

BMBF-Verbundprojekt VISA

Abschlussbericht

Zuwendungsempfänger: VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG Grüner Weg 37 D – 63450 Hanau	Förderkennzeichen: 13N9696
Titel des Vorhabens: Verbundprojekt: „Vollintegrierte leistungselektronische Systeme in der Automobilelektronik“ (VISA) – Teilvorhaben: Integrierbare Materialsysteme	
Projektleiter: Dr. Gernot Vaerst	Tel.: 06181/382370
Laufzeit des Vorhabens: von: 01.05.2008 bis: 30.04.2011	

Inhalt

1. Kurze Darstellung	3
1.1. <i>Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technische Ziele</i>	3
1.2. <i>Voraussetzungen für das Vorhaben</i>	3
1.3. <i>Planung und Ablauf des Vorhabens</i>	4
1.4. <i>Wissenschaftlich-technischer Stand</i>	5
2. Eingehende Darstellung	7
2.1. <i>Verwendung der Zuwendungen</i>	7
2.2. <i>Wissenschaftlich und technische Ergebnisverwertung</i>	7
2.3. <i>Veröffentlichungen</i>	8
2.4. <i>Detaillierte Darstellung</i>	9
2.4.1 Einfluss der untersuchten Formgebungs- und Strukturierungsmethoden auf	9
Induktivität und Güte.....	9
2.4.2 Einfluss der Hystereseschleifenform („F“-Schleife, „R“- Schleife) auf.....	11
Induktivität und Güte.....	11
2.4.3 Ringbandkerne (RBK) mit geringer Kernhöhe (1 bis 1.5mm) zur Einbettung in	12
die Leiterplatte	12
2.5. <i>Zusammenfassung:</i>	18
2.6 <i>Literaturverzeichnis:</i>	19

1. Kurze Darstellung

1.1. Aufgabenstellung und wissenschaftlich-technische Ziele

Das Ziel der VACUUMSCHMELZE innerhalb des Verbundforschungsvorhabens war es, unter Verarbeitungs-, Umgebungs- und Einsatzbedingungen optimierte weichmagnetische, metallische Werkstoffe und/oder Teile der geforderten Funktionalität bereitzustellen. Um dies zu erreichen, sollten die Eigenschaften (z.B. Permeabilität, Verluste, Güte, Temperaturbeständigkeit), verschiedene Materialklassen (i.b. amorphe und nanokristalline Werkstoffe) und deren werkstofftechnische Optimierungsmöglichkeiten (wie Legierungsvariation, thermische Behandlung u.a.) untersucht werden. In diese Untersuchungen mussten insbesondere auch die typischen Gegebenheiten wie sie z.B. aus der Bauform und Geometrie typischer planarer Induktivitäten resultieren, einfließen und optimiert werden. Ein weiteres Ziel war die Bereitstellung geeigneter Weiterverarbeitungstechnologien des in Bandform anfallenden Halbzeuges zur Herstellung magnetischer Lagen bzw. Pakete und deren Integration in der Leiterplatte.

Konkrete Aufgaben waren:

- Materialentwicklung für in Leiterplatten integrierbare Induktivitäten aus amorphen bzw. nanokristallinen Materialien.
- Anpassung der magnetischen Eigenschaften an die Induktivitätsanforderungen durch gezielte Einstellung der Anisotropie.
- Entwicklung von Formgebungs- und Strukturierungstechnologien für amorphe bzw. nanokristalline Materialien.
- Charakterisierung und Optimierung des für die geforderten Induktivitäten notwendigen Materials hinsichtlich Design und magnetischen Eigenschaften (geringe Ummagnetisierungsverluste, hohe Güte > 20 und Frequenzbereich (0,5...10)MHz).

Alle oben genannten Entwicklungsschritte mussten unter Berücksichtigung der Anforderungen der Leiterplattenhersteller durchgeführt werden (Gestaltung einer Schnittstelle zwischen Material und Leiterplatte), um die Integration des VAC Materials in Form einer Induktivität in die Leiterplatte zu realisieren.

1.2. Voraussetzungen für das Vorhaben

Zur Realisierung des Projektes konnten wir auf die in der Tabelle 1 aufgeführte Materialbasis zurückgreifen.

	Sättigungs- magnetisierung	Permeabilität	Bearbeitung nach WB	Anwendungs- temperatur	Alterungs- beständigkeit
VITROVAC (amorph) VC 6025 I50	niedrig	hoch	sehr gut	≤ 80°C	?
VITROVAC (amorph) VC 6155 U55	hoch	niedrig	sehr gut	≤ 120°C	besser
VITROPERM (nanokristallin) VP 800	hoch	hoch	spröde, nicht bearbeitbar! Nach Beschichtung mit Folien, bzw. Klebeband schneid- oder stanzbar.	≤ 200°C	sehr gut

Tabelle 1: Auflistung der zu untersuchenden Materialien

1.3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Materialbasis bereitstellen:

- Standardlegierungen:
 - des VAC Lieferprogramms
- neue Legierungen:
 - vorerst auf bestehende Legierungsvarianten zurückgreifen
 - im Weiteren Untersuchung alternativer Legierungsvarianten.

Modifikation der Materialeigenschaften durch Magnetfeld-Wärmebehandlung:

- Aufbau einer Durchlaufglühanlage zur Halbzeugherstellung
- Weiterentwicklung der Wärmebehandlung in Richtung
 - Verlustreduktion
 - Isotropie der Eigenschaften
 - Alterungsbeständigkeit (z.B. über nanokristallinen Zustand).

Formgebungs- und Strukturierungsmöglichkeiten

- Ablängen, Ätzen, Erodieren, Wasserstrahlschneiden, Laserschneiden, Stanzen, etc.)
- Klebe- und Isolierungstechnologien (Beschichten) für Paketherstellung.

Messanordnungen zur Charakterisierung der amorphen und nanokristallinen Streifen

- Aufbau der nötigen Meßtechnik (jeweils als Funktion der Frequenz)
- Impedanzmessung mit Messbrücke
- B(H) Messung
- Verlustmessung
- Domänenuntersuchungen mit „Kerr“-Mikroskop.

Probenherstellung

- Orientierende Versuche wie zum Beispiel:
 - Abgelängte Streifen verschiedener Geometrien und magnetischer Anisotropierichtungen
 - geklebte Pakete
 - offene/geschlossene Systeme; Systeme mit Luftspalt
 - Systematische Untersuchung und gegebenenfalls Optimierung der Eigenschaften in Abhängigkeit von:
 - Geometrie und Bauform wie
 - Größe (Entmagnetisierung und „downsizing“ Effekte), Pakethöhe, Isolation, Spulenanordnung, Luftspalt, kundenspezifischen Anordnungen etc.
 - Legierung bzw. Magnetqualität.

Berücksichtigung und Umsetzung kundenspezifischer Forderungen zu Weiterverarbeitung und Handling

- Verlegen und Verkleben der Streifen und Pakete.

1.4. Wissenschaftlich-technischer Stand

Magnetwerkstoffe für integrierte Induktivitäten

Während bei Fraunhofer IZM FPC-Materialien (Ferrite Polymer Compound) untersucht und weiterentwickelt werden sollen, beabsichtigt die VACUUMSCHMELZE entsprechende Untersuchungen für metallische, weichmagnetische Werkstoffe.

