durch die PFC-Drossel bei jeder Ausschaltphase pro Taktzyklus wieder zu Null wird. Dadurch sinken die Schaltverluste in den Si-Transistoren deutlich, jedoch steigen der Maximalwert und Rippelanteil des PFC-Stroms auf das Doppelte des sinusförmigen Netzstroms. Um die hohe Ummagnetisierungsenergie bei solch dynamischen Stromänderungen zu begrenzen, kommen Drosseln mit Ferritkernen zum Einsatz.

Die benötigte Induktivität für diese Drossel ist zwar relativ klein aber aufgrund der sehr hohen Aussteuerung sind für den Transition-Mode ausgelegte Drosseln verhältnismäßig groß (Bild 2).

Zur Erhöhung der Leistungsdichte wählt man vorzugsweise den Continuous-Conduction-Mode (CCM) der PFC-Schaltung, d.h. der Strom in der PFC-Drossel kommt in der Aus-

schaltphase des Transistors nicht mehr zu Null. Dies kann durch eine höhere Induktivität der Drossel oder eine Erhöhung der Schaltfrequenz des Transistors erreicht werden (Bild 3).

Wird der Drosselstrom vor dem erneuten Einschalten nicht mehr zu Null, muss der Transistor auf die leitende Boost-Diode kommutieren. Dadurch entstehen sehr hohe Einschaltverluste infolge des „Reverse-Recovery"-Verhaltens der Diode. Infolgedessen ist beim CCM-Betrieb eine sehr schnelle Diode erforderlich, vorzugsweise aus dem Halbleitermaterial Siliziumkarbid (SiC).

Trägt man der weiteren Erhöhung der Leistungsdichte Rechnung, so werden zusätzliche Optimierungen notwendig, zum Beispiel durch die Verwendung einer sogenannten „Bridgeless-PFC"-Schaltung. Bei dieser Topologie werden die unteren beiden Dioden des passiven Gleichrichters durch Transistoren ersetzt und die Boost-Stufe entfällt. Das spart Durchlassverluste, da der Strom insgesamt durch weniger Bauelemente fließen muss.

Eine weitere Steigerung kann mit der „Totem-Pole"-Topologie erreicht werden. Hier werden auch die oberen Dioden (Polwender) durch aktive Leistungsschalter ausgetauscht. Diese Topologie bietet zudem Bidirektionalität, ist also in der Lage, Leistung sowohl vom Netz aufzunehmen, als auch zurückzuspeisen.

Voraussetzung hierfür sind Transistoren, die sehr schnelle interne Reversedioden besitzen oder Transistoren, die diese Reversediodenstruktur nicht aufweisen.

Die internen „Bodydioden" von Siliziumtransistoren der notwendigen Spannungsklasse (typischerweise 600 V) sind für diesen Einsatz zu langsam und daher ungeeignet. IGBTs ohne interne Bodydiode weisen sehr hohe Schaltverluste auf, somit ist mit diesen Bauteilen auch keine weitere Steigerung der Leistungsdichte möglich.

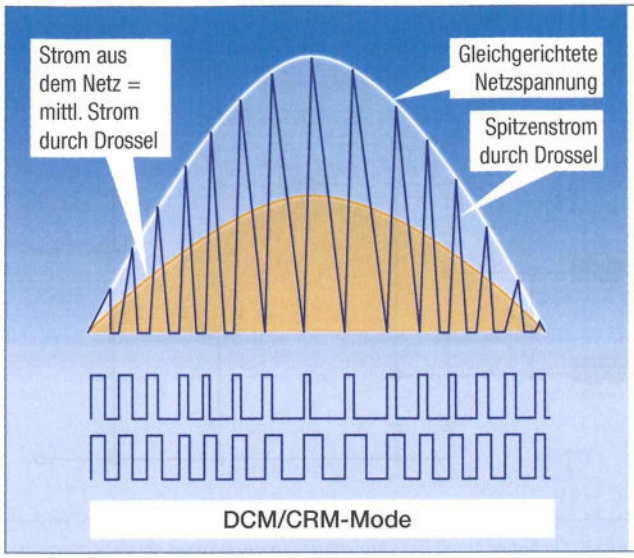


Bild 2: *Strom durch die PFC-Drossel im Transition-Mode bzw. Discontinuous-Mode zu den Nulldurchgängen. Ein typisches Taktungsschema für diese Stufe ist der Transition-Mode. Somit kommt der Strom durch die PFC-Drossel in jedem Zyklus zu Null.*

Als künftige Lösung kommen neue Wide-Band-Gap-Schalter auf der Basis von Siliziumkarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) zum Einsatz. Mit diesen Schaltern lassen sich Schaltfrequenzen weiter steigern und eine Miniaturisierung der Leistungselektronik realisieren. Auf diese Weise wird das Ziel höherer Leistungsdichte in den kommenden Jahren realisiert (Bild 4).

