Charakterisierung und Applikation weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe für induktive Komponenten leistungselektronischer Baugruppen

Der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg zur Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

(Dr.-Ing.)

vorgelegt von Sven Egelkraut geboren am: 08.05.1981 in Karl-Marx-Stadt

Erlangen 2011

Charakterisierung und Applikation weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe für induktive Komponenten leistungselektronischer Baugruppen

Als Dissertation genehmigt von der Technischen Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung: 27.09.2010 Tag der Promotion: 01.04.2011 Dekan: Prof. Dr.-Ing. Reinhard German Erster Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Heiner Ryssel Zweiter Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Ernst M. Schmachtenberg

Erlanger Berichte Mikroelektronik

Band 2/2011

Sven Egelkraut

Charakterisierung und Applikation weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe für induktive Komponenten leistungselektronischer Baugruppen

D 29 (Diss. Universität Erlangen-Nürnberg)

Shaker Verlag Aachen 2011

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011 Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0248-5 ISSN 0948-3462

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9 Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente der Universität Erlangen-Nürnberg in Rahmen der Bearbeitung eines Teilprojektes zum Thema "motorintegrierte Leistungselektronik" des DFG Sonderforschungsbereiches (SFB) 694 mit dem Titel "Integration elektronischer Komponenten in mobile Systeme" für dessen Einrichtung ich mich bei Prof. Weckenmann als Sprecher des SFB694 zu erst bedanken möchte.

Bei Prof. Ryssel möchte ich mich für die Übernahme der ersten Begutachtung aber auch für die Möglichkeit einer freien, ungetriebenen, wissenschaftlichen Arbeit bedanken, welche Prof. Ryssel an seinem Lehrstuhl umgesetzt hat und welche nun von Prof. Frey fortgesetzt wird. Des Weiteren möchte ich mich bei Prof. Ryssel für die zahlreichen Anmerkungen zu wissenschaftlichen Vorgehensweisen während meiner Arbeit am Lehrstuhl bedanken.

Dr. Martin März möchte ich an dieser Stelle für die fachliche Betreuung der Arbeit danken. Danke sagen möchte ich auch für die freundlichen, inspirativen Treffen und Diskussionen oft ohne zeitlichen Rahmen, aus denen zahlreiche Ratschläge und Ideen hervorgegangen sind.

Bei Prof. Schmachtenberg möchte ich mich für das Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Koreferates bedanken.

Dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg und vor allem Aleksander Gardocki sowie Christoph Heinle möchte ich für die Unterstützung bei der Herstellung der Probekörper danken.

Des Weiteren möchte ich Aloys Foecker und der Neosid Pemetzrieder GmbH & Co. KG für die Unterstützung bei der Herstellung weichmagnetischer Pulverwerkstoffe meinen Dank aussprechen.

Nicht zu letzt möchte ich mich bei meinen Freunden und Kollegen am Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente und am Fraunhofer Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie bedanken, welche jeden Tag bereicherten haben und mir täglich die Möglichkeit gaben, auch über den Tellerrand meines Arbeitsgebietes zu blicken.

