

# Mit nanokristallinen Werkstoffen die Leistung von Trafos steigern

*Ein neuer Fertigungsprozess der Vacuumschmelze reduziert die bereits niedrigen magnetischen Verluste geschnittener nanokristalliner Trafokerne nochmals erheblich.*

DR. GABRIELA SAAGE UND FRANK SCHNELLE \*



Veröffentlicht in Elektronik Praxis Sonderheft Elektromechanik | Februar 2020  
Nachdruck mit freundlicher Genehmigung des Vogel Verlags

# Mit nanokristallinen Werkstoffen die Leistung von Trafos steigern

*Ein neuer Fertigungsprozess der Vacuumschmelze reduziert die bereits niedrigen magnetischen Verluste geschnittener nanokristalliner Trafokerne nochmals erheblich.*

DR. GABRIELA SAAGE UND FRANK SCHNELLE \*

Silizium-Halbleiter sowie neue Halbleiter mit breitem Bandabstand wie Siliziumkarbid und Galliumnitrid gelten aktuell als die Treiber für zukunftsweisende Anwendungen wie Mittelfrequenz-Transformatoren (MFT). Einsatzgebiete von MFT sind beispielsweise Bahnanwendungen, intelligente Energienetze und DC-Schnellladesäulen für Elektrofahrzeuge.

Trotz der raschen Entwicklung bei aktiven Leistungsschaltern, werden vor allem die induktiven Komponenten als entscheidend für das Volumen und Gewicht des Anwendungssystems und dessen Leistungsfähigkeit angesehen. Durch Schaltfrequenzen zwischen 1 und 100 kHz bei Leistungen oberhalb von 100 kVA lassen sich prinzipiell die Abmessungen aller magnetischen Komponenten reduzieren; dies geht allerdings in der Regel mit höheren Verlusten in den magnetischen Kernmaterialien einher.

Dies versucht man zumindest teilweise durch eine niedrigere Aussteuerung zu kompensieren, was wiederum größere Kernabmessungen zur Folge hat.

Insbesondere Anwendungen höherer Leistung benötigen meist geschnittene Kerne – hauptsächlich für einen einfachen Windungs- und Isolationsaufbau –, was durch höhere Kernverluste und größere Streufelder erkauft wird.

Das Spektrum weichmagnetischer Werkstoffe für solche Anwendungen besteht hauptsächlich aus vier relevanten Materialgruppen, deren jeweilige Stärken und



**Mittelfrequenz-Transformatoren:**  
Schnittbandkerne aus VITROPERM 500 F.

Verluste. Hochfrequenz-Ferrite können bis 500 kHz eingesetzt werden.

Durch das breite Portfolio an Materialgraden ist eine feine Abstimmung der Materialcharakteristik auf die spezifischen Anwendungsbedingungen

möglich. Da die Kernproduktion auf einem Sinter-Prozess beruht, lassen sich unterschiedliche Kernformen realisieren.

Den Einsatz von Ferriten begrenzt im Wesentlichen die niedrige Sättigungsinduktion von 0,35 bis 0,55 T. Darüber hinaus sind die Materialeigenschaften temperaturabhängig, was meist die praktisch erreichbare magnetische Aussteuerung der Kerne in der Anwendung weiter reduziert.

In der Praxis ergeben sich aufgrund dieser Einschränkungen in der Verwendung in Transformatoren zwei Möglichkeiten: die Erhöhung der effektiven Schaltfrequenz oder die Vergrößerung des Eisenquerschnitts. Eine höhere Schaltfrequenz führt jedoch zu höherer spezifischer Verlustleistung, wohingegen die Vergrößerung des verwendeten Eisenquerschnitts die Leistungsdichte des Transformators reduziert.

**Kornorientiertes Elektroband auf Basis von Siliziumeisen (SiFe)** mit 3 Gew.-% Silizium ist das am häufigsten genutzte

Material bei der Herstellung von energieeffizienten Transformatoren, insbesondere für Anwendungen mit 50 Hz. Die Vorteile liegen in der hohen Sättigungsinduktion von 2,0 T, der relativ einfachen mechanischen Verarbeitbarkeit und der hohen Verfügbarkeit des Werkstoffs.