Realisierung zukünftiger Leistungselektronik

Bei jeder der zuvor beschriebenen Topologien bleibt der PFC-Betrieb im Continuous-Conduction-Mode bestehen. Dabei ist der Drosselstrom geprägt durch einen hohen Gleichanteil (50 Hz/100 Hz) und einen verhältnismäßig kleinen Rippelstrom im Schaltfrequenztakt.

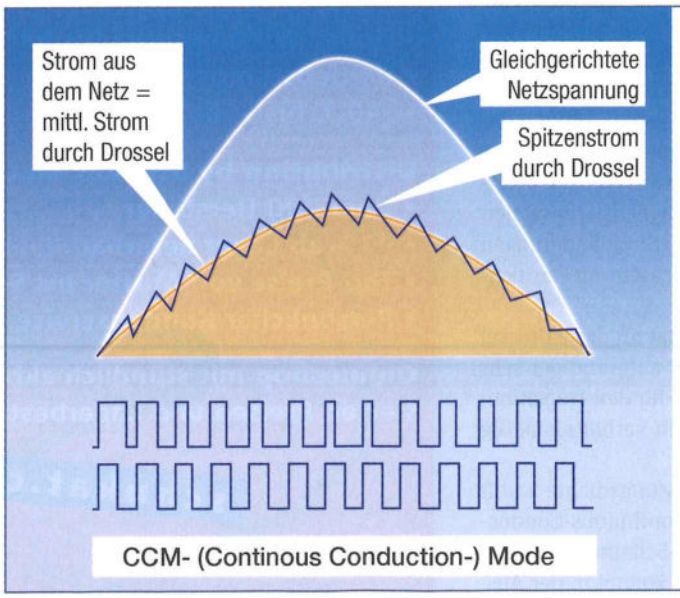


Bild 3: *Strom durch die PFC-Drossel im Continuous-Mode. Wird die Induktivität verhältnismäßig groß gewählt oder die Schaltfrequenz erhöht, kommt der Strom in der PFC-Drossel nicht mehr zu Null.*

Für diese Art des „modulierten Gleichstromes" leiten sich einige grundlegende Richtlinien zum Bau der PFC-Drosseln ab.

Die Wickeldrähte für die magnetischen Bauteile können relativ einfach durch Volldrähte ausgeführt werden. Der dominante niederfrequente Stromanteil wird über den vollen Kupferquerschnitt aufgenommen. Der Skineffekt für die höheren Frequenzen ist zwar signifikant, die damit verbundenen Verluste aber aufgrund des vergleichsweise kleinen Rippelanteiles vertretbar.

Als Kernmaterialien bieten sich Eisenpulver wie das MANIFLUX „MFL A 075 M" der HARTU Induktive Bauelemente oder für höhere Frequenzen (üblicherweise 50 bis 150 kHz) spezielle Eisenpulverlegierungen wie das MANIFLUX „MFL B 060 H" an.

Als Kernmaterial für Speicherdrosseln höherer Frequenzen und hohem Rippelanteil werden meist ferritische Kernmaterialien eingesetzt, bei denen zur Erhöhung des Sättigungsstroms ein definierter Luftspalt eingeschliffen wird. Bei großem Luftspalt treten jedoch Streufelder auf, die in die Wicklung ausstrahlen und auf Grund des Proximity-Effekts zu einem deutlichen Temperaturanstieg der Drosseln im Arbeitspunkt führen.

Für Anwendungen mit hohem Gesamtstrom, aber relativ kleinem Hochfrequenzanteil stellen Eisenpulvermaterialien eine sehr interessante Alternative dar. Eisen verfügt gegenüber Ferrit über eine hohe Sättigungspolarisation J_S, ist jedoch elektrisch leitfähig. Die Kernverluste setzen sich daher aus den linear mit der Frequenz ansteigenden Ummagnetisierungsverlusten und den quadratisch mit der Frequenz ansteigenden Wirbelstromverlusten zusammen.

Um bei Frequenzen unter 100 kHz die Wirbelstromverluste zu senken, kann wie beim

Kernmaterial MANIFLUX „MFL A" Eisen in Pulverform eingesetzt werden. Die einzelnen Körner werden gegeneinander isoliert. Dadurch verringern sich die Wirbelströme und der entstehende Luftspalt zwischen den Körnern lässt eine hohe Aussteuerung des Materials bei gleichzeitig niedrigen Streufeldern zu. Durch die gewählte Korngrößenverteilung des Rohmaterials können die Koerzitivfeldstärke H_c und damit die Kernverluste P_V, sowie die Frequenzabhängigkeit der Anfangspermeabilität μ_i des Kernmaterials eingestellt werden.