Kurzfassung

Das Volumen und damit die Leistungsdichte aktueller leistungselektronischer Systeme werden maßgeblich durch die Volumina passiver Bauelemente vorgegeben. Diese sind in aktuellen Lösungen formstarr und sperrig ausgeführt und behindern eine fortgesetzte Integration elektronischer Komponenten in komplexe Bauräume. Zur Reduktion des Bauvolumens und zur Steigerung der mechanischen Freiheitsgrade leistungselektronischer Baugruppen sind verschiedene Ansätze denkbar. Zum einen können durch innovative Schaltungstechniken, wie zum Beispiel mehrphasige Konzepte leistungselektronischer Energiewandler, und modernste Halbleiterbauelemente, zum Beispiel Siliciumcarbid Schottkydioden, höchste Schaltfrequenzen und kleinste zu übertragende Energiepakete und damit kleinste auszulegende passive Bauelemente realisiert werden. Zum anderen können neue Werkstoffe für passive Bauelemente komplexeste Bauräume funktional füllen und damit eine Integration leistungselektronischer Systeme in dreidimensional geformte Bauräume ermöglichen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden neue weichmagnetische Werkstoffe für induktive Bauelemente auf Basis hochgefüllter Kunststoffe untersucht und in ihren magnetischen Eigenschaften charakterisiert. Dazu wurden ringkernförmige Probekörper in verschiedenen Verfahren der Kunststofftechnik mit verschiedenen Füllstoffen und Füllstoffgehalten hergestellt. Mittels eines im Verlaufe dieser Arbeit aufgebauten Versuchsstandes wurden die weichmagnetischen Parameter dieser hochgefüllten Kunststoffe messtechnisch bestimmt. Anschließend wurde unter Verwendung der ermittelten Werte für die Permeabilität, die Sättigungsfeldstärke und die Verlustleistungsdichte ein induktives Filterbauelement mit Hilfe elektromagnetischer und thermischer Simulationen ausgelegt, aufgebaut und charakterisiert. Dabei konnten die Vorteile weichmagnetische gefüllter Kunststoffe wie eine nahezu vollständig freie Wahl der äußeren Form, eine mit steigendem Strom sehr langsam eintretende Sättigung und eine im Vergleich zu anderen Werkstoffen hohe Dämpfung erstmal in einer vorgegebenen Anwendung optimal eingesetzt werden. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass weichmagnetisch gefüllte Kunststoffe nicht nur für akademische Untersuchungen sondern auch für industrielle Anwendungen weiter in den Fokus zukünftiger Entwicklungen rücken werden und in hochintegrierten leistungselektronischen Systemen Verwendung finden könnten.

Abstract

Volume and thus power density of present power electronic systems are decisively defined by the volumes of passive devices. In conventional solutions these are designed rigidly and bulky and hinder a continued integration of electronic components into complex installation spaces. Various approaches to reduce the required volumes and to increase the degrees of freedom are conceivable. On the one hand, a maximisation of switching frequencies by using innovative circuit concepts and latest power semiconductor devices like silicon carbide schottky diodes and, therefore, a minimisation of energy to be transferred at each cycle resulting in the possibility to use smaller passive devices and, therefore, to reduce the total volume consumed by the system. On the other hand, new materials for passive components can fill complex spaces functionally and thereby enable an integration of power electronic systems in three-dimensional installation spaces. In this work, new soft magnetic materials for inductive components based on highly-filled polymers were investigated and their magnetic characteristics analyzed. For this purpose, specimens with toroidal cores were manufactured by different processes of polymer technology varying filler materials and filler contents. By means of test equipment developed in the course of this work the soft magnetic parameters of these polymer bonded soft magnetics were measured. Subsequently the measured values for permeability, saturation field strength and power dissipation density were used to develop, build, and characterize an inductive filter element by means of electromagnetic and thermal simulations. This allows for the first time and in a well defined application, the optimum utilization of the advantages of polymer bonded soft magnetics such as an almost totally free choice of shape, a very slow saturation at increasing current levels, and a high attenuation compared to other materials. In summary it can be concluded that polymer bonded soft magnetics will move further to the center of future developments not only of academic works but also of industrial applications and could be used in highly integrated power electronic systems.