Bei den metallischen weichmagnetischen Werkstoffen sind vor allem amorphe und nanokristalline Werkstoffe sehr vielversprechende Kandidaten für integrierbare, planare Induktivitäten. Diese relativ jungen Werkstoffe wurden in den vergangenen Jahrzehnten zur Marktreife entwickelt und finden eine stetig wachsende Anwendung, sowohl in hochwertigen Magnetkernen und magnetischen Bauelementen, als auch in Abschirmungen, Antennen und verschiedensten magnetischen Sensoren. Die Grundlagenentwicklung hierzu fand auch im Rahmen einer Reihe von öffentlichen Förderprojekten statt (cf. BMFT Förderkennzeichen 01ZD048A, 03ZD0121 für amorphe Werkstoffe sowie BMFT Förderkennzeichen 03N1008 und BMBF Förderkennzeichen 03M5010 für nanokristalline Metalle). Gegenüber anderen weichmagnetischen, metallischen Spitzenwerkstoffen weisen amorphe und nanokristalline Metallfolien aufgrund ihres relativ hohen spezifischen elektrischen Widerstandes (typischerweise (100...150) $\mu\Omega\text{cm}$) und ihrer herstellbedingten geringen Banddicke um 20 μm gute Hochfrequenzeigenschaften und geringe Verluste auf. So konkurrieren Ringbandkerne aus diesen Werkstoffen sowohl technisch als auch aufgrund ihrer deutlich geringeren Baugröße unter Kosten/Nutzengesichtspunkten mit weichmagnetischen MnZn-Ferriten. Ein weiterer Vorteil der genannten Metallfolien ist die Kombination von mechanischer Flexibilität und guten weichmagnetischen Eigenschaften. Dabei weisen die nanokristallinen, weichmagnetischen Werkstoffe unter allen weichmagnetischen

Spitzenmaterialien die mit Abstand beste Alterungsstabilität der weichmagnetischen Eigenschaften auf. Für einen detaillierteren Einblick sei auf die im Literaturverzeichnis genannten Arbeiten verwiesen. Die Optimierung der weichmagnetischen Eigenschaften über Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlung von amorphen und nanokristallinen Metallen hat sich in der Vergangenheit primär auf Ringbandkerne konzentriert, wobei Anwendungsfrequenzen von 50 Hz bis ca. 1MHz den Schwerpunkt bildeten. Obwohl auf die hierbei gewonnenen Erkenntnisse vielfach zurückgegriffen werden kann, erfordert die Optimierung des Materials für Planarinduktivitäten noch umfangreiche systematische Untersuchungen, welche aus der Bauform und Geometrie als auch aus den Anforderungen resultieren. Diese reichen von der Korrelation zwischen Werkstoffeigenschaften und Anforderungen in der Anwendung, der Optimierung der Magneteigenschaften insbesondere bei höheren Frequenzen bis zur Entwicklung alternativer Wärmebehandlungstechnologien und der Bereitstellung geeigneter Weiterverarbeitungstechnologien des in Bandform anfallenden Halbzeuges zur Herstellung magnetischer Lagen bzw. Pakete und deren Integration in der Leiterplatte.

1.5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

In Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern wurden folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Tests zur Verpressbarkeit amorpher und nanokristalliner Materialien in Zusammenarbeit mit Schweizer Electronic AG
- Untersuchungen zum Ätzverhalten amorpher und nanokristalliner Materialien in Zusammenarbeit mit Schweizer Electronic AG
- Untersuchungen zur Laserstrukturierung in Zusammenarbeit mit Philips
- Verifizierung der Güteerhöhung durch innere Strukturierung bei Fa. Philips an von VAC bereitgestellten Mustern (VP 800R)
- Bereitstellung von Material der Legierung VP 800 und VP 400 in verschiedenen Geometrien (rechteckige Plättchen, ringförmige Plättchen, gestapelte ringförmige Plättchen), um integrierte Induktivitäten aufzubauen (ISEA, Philips und Schweizer Electronic AG)
- Bereitstellung von Ringbandkernen aus VC 6155 F (Continental und Schweizer Electronic AG)
- Bereitstellung von Ringbandkernen aus nanokristallinem VP 800 F (Continental und Schweizer Electronic AG)
- Untersuchungen magnetischer Domänen am IFW Dresden
- Untersuchung des Ätzverhaltens von nanokristallinen und amorphen Materialien am Fraunhofer Institut PYCO in Teltow.

2. Eingehende Darstellung

2.1. Verwendung der Zuwendungen

- Pos. 0813 Material: € 34.717,90:

Messgeräte und Verbrauchsmaterial zur Messung der Hochtemperatureigenschaften an nanokristallinen Materialien, Verbrauchsmaterial zur Bandherstellung, Rohstoffe für Legierungen.

Ergebnisse: VP 800 zeigt bis 250°C Anwendungstemperatur hervorragende weichmagnetische Eigenschaften, Herstellung von Legierungsvarianten amorpher und nanokristalliner Materialien.

- Pos. 0823 F&E Fremdleistung: € 11.620,00:

Kerrmikroskopische Untersuchungen am IFW Dresden, Untersuchung des Ätzverhaltens am Fraunhofer Institut PYCO.

Ergebnisse: Grundlegende Untersuchungen zur Domänenstruktur an amorphen und nanokristallinen Werkstoffen, Untersuchung von Strukturierungsmethoden (z.B. Ätzverhalten).

- Pos. 0837 Personalkosten: € 379.295,12.

- Pos. 0838 Reisekosten: € 7.604,11

- Pos. 0847 Vorhabensspezifische Anlagen: € 60.118,35:

Anschaffung eines Kerrmikroskopes.

Ergebnisse: Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Strukturierungsmethoden auf die Domänenweite und damit auf die Verlusteigenschaften amorpher und nanokristalliner Werkstoffe. Charakterisierung und Darstellung der Ausrichtung des Magnetisierungsvektors in die „magnetisch leichte Richtung“ nach unterschiedlichen Magnetfeldwärmebehandlungen.

Der Aufwand war notwendig, um die dargestellten Ergebnisse erzielen zu können.

2. 2. Wissenschaftlich und technische Ergebnisverwertung

Mit dem Erwerb des Kerr-Mikroskopes eröffnet sich uns ein weiterer technologischer Nutzen im Hinblick auf die Charakterisierung nanokristalliner Werkstoffe. Insbesondere bietet sich hier die Möglichkeit der Darstellung von magnetischen Domänen, um damit vertiefende Erkenntnisse über Verlustmechanismen zu erzielen.

Eine wesentliche Erkenntnis unserer Arbeiten bestand darin, durch Formgebung und innere Strukturierung (schlitzen des Materiales; z.B. Laserstrukturierung) nanokristalline Materialien so zu bearbeiten, dass die dabei entstehende Verfeinerung der magnetischen Domänen eine deutliche Verringerung der Ummagnetisierungsverluste zur Folge hatte. Damit haben wir die Möglichkeit künftig planare Induktivitäten mit hoher Güte am Markt anzubieten.

Die vollständige Integration von Induktivitäten verlangt eine deutliche Reduzierung der Bauhöhe. Im Rahmen des Projektes war es daher notwendig Ring-Band-Kerne (RBK) mit geringer Kernhöhe (ca. 1mm) herzustellen. Im Gegensatz zu herkömmlichen Fertigungsprozessen von RBK, bei denen die Wärmebehandlung am fertig gewickelten Kern erfolgt, mußten hier vollkommen neue Fertigungswege gefunden werden. Ein wesentlicher in die Serienproduktion integrierbarer Technologieschritt ist dabei die Wärmebehandlung von VITROPERM[®] Band unter Zugspannung. Dadurch ist es leicht möglich, die zur Realisierung hoher Schaltfrequenzen notwendigen niedrigen Permeabilitäten ($\mu < 1.000$) einzustellen.