Nachteilig sind die hohen frequenzabhängigen Verluste. Daher wird kornorientiertes Elektroband in der Regel nur in Anwendun-

Schwächen im Folgenden dargestellt werden.

**Keramische Ferrite**, häufig Mangan-Zink (MnZn) und Nickel-Zink (NiZn) Ferrite. Für Mittelfrequenz-Anwendungen werden meist MnZn-Ferrite bevorzugt, die sich durch höhere initiale Permeabilität und höhere Sättigungsinduktion auszeichnen. Im Vergleich zu SiFe haben sie im Frequenzbereich zwischen 25 und 200 kHz niedrigere spezifische



\* Dr. Gabriela Saage

... leitet die Entwicklungsgruppe Magnetkerne und Technologie bei der Vacuumschmelze in Hanau.



\* Frank Schnelle

... ist Produktmanager Energy Conversion & Automation bei der Vacuumschmelze in Hanau.



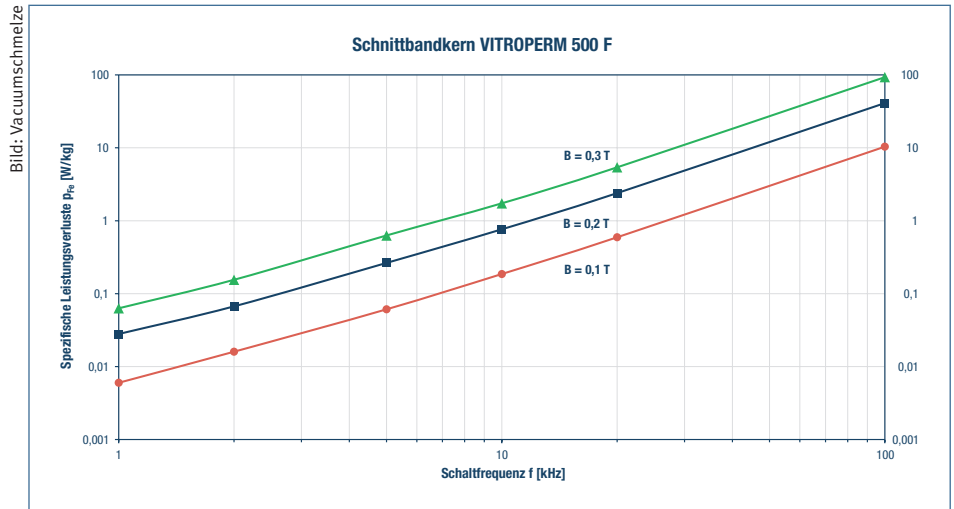
**PRÄZISION FÜR HOCH-LEISTUNGSANWENDUNGEN  
KOMPAKTESTER KOMPENSATIONS-STROMSENSOR FÜR DC- UND AC-NENNSTRÖME ÜBER 1.000 A**

VACUUMSCHMELZE hat den ersten sehr kompakten Stromsensor mit hoher Genauigkeit und einem Nennstrom  $I_{PN}$  bis zu 1.700 A mit einer MOSFET Klasse-D-Endstufe realisiert. Diese ermöglicht höhere Kompensationsströme mit weniger Verlustleistung im Vergleich zu einer linearen Endstufe.

Die neue Generation ermöglicht einen hohen Nennstrom und einen großen Messbereich in kleinster Bauform. Der Messbereich bei 20 °C Umgebungstemperatur reicht bis 3.400 A und der Messfehler bei Nennstrom liegt bei maximal 0,3%. In dieser Leistungsklasse liegt der Sensor preislich und im Platzbedarf weit vor anderen verfügbaren Sensoren auf dem Markt.

In vielen Anwendungen ist es möglich, einen überdimensionierten Stromsensor mit 2.000 A  $I_{PN}$  zu ersetzen und so eine günstigere und kleinere Lösung zu realisieren.