Inhaltsverzeichnis

1	Einle	eitung		1	
2	Mot	Notivation			
3	Gru	ndlagen	n weichmagnetischer Werkstoffe, weichmagnetisch gefüllter Kunst-		
	stof	fe und	leistungselektronischer Filter	8	
	3.1	Magne	tismus im Festkörper	8	
		3.1.1	Magnetische Domänen	9	
		3.1.2	Magnetische Domänen in weichmagnetischen Partikel n $\ \ldots\ \ldots\ \ldots$	11	
		3.1.3	Magnetische Anisotropie	12	
		3.1.4	Die magnetische Hysterese	13	
		3.1.5	Die Methode des magnetischen Ersatzschaltbildes \hdots	15	
	3.2 Stand der Technik zu weichmagnetisch gefüllten Kunststoffen		17		
		3.2.1	Magnetische Eigenschaften und Anwendungen weichmagnetisch gefüll-		
			ter Kunststoffe	17	
		3.2.2	Permeabilität weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe	20	
		3.2.3	Leistungsverluste in weichmagnetischen Werkstoffen	25	
		3.2.4	Sättigungsmagnetisierung weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe $\ .$.	29	
	3.3	Packu	ngsdichten weichmagnetischer Partikel in einer polymeren Matrix $\ .$	30	
	3.4	Elektro	omagnetische Verträglichkeit leistungselektronischer Anwendungen $\ .$	32	
		3.4.1	Elektromagnetische Kopplung - eine prinzipbedingte Störung	32	
		3.4.2	EMV Filterentwurf	33	
		3.4.3	Filterauswahl	33	
		3.4.4	Dimensionierung der Filterkomponenten	35	
4	Exp	eriment	telles Vorgehen	39	
	4.1	Versuc	hsdurchführung	39	
	4.2	Verwei	ndete Kunststoffe	40	

	4.3	Verwe	ndete weichmagnetische Füllstoffe	42
		4.3.1	Weichmagnetische Eisen-Silicium Legierungen	43
		4.3.2	Nanokristalline Werkstoffe auf Basis von Eisen	44
		4.3.3	Weichmagnetische Ferrite	46
	4.4	Prozes	se der Probekörperherstellung	47
		4.4.1	Gewählte Compoundierverfahren	48
		4.4.2	Formgebende Fertigungsprozesse	50
	4.5	Messu	ng magnetischer Werkstoffparameter weichmagnetischer Probekörper	53
		4.5.1	Messung der Permeabilität	54
		4.5.2	Messung der Verlustleistungsdichte	55
		4.5.3	Messung der Sättigungsfeldstärke	58
5	Cha	rakteris	sierung weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe	60
	5.1	Analys	e der Partikelverteilung	60
		5.1.1	Füllstoffverteilung sphärischer Partikel	61
		5.1.2	Füllstoffverteilungen plättchenförmiger Partikel	62
	5.2	Perme	abilität weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe	64
		5.2.1	Abhängigkeit der Permeabilität von der Partikelgrößenverteilung	64
		5.2.2	Abhängigkeit der Permeabilität vom Füllwerkstoff	66
		5.2.3	Abhängigkeit der Permeabilität vom Füllgrad	69
		5.2.4	Abhängigkeit der Permeabilität von der Füllstofforientierung	71
		5.2.5	Frequenzverhalten der Permeabilität	74
		5.2.6	Alterungsbeständigkeit weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe	75
	5.3	Berech	nnungen zur Permeabilität - Ein elektrotechnischer Ansatz	80
	5.4	Berechnungen zur Permeabilität - Ein Ansatz mittels Modellwerkstoffen		
	5.5	5.5 $$ Berechnungen zur Permeabilität - Ein Ansatz für anisotrop a		
		plättcl	nenförmige Partikel	89
	5.6	Verlus	tleistung weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe	91
		5.6.1	Weichmagnetisch gefüllte Kunststoffe mit Vitroperm Füllstoff $\ .$.	93
		5.6.2	Weichmagnetisch gefüllte Kunststoffe mit Eisen-Silicium Füllstoff $% \mathcal{L}^{(n)}$.	95
		5.6.3	Weichmagnetisch gefüllte Kunststoffe mit Nickel-Zink-Ferrit Füllstoff	99
	5.7	Sättig	ungsflussdichte weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe	101
	5.8 Weichmagnetisch gefüllte Kunststoffe im Vergleich zu anderen W			102
		5.8.1	Permeabilität	102
		5.8.2	Die Sättigungsflussdichte	104
		5.8.3	Die Verlustleistungsdichte	106
	5.9	Ableit	ung des Applikationsfensters für weichmagnetisch gefüllte Kunststoffe	108

