

Abschlussbericht Teil I: Kurzbericht Projekt „MEPOFERRI“

Ursprüngliche Aufgabenstellung und Stand Wissenschaft und Technik:

3D gedruckte Bauteile spielen in der modernen Zeit immer häufiger eine wichtige Rolle und dienen der schnellen und individuellen Realisierung von Ideen und Modellen, ohne auf teure abtragende Verfahren zurückzugreifen. Neben dem Drucken von Kunststoffen wird auch immer häufiger die Verfügbarkeit von anderen Werkstoffen in druckbarer Form nachgefragt. In den letzten Jahren gab es viele Entwicklungen zu druckbaren Modellen aus Metallen. Diese werden idR. gedruckt und Lasergesintert/ Laseraufgeschmolzen, um eine feste Form zu erhalten. Das Werkstück wird dabei meistens im Pulverbett verschmolzen oder aus metallhaltigem Filament hergestellt. Für Keramiken ist diese Art der Verarbeitung bisher kaum erforscht, aber auch hier hat die Zahl der Untersuchungen/Projekten zugenommen. Die Herausforderung bei Keramik ist hierbei, dass der Werkstoff während des Druckens unter keinen Umständen aufgeschmolzen werden darf, da er sonst seine Gitterstruktur und dazugehörige Eigenschaften massiv ändert. Zudem benötigt man eine hohe Verdichtung, um die benötigten Festigkeiten zu erreichen. Aus diesen Gründen behilft man sich, indem ein Polymerpulver zum Keramikpulver untergemischt und daraus ein flexibles Filament hergestellt wird. Der Kunststoff wird anschließend beim Drucken an der Düse aufgeschmolzen und verklebt die Keramikpartikel zu einem endformnahen, festen und dichten Bauteil.

In dem Projekt „MEPOFERRI“ wurde angestrebt, den Mangan-Zink-Ferrit in eine druckbare Form als Filament zu überführen und daraus Demonstratoren herzustellen und dieses Herstellungsverfahren zu klassifizieren.

Um dieses Ziel zu erreichen, wurden 2 Routen verfolgt:

- a) Route mit Vor-Ferrit zum Sintern der Bauteile
- b) Route mit Ferrit ohne Sintern der Bauteile

Ablauf des Vorhabens:

Für die erste Route wurde ein niedrigsinterndes MZF verwendet. Dieses wurde über die Schritte: Mischen, Kalzinieren, Mahlung und Granulierung zu einem Vor-Ferritpulver mit bekannten Werkstoffeigenschaften aufbereitet und an das IFAM in Bremen übergeben, dort zu Filamenten verarbeitet und zu Ringkernen gedruckt. Anschließend erfolgte die Sinterung bei TWF. Für die zweite Route wurde das Vor-

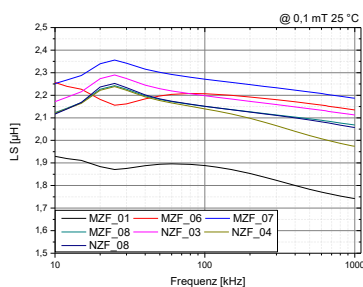
Ferritpulver in eine Sinterschale gefüllt und bei einem Standardbrand im Produktionsofen zu Voll-Ferritpulver umgewandelt, es entstehen kleine Ferritkügelchen. Die resultierenden Ferritkügelchen wurden im Folgeprozess entweder nochmals zu feinerem Pulver nass aufgemahlen und getrocknet (Pulver 2077) oder die Ferritkügelchen wurden im Siebturm auf verschiedene Partikelgrößen klassiert und anschließend an das IFAM übergeben.