2. 3. Veröffentlichungen

- Christian Polak, Gernot Vaerst, Giselher Herzer
“Soft magnetic nanocrystalline materials for PCB embedded inductors – optimisation for high frequency application”
Soft Magnetic Materials 2011 - SMM20, Greece, Sept. 2011
- Vaerst, G., Polak, Ch.:
„Optimierung nanokristalliner weichmagnetischer Werkstoffe zur Leiterplattenintegration“
MicroCar 2011, Workshop 4, Leipzig, 01. März 2011
- Gernot Vaerst,
„Automobile Electronics – A Competitive Edge for Today and Tomorrow“,
Elektronik Praxis, 11/2010
- Thomas Hofmann, Gernot Vaerst, Alexander Neumann, Johann-Peter Sommer, Andreas Ostmann, Martin Christoph, Christoph Loef,
„Vollintegrierte leistungselektronische Systeme in der Automobilindustrie“
Systemintegration in der Mikroelektronik, SMT Tutorial 16, Nürnberg, 08. -10. Juni 2010
- Gernot Vaerst,
"Integrierte Induktivitäten",
Design & Elektronik 07/2009, S. 29 – 31
- Gernot Vaerst
„BMBF – Forschungsprojekt VISA“
Firmenzeitschrift der VACUUMSCHMELZE, VAC Umschau 3/2008, S. 4 – 5

2. 4. Detaillierte Darstellung

2.4.1 Einfluss der untersuchten Formgebungs- und Strukturierungsmethoden auf Induktivität und Güte

- Unterschiede verschiedener Formgebungs- u. Strukturierungsverfahren sind Vernachlässigbar
- Q-Switch-Laser geringfügig geeigneter als CO₂ Laser
- Güte der Fe-Basis-Legierung höher als bei der Co-Basis-Legierung
- Die durch das Laserschneiden hervorgerufenen Schneiddefekte auf die Güte sind vernachlässigbar.

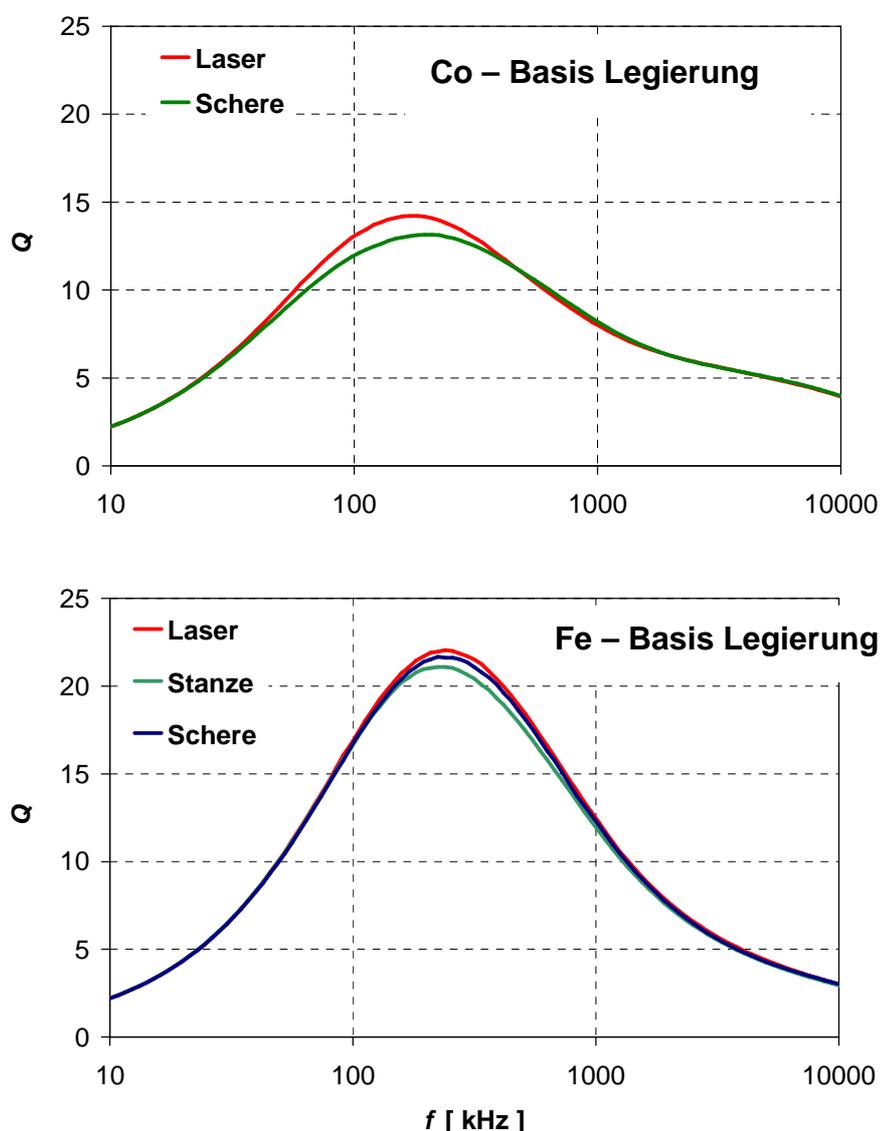


Abb. 1: Unterschiede der verschiedenen Formgebungsverfahren sind hinsichtlich ihres Einflusses auf die Induktivität (L_s) und Güte (Q) (Güte hier in den Abbildungen gezeigt) für Fe-Basis Materialien (Abb.1 unten), als auch für Co-Basis Materialien (Abb.1 oben) nicht erkennbar. Im direkten Vergleich (identische Probengeometrie) können mit Fe-Basis-Legierungen (Abb.1 unten) höhere Güten als mit Co-Basis-Legierungen (Abb.1 oben) erzielt werden. Der Einfluss der Schneidmethode auf die Güte ist vernachlässigbar.

Zur Untersuchung bzw. zur Visualisierung magnetischer Domänen wurde im Rahmen des Projektes ein Kerrmikroskop angeschafft. Die damit sichtbar gemachten Domänenstrukturen stellen direkte Abbildungen der lokalen Einflüsse von:

- Probengeometrie, inhomogener Magnetisierung (Ecken, Kanten)
- Anisotropie
- Strukturierung und Oberfläche

auf die magnetischen Eigenschaften dar.

Mit dieser Methode konnte der Einfluß der Strukturierung (mechanisches Schneiden, Laserschneiden, Ätzen usw.) auf die magnetischen Eigenschaften über das direkte Abbild der Domänenstrukturveränderung untersucht werden. Auch hier stellte sich heraus, daß der Einfluss auf die Güte vernachlässigbar ist.