**VACUUMSCHMELZE GMBH & CO. KG**  
Grüner Weg 37  
D 63450 Hanau / Deutschland  
Telefon +49 6181 38 0  
Fax +49 6181 38 2645  
info@vacuumschmelze.com  
www.vacuumschmelze.com



**Bild 1:** Spezifische Verlustleistung als Funktion der Schaltfrequenz für magnetische Flussdichten zwischen 0,1 und 0,3 T.

gen mit Schaltfrequenzen unterhalb von 1000 Hz eingesetzt.

Die dritte Materialgruppe umfasst **amorphe Legierungen auf Eisenbasis**, welche durch Schmelzspinnverfahren hergestellt werden. Dabei werden Metalloide wie Bor (B) und Silizium (Si) zugesetzt, um die Stabilität der amorphen Phase zu gewährleisten. Der maßgebliche Vorteil dieser Materialklasse liegt in der Verbindung relativ niedriger Kernverluste mit einer hohen Sättigungsinduktion von 1,5 bis 1,6 T.

Die hohe Leistungsfähigkeit im Vergleich zu SiFe macht diese Werkstoffe sehr attraktiv für Verteiltransformatoren. Als großer Nachteil der amorphen Legierungen auf Eisenbasis ist die vergleichsweise hohe Magnetostriktion von 25 bis 30 ppm zu nennen.

Dieser intrinsische Materialparameter beschreibt die Kopplung zwischen der Magnetisierung des Werkstoffs und der Änderung der geometrischen Abmessungen seines Körpers. Die Folge ist die Emission von Störgeräuschen und eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Spannungen. Das verursacht Schwierigkeiten bei der Handhabung des Werkstoffs und limitiert die

Möglichkeiten für Verbesserungen in den magnetischen Eigenschaften.

Die vierte Gruppe besteht aus den **nanokristallinen Legierungen auf Eisenbasis**, welche – ähnlich amorphen Legierungen – durch einen Rascherstarrungsprozess hergestellt werden, woran sich eine Wärmebehandlung anschließt, bei der nanokristalline Bereiche ausgebildet werden.

**Die Vorteile von nanokristallinen Werkstoffen**

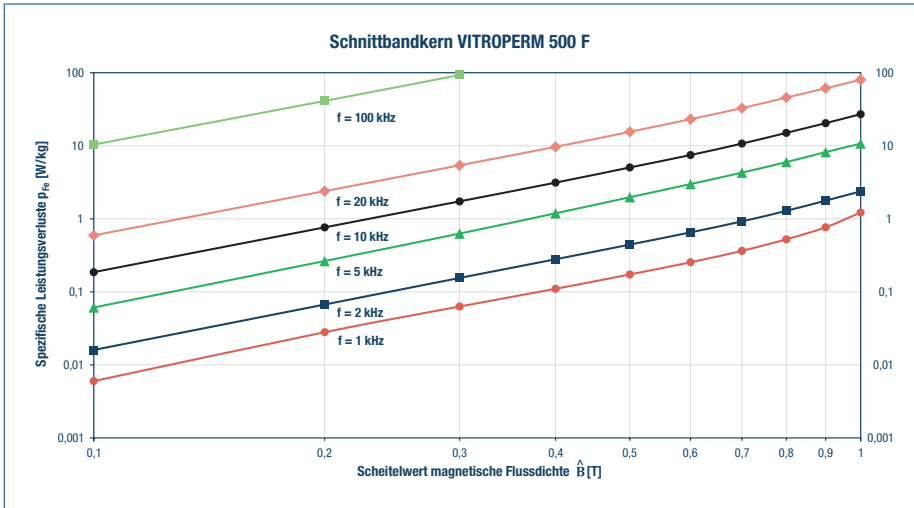
Bedingt durch die Herstellung entsteht ein magnetisches Band variabler Breite mit einer Dicke unter 20 µm. Dies ist die Ursache, warum amorphe und nanokristalline Kerne in runder, ovaler oder rechteckiger Form hergestellt werden. Im Vergleich zu amorphen Eisenlegierungen kann nanokristallines Material praktisch ohne Magnetostriktion hergestellt werden.