Wesentliche Ergebnisse und Zusammenarbeit:

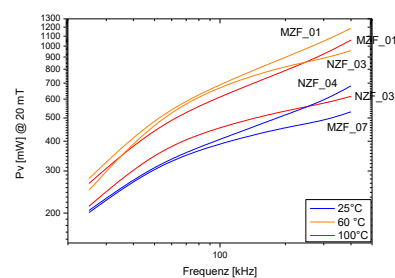
Beim IFAM wurden die verschiedenen Ferritpulver zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Filamenten mit angepasstem Füllgrad und Pulvermischung mit Mischung von PEBA 5533 hergestellt. Die Komposit-Filamente wurden anschließend an Neotech geschickt, um daraus verschiedene Probekörper zu drucken und die passenden Druckparameter zu finden. Gedruckt wurden zunächst Ringkernformen, um den gedruckten Werkstoff einfacher klassifizieren zu können. Daraus folgend wurden quaderförmige, flache Demonstratoren mit integrierter Silberleitbahn hergestellt und ausgewertet. Im Anschluss erfolgte nochmals eine Bauteiloptimierung, wo die Ferritschichten dicker gestaltet wurden, um Kurzschlüsse und Druckfehler zu reduzieren. Die Ringkerne und Demonstratoren wurden abschließend an Würth Elektronik und TWF geschickt und elektromagnetisch, optisch und röntgenografisch ausgewertet. Bzw. die Kerne aus Route 1 wurden vorher bei TWF gesintert und anschließend ausgewertet.

Darstellung der Projektergebnisse:

Die Ergebnisse der finalen Demonstratoren sind wie folgt zusammengefasst. Die Induktivität L_s , ist nahezu konstant mit leichter Senkung bei höheren Frequenzen. Die Demonstratoren aus MZF und NZF sind nahezu identisch. Die Verluste von den Demonstratoren zeigen keinen eindeutigen Unterschied zwischen den Materialien.



Induktivität der Demonstratoren



Verlustleistung der Demonstratoren

Abschlussbericht Teil II Projekt „MEPOFERRI“

Ausführliche Darstellung der durchgeführten Arbeiten:

Pulverpräparation:

Für die Untersuchungen wurden verschiedene Ferritpulver hergestellt und getestet. Dabei wurden 2 Routen verfolgt: a) Vor-Ferrit-Route und b) Ferrit-Route. Die Herstellungsrouten entsprechen dabei der industriellen Herstellung von Mn-Zn-Ferrit und beinhaltet die Schritte: Mischen der Rohstoffe zur gewünschten Zusammensetzung, Kalzinieren der Mischung bei 1030 °C im Drehrohrfurnen für ca. 45 min, Mahlung des Kalzinats in der Grob- und Feinmahlung auf einen d50 von ca. 2 µm mit Wasser und Stahlkugeln mit abschließender Trocknung zu Granulat im Sprühturm. (Abb.1)