Abb. 2: Kerrmikroskop in der Abteilung HT-E R (VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG)

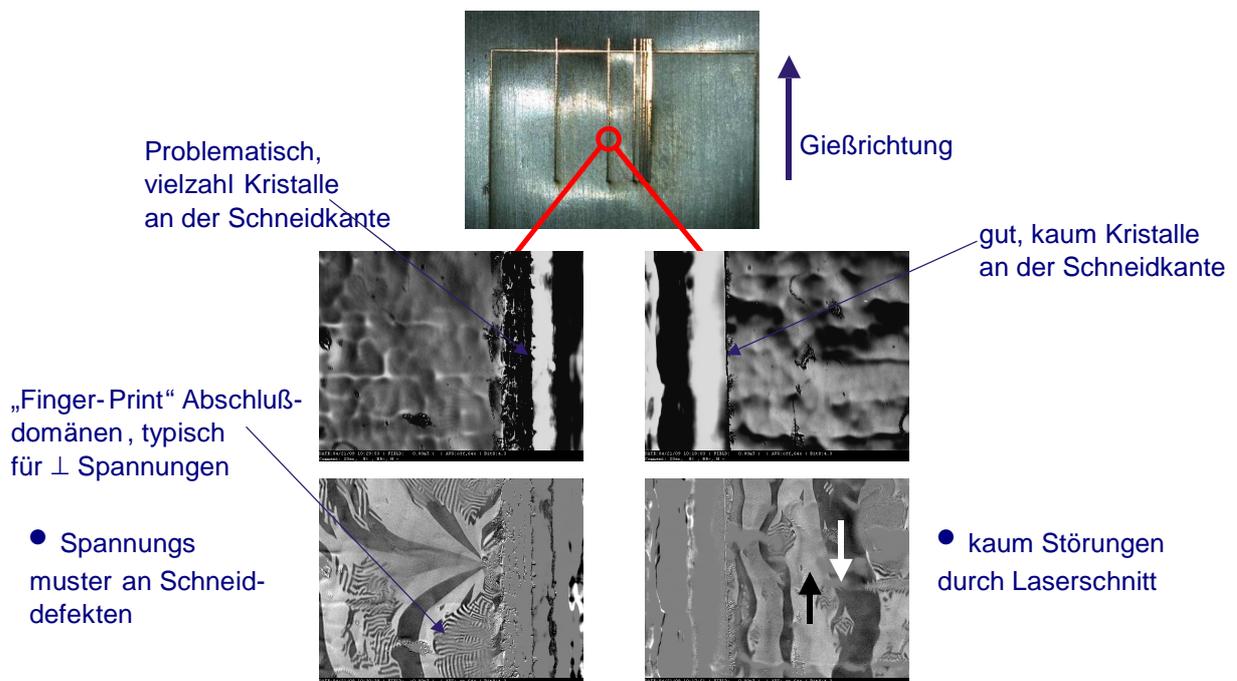


Abb. 3: Untersuchung des Einflusses von Schneiddefekten auf die magnetischen Eigenschaften mit Hilfe der Kerrmikroskopie. Der Einfluß von Schneiddefekten auf die Güte ist daher vernachlässigbar (Eindringtiefe nur wenige μm).

2.4.2 Einfluss der Hystereseschleifenform („F“-Schleife, „R“- Schleife) auf Induktivität und Güte

Es wurden Co-Basislegierungen (VC 6025, VC 6155) und nanokristalline Fe-Basislegierungen (VP 800) untersucht. Es zeigte sich, daß nanokristalline Fe-Basislegierungen mit „R“-Schleifenformen gegenüber „F“- Schleifenformen bessere weichmagnetische Eigenschaften (Güte, Induktivität bei $f > 100$ kHz) aufweisen. Die Gütewerte gemessen an Proben mit „F“-Schleifenform blieben durchweg unter 15, während man an Proben mit „R“-Schleifenform Gütewerte bis 28 feststellt, wobei das Gütemaximum zu höheren Frequenzen verschoben wird. Es ist zu erwähnen, daß sich die Güte nach dem Bekleben der Proben mit doppelseitigem Klebeband nicht ändert.

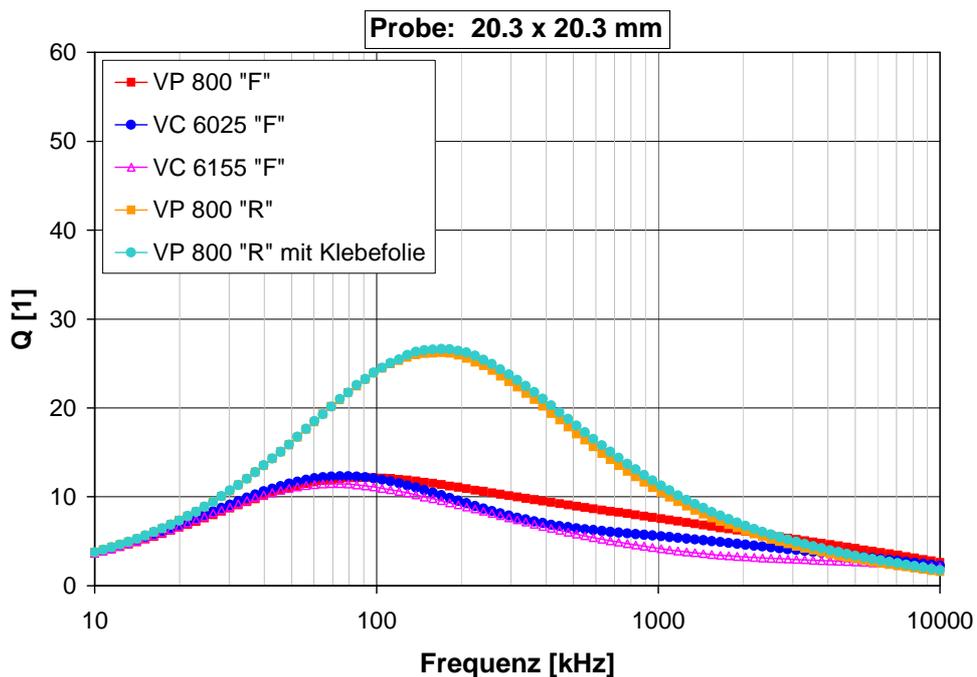


Abb. 4: Einfluss der Hystereseschleifenformen „F“ und „R“ auf die Güte. Der Vergleich zeigt, daß die Güte gemessen an Proben mit „R“- Schleifenform höher ist als bei solchen mit „F“- Schleifenform. Das Maximum wird zu höheren Frequenzen hin verschoben.

2.4.3 Ringbandkerne (RBK) mit geringer Kernhöhe (1 bis 1.5mm) zur Einbettung in die Leiterplatte

Auch RBK, d.h. geschlossene magnetische Kreise wurden im Rahmen des AP4 den Projektparten (Continental und Schweizer Elektronik AG) zur Verfügung gestellt. Diese Kerne wurden in Leiterplatten eingebettet und als Induktivität verwendet. Der Einsatz von RBK mit einer Kernhöhe (=Bandbreite) von 1mm aus dem amorphen Material VC 6155 „F“ war sehr erfolgreich. Die Ringbandkerne (RBK) wiesen Permeabilitäten (μ) von ca. 1.800 auf und wurden in verschiedenen Kernabmessungen bereitgestellt.