Eisenpulvermaterialien erlauben einen Betrieb der Drosseln mit hohen Flussdichten B und hoher Gleichstromvormagnetisierung durch eine konstante relative Überlagerungspermeabilität $\mu\Delta\%$ bis zu Feldstärken von 1000 A/m.

Ein Vorteil des Eisenpulvers im Vergleich zum Ferrit ist auch die hohe Curie-Temperatur T_c des Eisens und der konstante Temperaturfaktor der Permeabilität im Bereich von T=25 °C bis über T=150 °C. Im Gegensatz zu Ferritkernen sinkt dadurch die Induktivität einer Drossel bei Temperaturanstieg nicht.

Kompakte Drosseln verbessern die Leistung erheblich

HARTU Induktive Bauelemente hat am Standort Hermsdorf in Thüringen (vormals Tridelta GmbH) für Leistungsanwendungen bis 100 kHz verschiedene frequenzstabile Eisenpulvermaterialien der Bezeichnung MANIFLUX MFL A mit Anfangspermeabilitäten von μ_i=35, 40, und 75 entwickelt. Durch die Auswahl der richtigen Permeabilität kann der Arbeitspunkt der Drossel optimal eingestellt werden. Die Sättigungspolarisation J_S liegt je nach Materialsorte zwischen 1,2 und 1,6 Tesla.

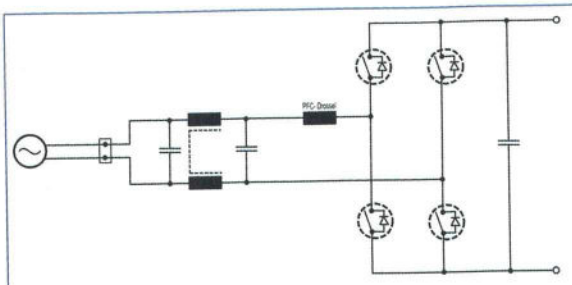


Bild 4: *Bidirektionale Totempole-PFC mit aktivem Pol-Wender. Mit Hilfe von z.B. GaN-Schaltern werden die gewünschten Ziele kommender Jahre realisiert.*

Es stehen für diese Materialien Topfkerne der Größen P60 und P80 zur Verfügung. Diese Bauform ermöglicht kompakte Drosselausführungen durch optimale Ausnutzung des Kernmaterials und eine Abschirmung der Wicklung nach außen.

Auch Ringkerne können aus den MANIFLUX-Pulvern gefertigt und mit einem von UL geprüften Epoxidlack isoliert werden. Dieser Lack weist bei einer Eingruppierung in die UL Flammklasse V-0 sehr gute Entzündbarkeits- und Entflammbarkeitswerte von HWI 0 und HAI 1 auf. Die Kriechstromfestigkeit ist mit CTI 0 geprüft. Der Lack ist damit bestens für den Einsatz in Drosseln geeignet, bei denen ohne weitere Bandage direkt auf dem Kern gewickelt wird.

Eine weitere Senkung der Ummagnetisierungsverluste kann durch die Verwendung legierter Eisenpulvermaterialien erreicht werden. Eine Legierung mit Silizium senkt die Verlustleistungsdichte P_V um ca. 50%. Bei einer Frequenz von 50 kHz und einer magnetischen Aussteuerung von 100 mT lässt sich beim Material MANIFLUX MFL B 060 H eine Verlustleistungsdichte von 825 mW/cm³ gegenüber 1950 mW/cm³ beim Reineisenmaterial MFL A 075 M erreichen. Ein negativer Einfluss auf den Temperaturfaktor der Permeabilität tritt bei dieser Legierung nicht auf. Die Sättigungspolarisation J_S sinkt jedoch leicht durch den Einfluss des Siliziums.

Die Materialien mit der Bezeichnung MANIFLUX MFL B können bei den Topfkernen P60 und P80 im Bereich der Mittelbutzen eingesetzt werden, also im Bereich, in dem die höchste Felddichte auftritt. Solche Hybridkerne senken die Verluste bei höheren Frequenzen deutlich. Auch Kernblöcke und Profilkerne sind aus legierten Eisenpulvern herstellbar.

Zusätzlich untersucht HARTU Induktive Bauelemente aktuell auch den Einsatz von amorphen Pulvermaterialien. Hier wird eine zusätzliche, deutliche Reduzierung der Verlustleistungsdichte P_V erwartet. // TK

Finepower