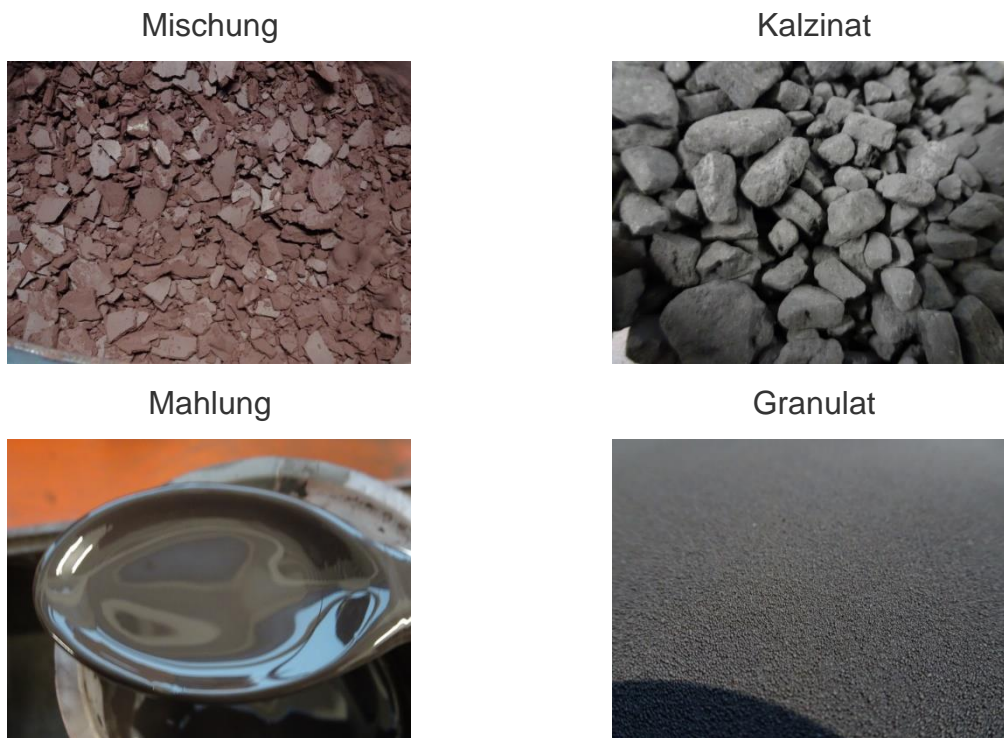


Abbildung 1: Prozessroute MZF und NZF

Für a) wurde ein niedrigsinternder Mangan-Zink-Ferrit (MZF) hergestellt.

Für b) wurden zunächst 3 Ferrit-Pulver mit gleicher Zusammensetzung aber unterschiedlicher Morphologie hergestellt. Zum einen ein Ferritpulver mit kugelförmigen Partikeln (Ferritkugeln), welches Partikelgrößen von 0 – 200 µm aufweist. Daraus wurden 2 Proben über ein Sieb klassiert, welche 90 – 200 µm (A1) und < 90 µm (A2) aufweisen. Der Grobanteil > 200 µm wurde nicht verwendet, weil es bekanntermaßen zu groß für die Düsen beim Drucken ist und diese Verstopfen

würden. Der Grobanteil wurde mit einer Nassmahlung und Trocknung zu Ferritpulver „2077“ aufbereitet, welches einen d50 von ca. 8 µm aufweist. Ein Teil dieses Pulvers wurde zusätzlich zu Ferritgranulat „0502“ (A3) granuliert, um eine bessere Dosierbarkeit bei der Filamentherstellung zu erreichen. Neben dem Mangan-Zink-Ferrit wurde ein Versatz mit Nickel-Zink-Ferrit (NZF) synthetisiert und zu einem ähnlichen Pulvern aufbereitet.

Die Pulver wurden für einen ersten Vergleich auf ihre Restmagnetisierung untersucht. Dabei wird, wie in Abb.2 gezeigt, eine geringe Menge Pulver in eine Küvette gefüllt und in ein konstantes Magnetfeld eingeführt. Gemessen wird die auftretende Spannungsamplitude, aufgrund der Induktion durch das Material, welche auf eine Restmagnetisierung/ Sättigungsmagnetisierung umgerechnet werden kann. Es ist im Diagramm zu erkennen, dass es einen großen Unterschied zwischen MZF und NZF gibt. Der Unterschied zwischen den unterschiedlichen MZF-Aufbereitungen hingegen ist vernachlässigbar gering. Das aufgemahlene Pulver „2077“ liegt im Mittelfeld.