MUSTERMATERIAL - KERNE: VC 6155 „F“

D ... Außen-Durchmesser

d ... Innendurchmesser

h ... Höhe des Kerns

Material: VITROVAC VC 6155 „F“; $\mu = 1800$

Spule 10:	D = 11.3mm; d = 7mm; h = 1mm	50 Stück
Spule 11:	D = 11.6mm; d = 6.3mm; h = 1mm	50 Stück
Spule 12:	D = 11.6mm; d = 6.3mm; h = 1mm	50 Stück
Spule 13:	D = 21.5mm; d = 16.5mm; h = 1mm	50 Stück
Spule 14:	D = 19.4mm; d = 13mm; h = 1mm	50 Stück
Spule 15:	D = 51.5mm; d = 25mm; h = 1.5mm	50 Stück
Spule 16:	D = 50mm; d = 14.5mm; h = 1.5mm	50 Stück
Spule 17 + 18:	D = 21.5mm; d = 12.3mm; h = 1.5mm	50 + 50 Stück
Spule 19 + 20:	D = 15.7mm; d = 8mm; h = 1.5mm	50 + 50 Stück
Spule 21:	D = 35.9mm; d = 11.6mm; h = 1.5mm	50 Stück
Spule 22:	D = 24.4mm; d = 9.8mm; h = 1.5mm	50 Stück
zusätzlich:		
Spule 13:	D = 21.5mm; d = 16.5mm; h = 1.5mm	50 Stück
Spule 19:	D = 15.7mm; d = 8mm; h = 1mm	50 Stück
neue Bestellung (24.11.2010):		
Spule 16:	D = 9.0mm; d = 4.0mm; h = 1mm	50 Stück

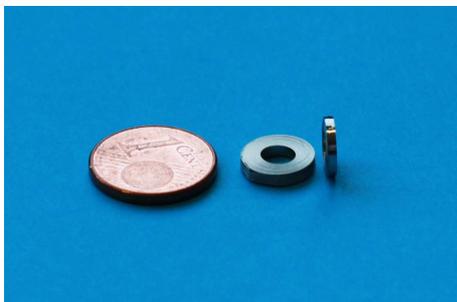


Abb. 5: Ringbandkerne aus dem amorphen Material VC 6155 „F“ in verschiedenen Kerndimensionen, hergestellt aus im Durchlauf wärmebehandeltem Halbzeug.

Für die Herstellung von Ringbandkernen wurden neue Fertigungswege aufgebaut. Die Kerne wurden von Schweizer Elektronik AG in die Leiterplatte integriert.

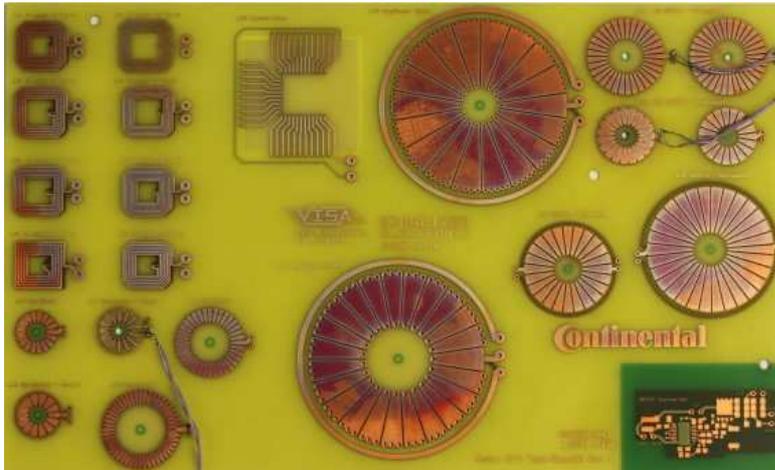


Abb. 6: In eine Leiterplatte vollständig integrierte Ringbandkerne unterschiedlicher Dimension.

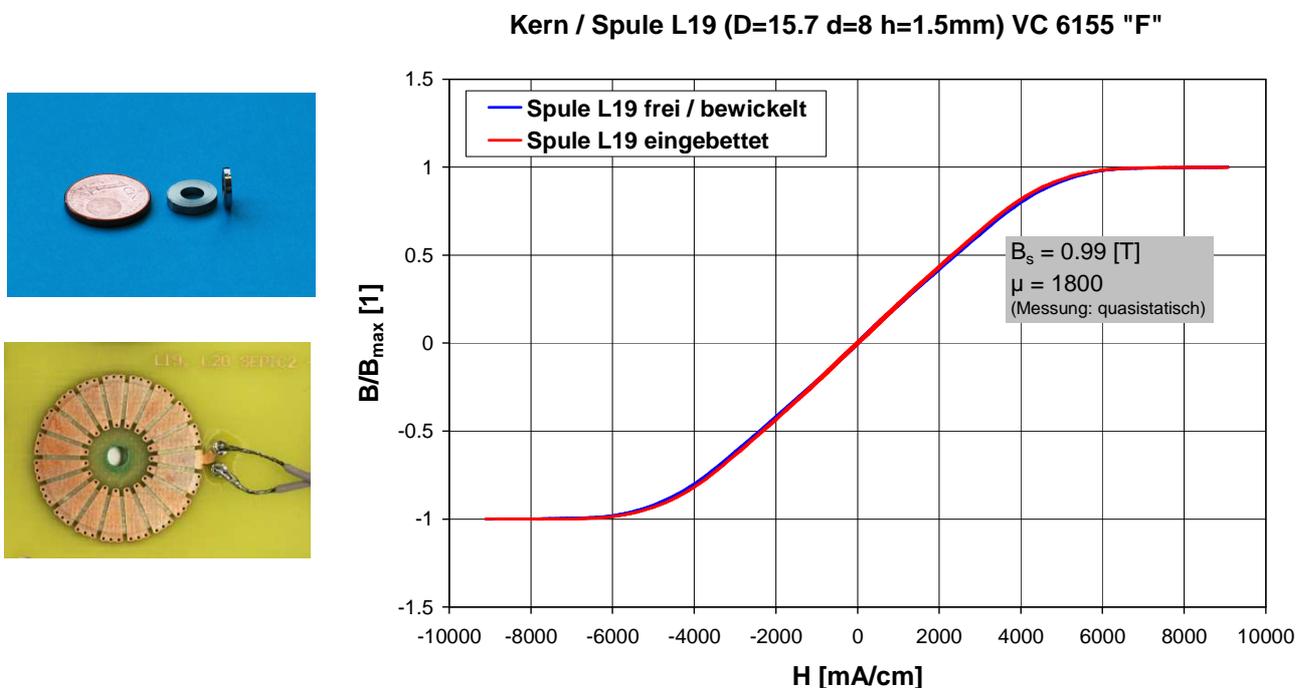


Abb. 7: Hystereseschleife eines Ringbandkernes mit der Permeabilität von $\mu = 1.800$ aus VC 6155 „F“ vor und nach der Einbettung in die Leiterplatte (gemessen bei $f < 0.1\text{Hz}$).

Auf Grund der sehr geringen Sättigungsmagnetostraktion der amorphen Legierung VC 6155 „F“ bleiben die magnetischen Eigenschaften im eingebetteten Zustand unverändert. Die Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Hystereseschleife vor und nach der Einbettung. Es sind keine Abweichungen nachweisbar. Damit ist nachgewiesen, dass amorphes VITROVAC Material als Ringbandkern und als planare Induktivität in die Leiterplatte eingebettet werden kann und grundsätzlich die gewünschten magnetischen Eigenschaften erhalten bleiben.

Wie in Tabelle 1 gezeigt übertreffen die Werkstoffeigenschaften von nanokristallinem VITROPERM[®] die von VITROVAC[®] Materialien hinsichtlich Sättigungsmagnetisierung, Verlusten, Temperaturverhalten und Alterungsbeständigkeit. Daher zielten die weiterführenden Arbeiten auf die Herstellung nanokristalliner Ringbandkerne mit geringer Bauhöhe und niedriger Permeabilität ab. Die im Rahmen des Projektes geforderte Miniaturisierung bei gleichzeitiger Erhöhung der Leistungsübertragung kann nur mit einer Erhöhung der Übertragungsfrequenz erreicht werden. Das bedeutet für das Material, dass mit steigender Frequenz die Ummagnetisierungsverluste gering bleiben müssen. Dafür muss die DC Permeabilität des Materials deutlich reduziert werden, um die Wirbelstromgrenzfrequenz nach oben zu verschieben, wie folgende Gleichung beschreibt.

$$f_g = \frac{4}{\pi} \frac{\rho_{el}}{\mu_0 \mu_{DC} d^2}$$

Hierin beschreibt ρ_{el} den spezifischen elektrischen Widerstand, d die Banddicke, μ_{DC} die DC-Permeabilität des nanokristallinen Materials.