Folglich bieten diese Werkstoffe die niedrigsten spezifischen Kernverluste in einem Frequenzbereich bis 200 kHz bei gleichzeitig hoher Sättigungsinduktion von 1,2 T. Weiterhin weist der Werkstoff im für Anwendungen relevanten Temperaturbereich praktisch

**Was sind Schnittbandkerne?**

Bei Schnittbandkernen handelt es sich um gewickelte magnetische Kerne, die meist in der Mitte des längeren Schenkels aufgetrennt werden. Die beiden Kernhälften können so beim Transformatorbau im Nachhinein in den bewickelten Spulenkörper geschoben

werden, was die Fertigung des Kupferwickels deutlich vereinfacht. Die magnetischen Eigenschaften der Schnittbandkerne hängen neben dem verwendeten magnetischen Material maßgeblich von der Fertigungstechnologie ab.



**Bild 2:** Spezifische Verlustleistung als Funktion der magnetischen Flussdichte für Schaltfrequenzen zwischen 1 und 100 kHz.

Bild: Vacuumschmelze

nisse ist eine gute Adhäsion genauso wichtig wie eine hohe Schälkraft, damit eine ausreichende Stabilisierung des Kerns erreicht wird. Gleichzeitig ist eine niedrige Eigen- spannung des Tränkeharzes erforderlich, um den Einfluss auf die magnetische Qualität des Kerns zu minimieren. Schließlich muss das Tränkeharz auch eine hohe Wärmebestän- digkeit aufweisen, um den Betriebstempera- turen von etwa 130°C standzuhalten.

Im nanokristallinen Zustand ist der Werk- stoff sehr spröde, weshalb eine ungeeignete Prozesstechnik zu Brüchen der Bandlagen führt. Daher wurden alle denkbaren Trenn- verfahren umfangreich mit externen Part- nern erprobt und die jeweiligen Auswirkun- gen auf die magnetische Qualität analysiert. Dadurch konnte ein Trennverfahren ausge- wählt werden, das eine gute magnetische Qualität der geschnittenen Kerne mit effzi- enten Prozesszeiten verbindet. Nach dem Trennen der Kerne erfolgt die Schlussbear- beitung der Schnittflächen, welche insbe- sondere dazu beiträgt, die Verluste bei höhe- ren Schaltfrequenzen deutlich zu reduzieren.

### Weniger Kernverluste führen zu kompakten Designs

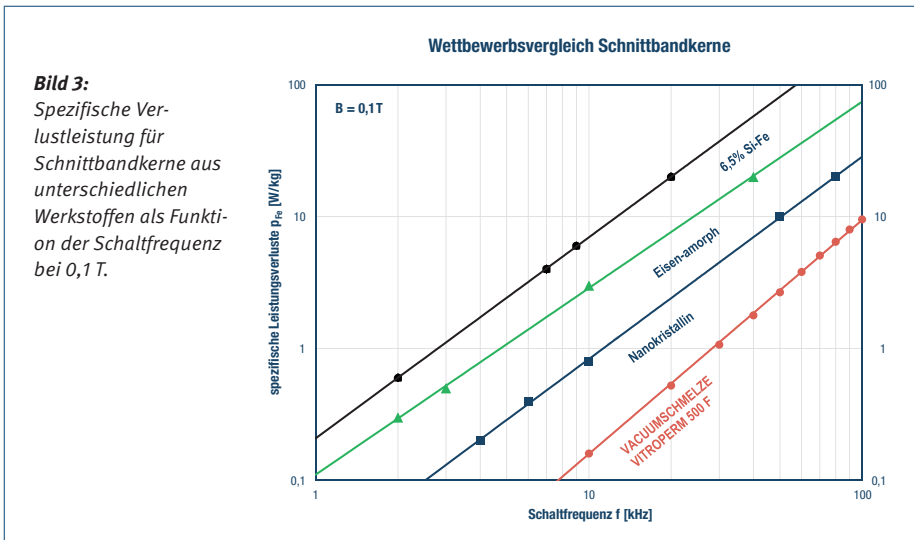
Die Optimierungen über die gesamte Pro- duktionskette bei der Herstellung der nano- kristallinen Schnittbandkerne gehen mit einer Reihe von Vorteilen einher: Der höhere Füllfaktor ermöglicht kompaktere Bauteile mit einer reduzierten Grundfläche und einem geringeren Volumen in der Anwendung. Dies geht Hand in Hand mit der hohen Tempera- turfestigkeit der Schnittbandkerne, die kon- tinuierliche Betriebstemperaturen von mehr als 130°C erlaubt.