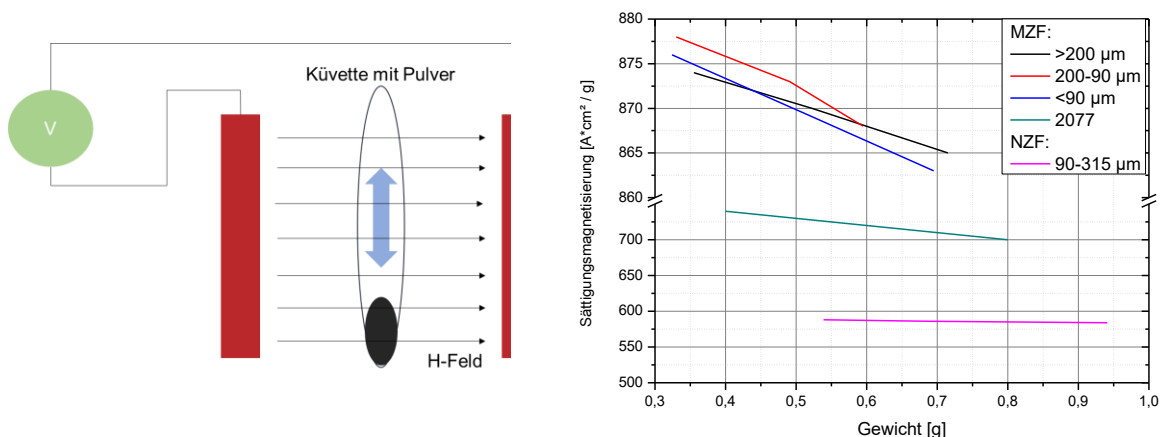


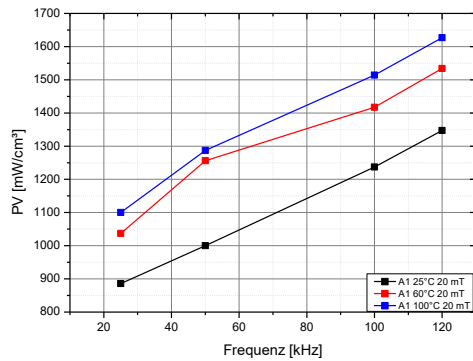
Abbildung 2: links- Messverfahren Restmagnetisierung; rechts- Messwerte

Verarbeitbarkeit der Ferritpulver und Charakterisierung:

Die verschiedenen Pulvertypen wurden an das IFAM geschickt, um dort mit unterschiedlichen Polymeren gemischt und zu Filamenten verarbeitet zu werden. Es wurde sich nach einigen Versuchsreihen für PeBax5533 entschieden, weil dieser die besten Filamenteigenschaften im Vergleich zu anderen Polymeren gezeigt hat. Aus den Filamenten mit PEBA5533 und Ferrit wurden Musterkerne als Ringe gedruckt und zum Messen zurückgeschickt, um diese erstmals magnetisch zu Charakterisieren.

In Abb.3 sind die ersten Messkurven gezeigt. Allgemein ist festzustellen, dass die Proben sowohl temperatur- als auch frequenzabhängige Messwerte aufgezeigt haben. Dieser entsteht durch den Ferritanteil im Kompositkern.

Frequenzabhängigkeit



Temperaturabhängigkeit

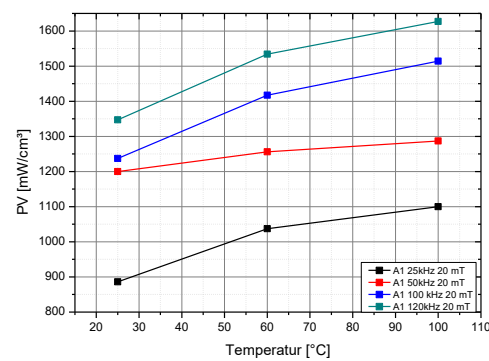


Abbildung 3: Verlustleistung über Frequenz und Temperatur am gedruckten Ringkern

Auf dieser Basis wurde Route b) fortgesetzt, indem Mischungen aus groben und feinen Ferritpartikeln (D1 und D2) in einem Filament angefertigt und verdruckt wurden. Die Mischung aus groben und feinen Partikeln soll dazu beitragen die Hohlräume zwischen den Partikeln zu füllen, damit das Magnetfeld gleichmäßiger durch den Kern geführt wird und die Anzahl an großen Luftspalten zu reduzieren. Die Ergebnisse sind in den Diagrammen von Abb.4 bei 100 °C zusammengefasst. Der Trend zeigt, dass die Absolutwerte durch die Mischung deutlich besser geworden sind. Auch das NZF zeigt relativ gute Werte, die zum MZF vergleichbar sind. Hinsichtlich Permeabilität gibt es keinen großen Unterschied zwischen den Kompositkernen. Der Wert befindet sich im Bereich 20 - 30 und ist sehr niedrig. Daher scheint es, dass das Ferrit-Material eine untergeordnete Rolle spielt und nur die Partikelgrößen bzw. Füllraum entscheidend sind.