Derzeitiger Stand der Technik ist es, hochpermeable Ringbandkerne mit Permeabilitätsniveaus um 100.000 herzustellen. Die dazu notwendigen Fertigungstechnologien werden beherrscht. Siehe dazu Abbildung 8.

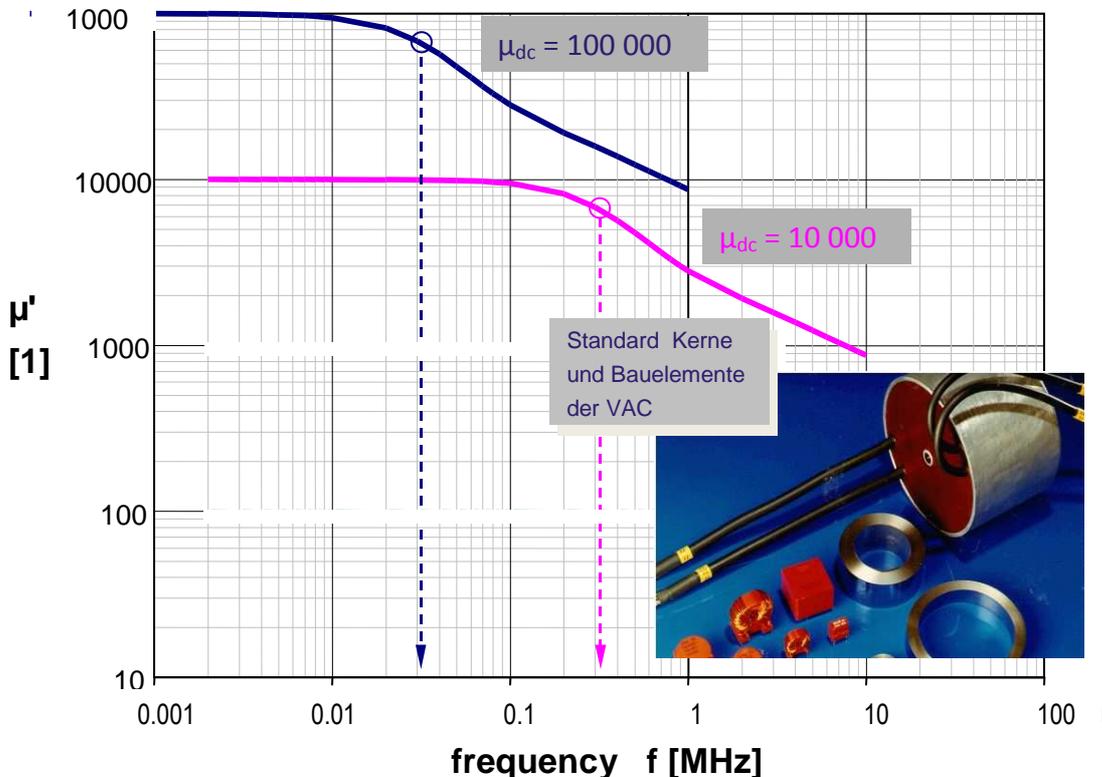


Abb. 8: Standard Kerne und Bauelemente der VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG mit typischen Permeabilitätsniveaus von 10.000 bis 100.000.

Damit bleiben Anwendungen im Frequenzbereich oberhalb von 500 kHz verschlossen. Durch das Absenken der Permeabilität lässt sich die Wirbelstromgrenzfrequenz f_g zu höheren Frequenzen hin verschieben. Dazu waren jedoch neuartige Fertigungstechnologien (Durchlaufglühanlagen) notwendig. Die Abbildung 9 zeigt die erreichbaren Frequenzbereiche bei entsprechender Reduktion der Permeabilität. So verschiebt sich z.B. die Wirbelstromgrenzfrequenz von 500 kHz auf 33 MHz bei einer Absenkung des Permeabilitätsniveaus von 10.000 auf 100.

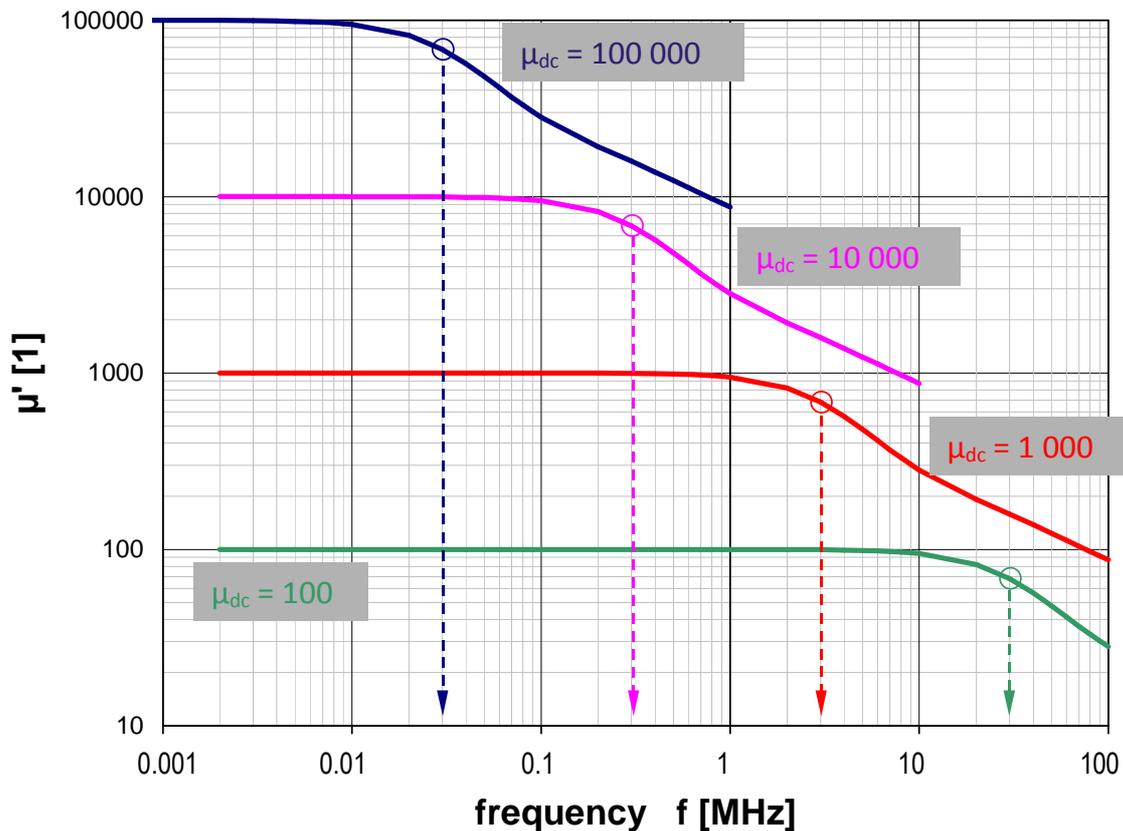


Abb. 9: Absenkung des Permeabilitätsniveaus führt zu einer Verschiebung der Wirbelstromgrenzfrequenz zu höheren Frequenzen.