6	Anv	Anwendung weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe am Beispiel eines motorin-			
	tegrierten EMV-Filters				
	6.1	Aspekte der Dimensionierung	109		
	6.2	Bauraumeinschränkungen für weichmagnetisch gefüllte Kunststoffe	110		
	6.3	Der Bauraum des Demonstratorbauelementes	111		
	6.4	Magnetische Auslegung induktiver Bauelemente aus weichmagnetisch gefüll-			
		tem Kunststoff	113		
	6.5	Magnetische Auslegung des Demonstratorbauelementes	114		
	6.6	Mechanische Auslegung des induktiven Bauelementes	118		
	6.7	Thermisch Auslegung des induktiven Bauelementes	120		
	6.8	Elektrische Charakterisierung des Demonstratorbauelementes	122		
	6.9	Alternative Bauelemente	125		
7	Zus	ammenfassung	128		
8	Aus	blick und wissenschaftlicher Handlungsbedarf	130		
9	Lite	raturverzeichnis	132		
In	dex		138		
Ρι	ıblika	itionen	140		

Abbildungsverzeichnis

2.1	Leistungselektronik hoher Leistungsdichte	5
2.2	Folienkondensator als mechatronisch integrierbares Bauelement	6
2.3	Herkömmliche Aufbautechnologie induktiver Bauelemente	6
2.4	Permanenterregter Synchronmotor	7
3.1	Darstellung weissscher Bezirke	10
3.2	Darstellung möglicher Konfigurationen magnetischer Domänen	11
3.3	Kornstruktur eines Eisen-Silicium-Partikels	12
3.4	Darstellung einer Hysteresefunktion ferromagnetischer Werkstoffe $\ .\ .\ .$.	13
3.5	Darstellung einiger vorgestellter Permeabilitätsfunktion	15
3.6	Eigenschaften weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe	18
3.7	Messungen zu Vitroperm Partikeln	19
3.8	Rotor aus weichmagnetisch gefüllten Kunststoffen \hdots	20
3.9	Vergleich des Modells von Hashin und Shtrikman	21
3.10	Darstellung unterschiedlicher Modelle für die Berechnung der Permeabilität	25
3.11	Verlustmechanismen in weichmagnetischem Eisenblech	26
3.12	Schematische Darstellung der auftretenden Wirbelstromverluste $\ .\ .\ .$	27
3.13	Schematische Darstellung der Wirbelstromverläufe	28
3.14	Packungsdichte shpärischer Partikel	30
3.15	Poren in weichmagnetischen Eisen-Silicium-Partikeln	31
3.16	Darstellung zweier leistungselektronischer Anwendungen $\ldots \ldots \ldots \ldots$	33
3.17	Gewählte symmetrische π -Filtertopologie	35
3.18	Grenzfrequenz in Abhängigkeit zum Anteil des induktiven Bauelementes $% \mathcal{A}$.	37
3.19	Filterdämpfung	38
4.1	Versuchsplan zur Charakterisierung weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe .	40
4.2	Chemischer Aufbau des Polyamid	40
4.3	Eisen-Silicium-Partikel	43