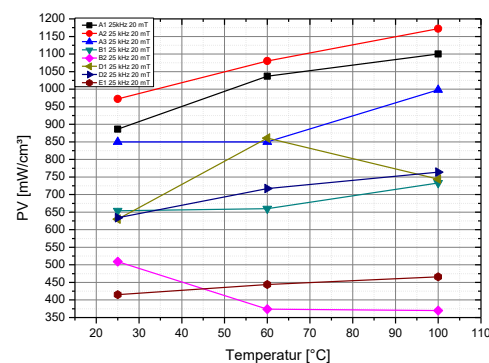
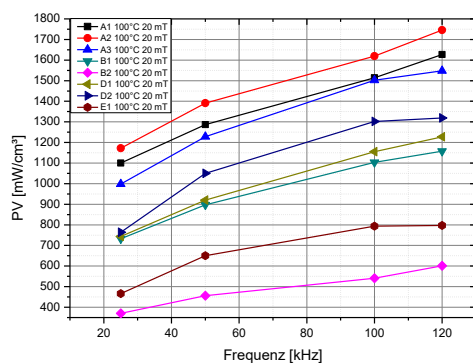


Abbildung 4: Verlustleistung über Frequenz und Temperatur der gedruckten Filamente

Nach bisherigen Erkenntnissen sind der Entmagnetisierungsfaktor und die hohe Anzahl an Luftspalten zwischen den Partikeln im gedruckten Kern für die wesentlich geringeren Permeabilitäten am gedruckten Kern verantwortlich.

Der Entmagnetisierungsfaktor wird durch die Partikelform bestimmt. Da diese durch das Sprühtrocknen und Mahlen einer Kugel ähnelt, wird die Permeabilität reduziert. Die Luftspalte zwischen den Partikeln sind aufgrund der fehlenden Sinterung ebenfalls immer vorhanden und stören das Magnetfeld. Eine Lösung wäre, den Feststoffgehalt von bisher 80 % auf > 95 ma% zu erhöhen, damit möglichst wenig nicht-magnetisches Material im gedruckten Kern vorliegt. Dies ist allerdings mit der bisherigen Filament-Technologie nicht umsetzbar, weil man die Partikel mit ausreichend Kunststoff verbinden und das Filament flexibel sein muss. Daher wurde zusätzlich ein Versuch mittels Pastendruck gestartet. Dafür werden die gemahlene Ferritpulver am IFAM zu einer Paste verarbeitet und anschließend bei Neotech verdrückt. Ein erster Prototyp konnte gedruckt werden und wurde anschließend elektrisch ausgewertet. Die Permeabilität war vergleichbar mit den bisherigen FFF-gedruckten Kernen, aber die neue Technologie ermöglicht eine deutliche Erhöhung des Feststoffgehalts, wodurch die Permeabilität theoretisch vervielfacht wird. Dieses Verfahren war aber nicht Bestandteil des Projekts und kann für Folgeprojekte genauer untersucht werden.

Die resultierenden Permeabilitäten der verschiedenen Pulvertypen ist in Abb.5 gezeigt. Ein Vergleich von A1-3 zeigt, dass A1 mit den größeren Partikeln die höchste Permeabilität aufweist, gefolgt von A3. Die Probe mit den kleineren Partikeln A2 hat eine geringere Permeabilität. Dies kommt daher, dass bei A1 mehr zusammenhängende Ferritmasse im Kern vorliegt, was gut für das Magnetfeld ist.

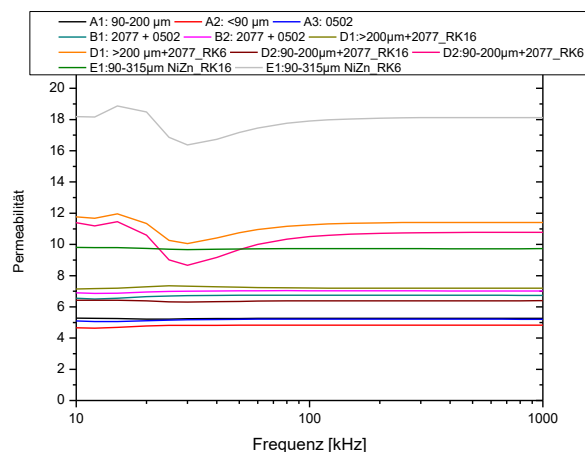


Abbildung 5: Initialpermeabilität der gedruckten Ringkerne bei Raumtemperatur

Im nächsten Schritt wurde versucht die Permeabilität zu erhöhen. Dafür wurde ein grobes und ein feines Ferritpulver gemischt und anschließend zu einem Filament verarbeitet (B1 und B2) und gedruckt. Es zeigt sich, dass durch das Mischen von unterschiedlichen Partikelgrößen eine deutliche Steigerung der Permeabilität auftritt. Dies kommt vermutlich daher, dass sich die feineren Partikel zwischen die Größeren setzen und dadurch ein kontinuierliches Magnetfeld ermöglichen.