Im Unterschied zum Standardfertigungsweg für nanokristalline Ringbandkerne, bei denen die magnetische Schlussglühung am Kern erfolgt, wird das weichmagnetische Band in einer Durchlaufglühanlage unter hoher axialer Zugspannung in den nanokristallinen Zustand überführt. Die dazu notwendigen Fertigungsschritte wurden dafür neu konzipiert.

Auch für die Herstellung nanokristalliner Ringbandkerne mit geringer Bauhöhe mussten neue Fertigungswege aufgebaut werden.

In der Abbildung 10 werden Hystereseschleifen unterschiedlicher Permeabilitätsniveaus ($\mu=2.000$, $\mu=1.000$, $\mu=400$ und $\mu<100$) gezeigt, die an nanokristallinen Bändern aus Durchlaufglühprozessen gemessen wurden. Es konnte gezeigt werden, dass aus einer Fe-Basislegierung (VP800) durch unterschiedliche Wärmebehandlung unter Zugspannung im Durchlauf nahezu beliebige Permeabilitäten unterhalb von 2.000 einstellbar sind. Im Anschluss wurden Kerne der Dimension 5.5 x 3.5 x 1.0mm gewickelt.

Die Abbildung 10 zeigt weiters die Messung der frequenzabhängigen Permeabilität dieser Kerne. Für Kerne mit einer Permeabilität von $\mu=400$ erreicht man bereits eine Wirbelstromgrenzfrequenz f_g von ca. 9 MHz, für Kerne mit $\mu<100$ erhöht sich die Wirbelstromgrenzfrequenz f_g auf ca. 50 MHz. Somit ist gezeigt, dass man mit nanokristallinen Materialien sehr verlustarme Induktivitäten herstellen lassen, die auch im hohen Frequenzbereich (> 1 MHz) bis hin zur spezifischen Wirbelstromgrenzfrequenz ihren Einsatz finden können.

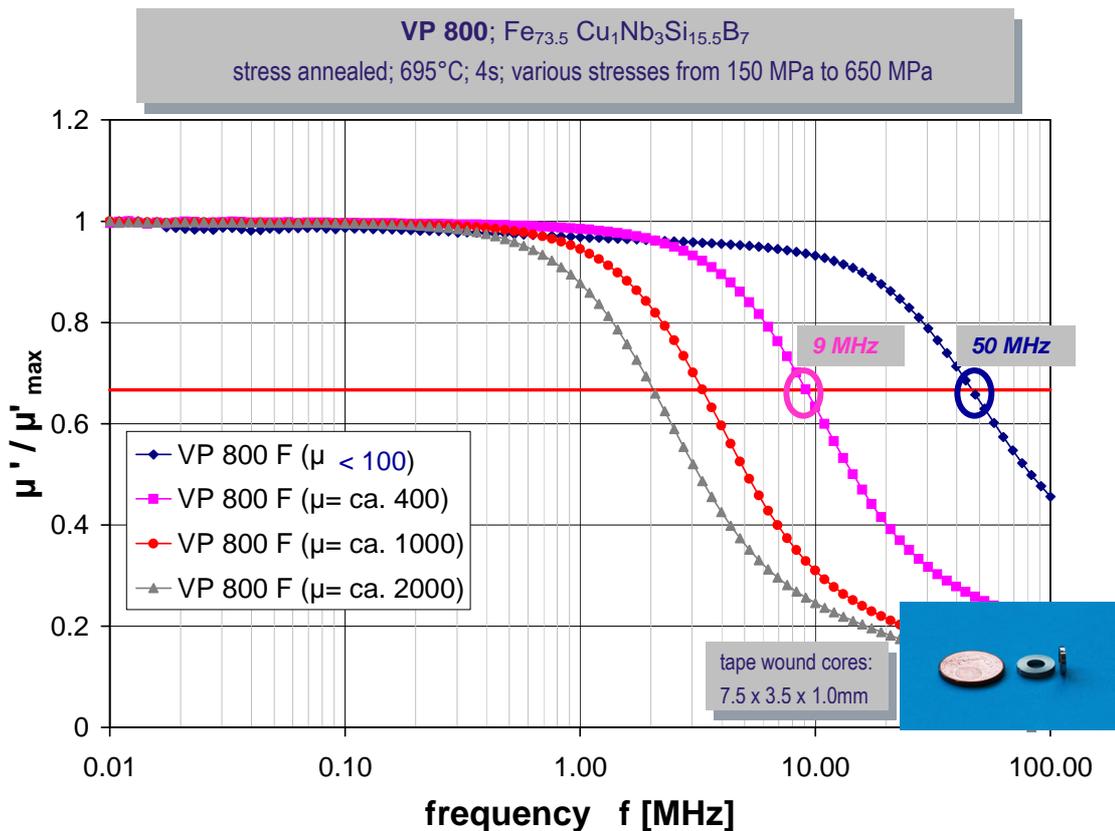
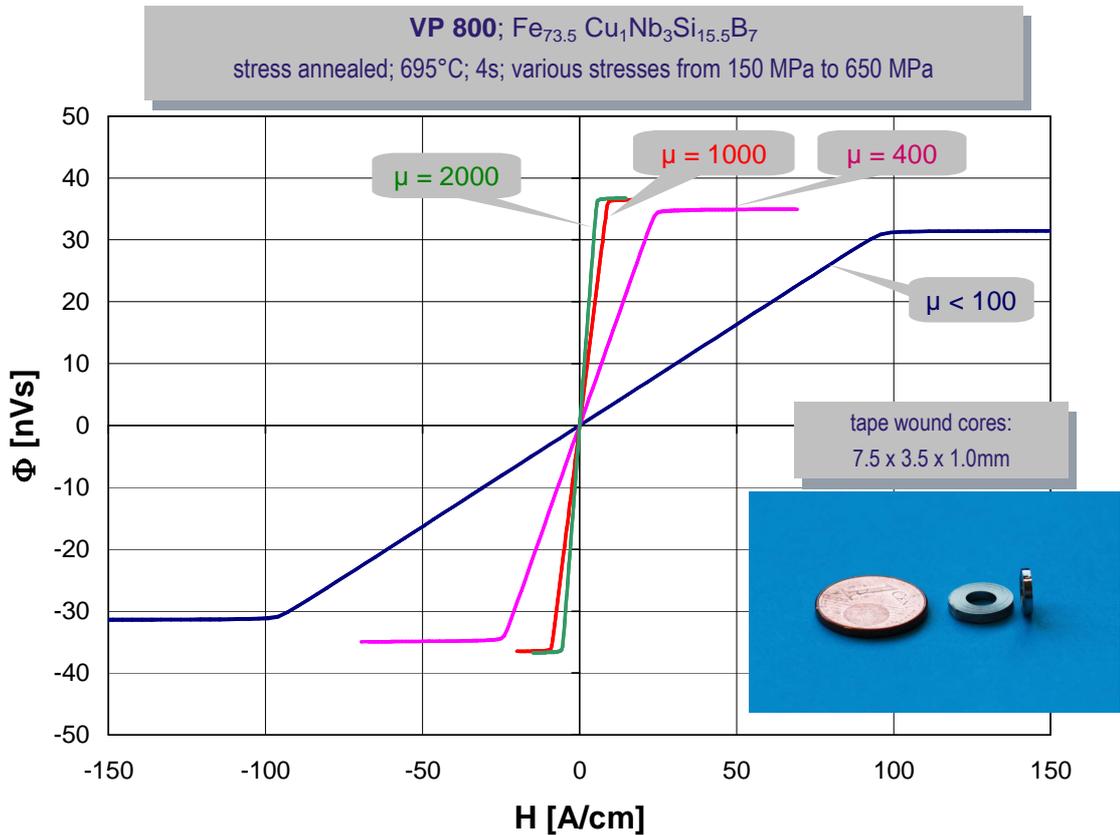


Abb. 10: Oben: Hystereseschleifen an nanokristallinen Bändern der Legierung VP 800 mit verschiedenen Permeabilitätsniveaus. Die Wärmebehandlung der Bänder erfolgte in Durchaufglühprozessen. Unten: Messung der frequenzabhängigen Permeabilität (Realteil) an aus den Bändern gefertigter Kerne.