4.4	Eigenschaften von Eisen-Silicium-Legierungen 4	4
4.5	TEM Bild der Struktur nanokristalliner Metalle 44	5
4.6	REM Bild der Partikel und gemessene Partikelgrößenverteilung 4	5
4.7	Nickel Zink Partikel und Oberflächenstruktur der Partikel 44	6
4.8	$Partikelgrößenverteilung \ unterschiedlicher \ Nickel-Zink-Ferrit \ Fraktionen \qquad . \qquad 4$	7
4.9	Verlauf der Kammertemperatur	8
4.10	Schematische Darstellung des Kunststoffpressprozesses 5	0
4.11	Schematische Darstellung des Spritzgießprozesses 5	1
4.12	Schematische Darstellung des Spritzgießwerkzeuges 55	3
4.13	Geometrische Parameter der Probe	5
4.14	Foto des Messplatzes und schematische Darstellung des gewählten Aufbaus 5	7
4.15	Messabweichungen	8
F 1	Unternalis lists Destilations of some of	- 1
5.1 5.9	Delymengebundene Figen Silicium Dertikel	1 0
0.Z	Polymergebundene Eisen-Sinclum-Fartikei	2
0.0 5 4	Anisetron suggerichtete Vitronome Dertikel	ა ი
0.4 5 5	Amsotrop ausgerichtete Vitroperm Partikel	э 4
5.5 5.6	Dermachilität hei unterschiedlichen Dertikelmößen der Niekel Zink Ferriter	4 5
5.0	Permeabilität bei unterschiedlichen Partikelgroben des Nickel-Zink-Fernten 6.	о 6
5.8	Vergleich des Medells von Agari und Une mit den gemessenen Werten 66	8
5.0	Permeebilität hei unterschiedlichen Pertikelwerketeffen	0
5.10	Permeabilität des weichmagnetisch gefüllter Kunststoffe 77	9 10
5.10	Permeabilität des Vitroperm Füllstoffes	1
5.12	Schamatische Darstellung des geometrischen Luftspaltahmessungen 7	1 0
5.12	Vektorkomponente a der als Funktion des normierten Badius 7	2
5.14	3 dB Granzfraquenz der Permesbilität hei unterschiedlichen Füllstoffen 7	2
5.15	Degradation der Permeabilität	т 5
5.16	Degradation der Permeabilität	6
5.17	Feuchteaufnahme des Eisen-Silicium gefüllten Kunststoffes 7	7
5.18	Degradation des Vitroperm gefüllten Kunststoffes bei HHS	8
5.19	Degradation der Permeabilität des Eisen-Silicium gefüllten Kunststoffes 7	9
5 20	Degradation des Nickel-Zink-Ferrit gefüllten Kunststoffes bei HHS	9
5.21	Modellhafte Beschreibung eines zu 50 vol % gefüllten Ringkernes	0
5.22	Modellhafte Beschreibung eines zu 50 vol.% gefüllten Ringkernes 8	1
5.23	Darstellung der beschriebenen Modelle	2
5.24	Modellhafte Beschreibung eines zu ca. 50 vol.% gefüllten Ringkernes 8	3