Verarbeitbarkeit des Filaments und Charakterisierung:

Bei Neotech wurden zunächst Ringkerne gedruckt, um diese bei TWF und WE elektromagnetisch auswerten zu können. Bei den Ringkernmustern wurde neben den Materialien auch die Druckparameter erarbeitet und im kleinen Umfang variiert. Ein optimales Druckregime zu finden, stellte sich als herausfordernd heraus, da:

- Die Führung des Filaments durch die Sprödigkeit schwierig ist
- Das Filament sich an der Düsenöffnung ablagert und so für Verstopfungen sorgt und demnach regelmäßig gereinigt werden muss
- Der Ferrit im Druckprozess die Düse abgerieben hat
- Das Wärmebett definiert werden musste
- Die Wärmebehandlungen zwischen den Drucklagen angepasst wurden
- Das Ablösen der Kerne von der Druckunterlage schwierig war usw.

Dies sind alles technologische Probleme, die durch Anpassung des Materials/Filaments für eine bessere Druckqualität behoben werden können. So kann man z.B. einen Weichmacher im Filament verwenden oder die Partikelgrößen variieren. Aus Zeitgründen konnten keine Optimierungen erfolgen.

Sinterung von FFF-Ringkernen (Route A):

Bei der Untersuchung der Vor-Ferritroute wurden die gedruckten Kerne im Rohofen 66 bei 1100°C für 2,5 h unter Stickstoffatmosphäre langsam entbindert und im gleichen Prozess gesintert. Die verwendete Sinterkurve ist in Abb. 6 dargestellt.

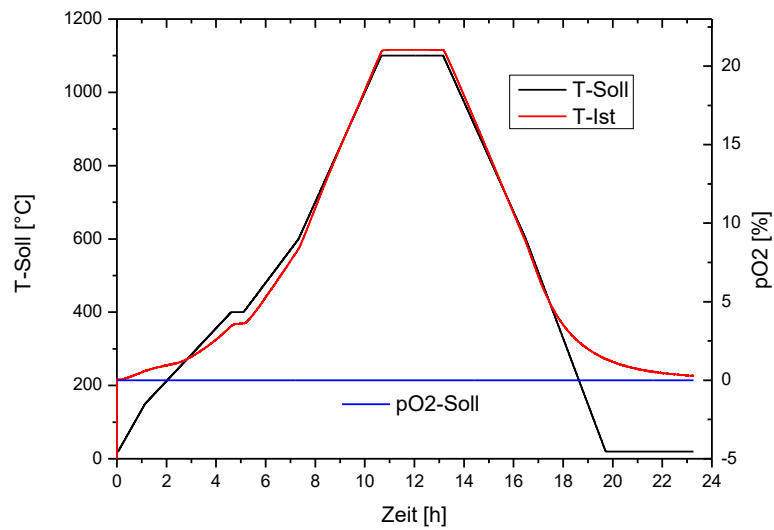


Abbildung 6: Entwickeltes Sinterprofil für Route A

Das erste Resultat von größeren und kleineren Kernen (H1_a) ist in der Grafik in Abb. 7 gezeigt. Die Permeabilität ist deutlich besser geworden. Zudem weist der große Kern sehr große Poren auf, wodurch die geringeren Wert erklärt werden.

Nach weiteren Anpassungen der Sinterung mit einer leichten Temperaturerhöhung auf 1180°C und ferrittypischer Atmosphärenführung konnten wesentlich höhere Permeabilitäten generiert werden. Diese kommen in die gewünschte Richtung von 100 (H1_b).