2.5. Zusammenfassung:

In konventionellen elektronischen Schaltungen nehmen passive Bauelemente wie Kondensatoren, Induktivitäten und Transformatoren einen großen Anteil an Volumen, Gewicht, Zuverlässigkeit und damit an Kosten ein. Wesentliche Verbesserungen ergeben sich durch Miniaturisierung und Integration solcher Bauelemente, wobei die Schaltfrequenzen dementsprechend erhöht werden müssen, um vergleichbare Leistungen übertragen zu können.

Unter den metallischen weichmagnetischen Werkstoffen sind neben amorphen vor allem nanokristalline Werkstoffe sehr vielversprechende Kandidaten für integrierbare Induktivitäten. Diese relativ jungen Werkstoffe wurden in den vergangenen Jahrzehnten zur Marktreife entwickelt und finden eine stetig wachsende Anwendung in hochwertigen Magnetkernen für Induktivitäten.

Im Rahmen des Projektes wurde die Optimierung der Materialeigenschaften amorpher und nanokristalliner Werkstoffe insbesondere im Hinblick auf ihre Anwendung bei höheren Frequenzen untersucht. Vorgestellt wurden neue Wärmebehandlungs- und Verarbeitungstechnologien, welche die Integration des in Bandform hergestellten rascherstarten Materials in die Leiterplatte ermöglichen.

Untersucht wurden planare Induktivitäten, aus unterschiedlichen amorphen und nanokristallinen Legierungen, um sowohl den Legierungseinfluss als auch den Einfluss induzierter Anisotropien auf die Güte der Induktivität darzustellen. Durch Laserstrukturierung nanokristalliner Plättchen konnte die Materialgüte erheblich gesteigert werden, die so erzielte Verlustreduktion kann mit einer nachgewiesenen Domänenverfeinerung erklärt werden. Die Domänenstruktur und Domänenbreite wurden mit kernmikroskopischen Untersuchungen bestimmt.

Im Weiteren wurden Ringbandkerne mit einer Kernhöhe von 1mm untersucht, die zur Einbettung in die Leiterplatte geeignet erscheinen. Als Kernmaterial wurde nanokristallines Bandmaterial im Permeabilitätsbereich von $\mu_{DC}=1.000$ bis $\mu_{DC}=100$ verwendet. Der nanokristalline Zustand wurde im Band durch einen kontinuierlichen Wärmebehandlungsprozess unter axialer Zugspannung hergestellt. An den Ringbandkernen wurden die magnetischen Eigenschaften, sowie die Kernverluste frequenzabhängig untersucht. Bei enorm starker Reduktion der DC-Permeabilität ($\mu_{DC} \leq 100$) kann man somit Schaltfrequenzen bis zu 50 MHz realisieren.

Zusammengefasste Ergebnisse:

- *geringe Ummagnetisierungsverluste*
 - nanokristallines Material VP 800 zeigt hervorragende Weichmagnetik
- *hohe Güte >20*
 - erreicht durch Strukturierung, einstellbare niedrige Permeabilität und erhöhte Wirbelstromgrenzfrequenz f_g
- *Frequenzbereich: (0,5 ... 10) MHz*
 - erreicht durch geringe Banddicke $d \sim 20 \mu\text{m}$ (herstellungsbedingt)
 - erreicht durch Permeabilität μ einstellbar 100.000 ...100
 - erreicht durch hohen spezifischen elektrischen Widerstand $\rho_{el} \sim 1.2 \mu\Omega\text{m}$
- *Material voll in PCB integrierbar*
 - Magnetostriktion nahe Null $\lambda_s \sim 0$

2.6 Literaturverzeichnis:

- Flohrer, S., Schäfer, R., McCord, Roth, S., Schultz, L. and Herzer, G. (2006). Dynamic losses and domain refinement in nanocrystalline tape wound cores. *Acta Materialia* 54, 3253-3259.
- Herzer, G. (1997). Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys. In *Handbook of Magnetic Materials* Vol. 10, Buschow, K.H.J (Ed.), Elsevier Science B.V., pp. 415-462
- Herzer, G. (2005). Anisotropies in Soft Magnetic Nanocrystalline Alloys. *J. Magn. Magn. Mat.* 294, 99–106.
- Hitachi Metals Ltd. (1993) New materials from the Nano-world, Magnetic Cores. Data sheet Y-930415
- Luborsky, F. E. (Ed.). (1983). *Amorphous Metallic Alloys*, Butterworths, London
- Müller, M., Grahl, H., Mattern, N., Kühn, U. and Schnell, B. (1996) The influence of Co on the structure and magnetic properties of nanocrystalline FeSiB-CuNb and FeZrBCu-based alloys. *J. Magn. Magn. Mat.* 160, 284-286.
- Nakazawa H., Edo M., Katayama Y., Gekinozu M., Sugahara S., Hayashi Z., Kuroki K., Yonezwawa E. and Matsuzaki K. (2000) Micro-DC/DC Converter that Integrates Planar Inductor on Power IC, *IEEE Trans. on Magnetics* 36, 3518-3520
- Ohnuma, M., Ping, D.H., Abe, T., Onodera, H, Hono K., and Yoshizawa Y. (2003). Optimization of the Microstructure and Properties of Co-substituted Fe-Si-B-Nb-Cu Nanocrystalline Soft Magnetic Alloys. *J. Appl. Phys* 93, 9186-9194
- Petzold, J. (2002). Advantages of softmagnetic nanocrystalline materials for modern electronic applications. *J. Magn. Magn. Mat.* 242-245, 84 –89.
- Sato T., Hasegawa M., Mizoguchi T. and Sahashi M. (1992). Planar Inductor for Very Small DC-DC Converters, *IEICE Trans. Commun.* E75-B, 1186-1191
- Suzuki, K., Kataoka, N., Inoue, A., Makino, A., and Masumoto, T. (1990). High Saturation Magnetization and Soft Magnetic Properties of bcc Fe-Zr-B Alloys with Ultrafine Grain Structure. *Materials Transactions JIM* 31, 743-746.
- Vacuumschmelze GmbH (1990) *Weichmagnetische Werkstoffe*, Boll, R. (Ed.), Siemens AG Verlag, Berlin and Munich
- Vacuumschmelze GmbH (1993). *Toroidal Cores of VITROPERM*, data sheet PW-014
- Yoshizawa, Y, Oguma, S. and Yamauchi, K. (1988). New Fe-based Soft Magnetic Alloys Composed of Ultrafine Grain Structure. *J. Appl. Phys.* 64, 6044
- Yoshizawa, Y., Fuji, S., Ping, D.H., Ohnuma, M. and Hono, K. (2003). Magnetic properties of nanocrystalline FeMCuNbSiB alloys (M: Co, Ni). *Scripta Materialia* 48, 863-868.