5.25	Messwerte sowie Darstellung des beschriebenen Modells	84
5.26	Berechnete k-Werte	85
5.27	Vergleich zum vorgestellten Modell	86
5.28	Modellwerkstoff bestehend aus kubischen Partikeln in einer Matrix. \ldots .	86
5.29	Messwerte sowie Modelldarstellung	89
5.30	Schematische Darstellung einer parallelen Anordnung	89
5.31	Messwerte sowie Darstellung der aus dem Modell hervorgehenden Funktion	91
5.32	Verlustleistungsdichte des Vitroperm Ausgangswerkstoffes	92
5.33	Verlustleistungsdichte Vitroperm gefüllter Kunststoffe	93
5.34	Flussdichteverteilung bei zwei unterschiedlichen Anordnungen der Partikel	95
5.35	Verlustleistungsdichte Eisen-Silicium	96
5.36	Spezifischer elektrischer Widerstand Eisen-Silicium gefüllter Kunststoffe $.$.	97
5.37	Simulationsergebnisse zur Flussdichteverteilung	98
5.38	Vergleich zweier unterschiedlicher Kunststoff compounds	99
5.39	Verlustleistungsdichte Nickel-Zink-Ferrit	100
5.40	Permeabilitäten verschiedener weichmagnetischer Werkstoffe $\ .\ .\ .\ .$	102
5.41	Vergleich unterschiedlicher Leistungsdrossel n \hdots	103
5.42	Sättigungsflussdichten verschiedener weichmagnetischer Werkstoffe \ldots .	105
5.43	Vergleich verschiedener weichmagnetischer Werkstoffe \hdots	106
5.44	Verlustleistungsdichten verschiedener weichmagnetischer Werkstoffe $\ .\ .\ .$	107
6.1	Kunststoffpressteil links: mit unvollständiger Füllung rechts: ohne Fehlstelle	111
6.2	Der Bauraum für das beispielhaft vorgestellte Bauelement $\ \ldots \ldots \ldots \ldots$	112
6.3	Beispiel für eine mögliche Wicklung	114
6.4	Unterschiedliche untersuchte Wicklungsgeometrien	115
6.5	Aufteilung der vom magnetischen Fluss durchsetzten Flächen. \ldots .	115
6.6	Simulierte Induktivitätswerte für optimierte Wicklungsgeometrien	116
6.7	Simulierte Flussdichtewerte für beide untersuchte Wicklungsgeometrien	117
6.8	Gewählte Wicklungsgeometrie	119
6.9	Wicklung eingelegt in Kunststoffpresswerkzeug	120
6.10	Simulations geometrie für thermische Simulationen \ldots	121
6.11	Simulationsergebnisse der thermischen Simulationen	122
6.12	Messergebnisse für zwei der vorgestellten induktiven Bauelemente $\ \ldots \ \ldots$	123
6.13	Messergebnisse für zwei der vorgestellten induktiven Bauelemente $\ \ldots \ \ldots$	124
6.14	Geometrische und magnetische Luftspaltlänge \hdots	125
6.15	Sättigungsverhalten alternativer Bauelementedesigns	126
6.16	Abmessungen alternativer Kerngeometrien	127

Abkürzungsverzeichnis

μ_0	magnetische Feldkonstante $\mu_0 = 4\pi\cdot 10^{-7}~{\rm VsA^{-1}m^{-1}}$
μ_p	relative magnetische Permeabilität der Kunststoffmatrix
μ_{ξ}	relative magnetische Permeabilität des Füllstoffes
Φ	magnetischer Fluss in Vs
ρ	spezifischer elektrischer Widerstand in Ωm
$\rho_{\rm Compound}$	spezifischer elektrischer Widerstand des Kunststoffcompounds
ρ_{Partikel}	spezifischer elektrischer Widerstand des Füllstoffes
A _m	effektive magnetische Fläche in mm^2
B _s	Sättigungsflussdichte in T
B _{max}	Maximalwert der magnetischen Flussdichte bei sinusförmigem Fluss-
	dichteverlauf
l _m	effektive magnetische Länge in mm
R _m	magnetischer Widerstand in AV ⁻¹ s ⁻¹
$U_m \ \ldots \ldots \ldots$	magnetische Spannung in A
V _C	Volumen des kapazitiven Bauelementes in $\rm cm^3$
$V_{\rm L} \ \ldots \ldots \ldots$	Volumen des induktiven Bauelementes in cm^3
ξ	volumenbezogener Füllgrad des Füllstoffes im Matrixwerkstoff
В	magnetische Flussdichte in T $(1 \text{ T} = 1 \text{ Vsm}^{-2})$
С	Kapazität in F $(1 \text{ F}=1 \text{ AsV}^{-1})$
f	Frequenz in Hz $(1 \text{ Hz}=1 \text{ s}^{-1})$
f ₀	Grenzfrequenz in Hz
Н	magnetische Feldstärke in Am ⁻¹
L	Induktivität in H $(1 \text{ H}=1 \text{ VsA}^{-1})$
Ρ	elektrische Leistung in W
V	Volumen in mm ³
W	elektrische Energie in Ws