Der große Vorteil liegt in der starken Re- duktion der Kernverluste: Die Diagramme in den Bildern 1 bis 3 zeigen die spezifische Verlustleistung in Abhängigkeit von der Schaltfrequenz im Bereich zwischen 1 und 100 kHz für magnetische Flussdichten zwi- schen 0,1 und 0,3 T sowie in Abhängigkeit von der magnetischen Flussdichte zwischen 0,1 und 1 T für Schaltfrequenzen im Bereich von 1 bis 100 kHz.

Die Messungen machen die hohe Aussteu- erbarkeit bis 1 T deutlich und zeigen die sehr niedrigen spezifischen Verlustleistungen der geschnittenen Kerne. Praktisch liegen diese nur geringfügig oberhalb der Verluste unge- trennter Kerne vergleichbarer Größe. Da- durch weisen die neuen Schnittbandkerne auf Basis von VITROPERM 500 F die niedrigs- ten Verluste der vorgestellten Materialgrup- pen auf.

// KR

Vacuumschmelze



**Bild 3:** Spezifische Ver- lustleistung für Schnittbandkerne aus unterschiedlichen Werkstoffen als Funkti- on der Schaltfrequenz bei 0,1 T.

Bild: Vacuumschmelze

keine Temperaturabhängigkeit der Ummag- netisierungsverluste auf. Ein wesentlicher Nachteil nanokristalliner Kerne besteht da- rin, dass die spezifischen Kernverluste nach dem Schneiden des Werkstoffs stark anstei- gen. Das ist insbesondere für Anwendungen mit höherer Leistung ungünstig.

### Verluste nanokristalliner Schnittbandkerne senken

Um diesen Nachteil auszuräumen, haben die Hanauer Spezialisten mit externen Part- nern nach Wegen gesucht, um den gesamten Fertigungsprozess bei der Herstellung nano- kristalliner Schnittbandkerne zu optimieren.

Die magnetische Leistungsfähigkeit ge- schnittener Kerne hängt nicht ausschließlich von der Qualität des Schnitts selbst ab, son- dern wird auch durch die Form des Kerns und die vorliegenden elementaren Magnetisie-

rungsprozesse im Werkstoff beeinflusst. Letztere werden wiederum stark durch tech- nologische Parameter beeinflusst.

Ausgehend von einer neuen Technologie für das Kernwickeln, mit der sich deutlich höhere Wickelzüge ohne Verschlechterung der Kernqualität realisieren lassen, werden effektive Füllfaktoren in der Größenordnung von 80% erreicht. Dies beeinflusst den effek- tiven magnetischen Eisenquerschnitt direkt, was zu einer Volumenreduktion des Kerns genutzt werden kann. Nach dem Wickeln werden die Kerne thermisch behandelt, um das zunächst amorphe Material in seinen nanokristallinen Zustand zu überführen.

Danach wird der Kern durch ein geeignetes Tränkeharz für das Schneiden vorbereitet. Das eingebrachte Tränkeharz muss eine niedrige Viskosität haben, um den Kern vollständig zu durchdringen. Für optimale Schnittergeb-