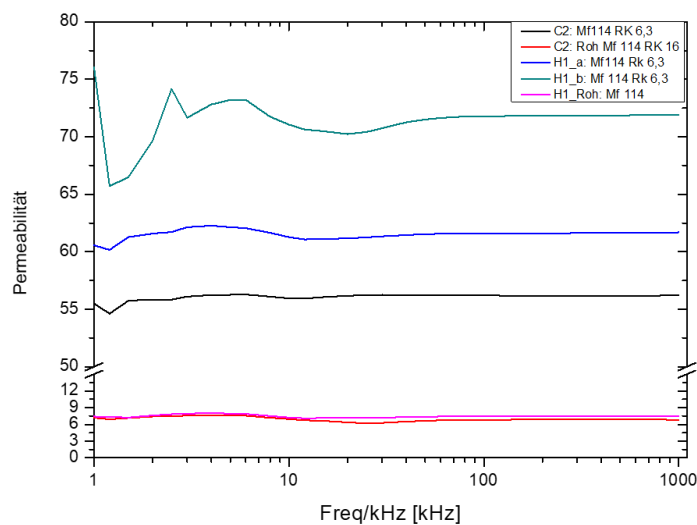
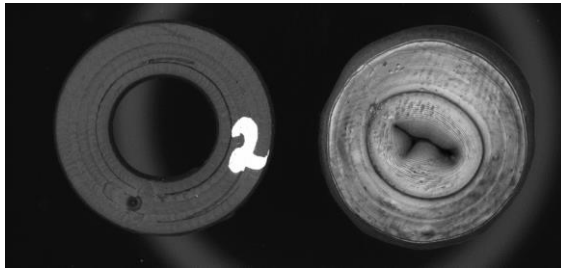


Abbildung 7: Initialpermeabilitäten der gesinterten Ringkerne

Die Verluste, die eine untergeordnete Rolle spielen, konnten an den Proben nicht gemessen werden. Die Ursache dafür sind vermutlich große Poren im Inneren des Kerns. Abb. 8 zeigt die Kerne vor und nach der Sinterung.

Großer Ringkern



Kleiner Ringkern

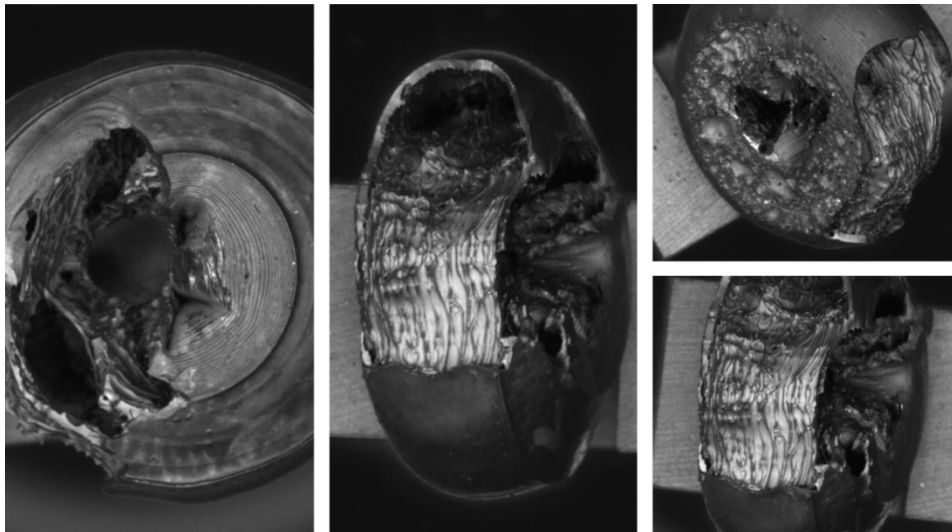
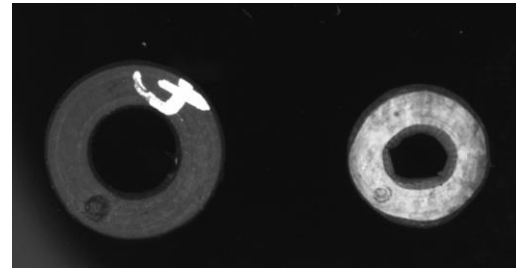


Abbildung 8: Übersicht der Kerne vor und nach dem Sintern

Route A) wurde aktuell mit der FFF-Technologie nicht weiterverfolgt, weil die Schwindungen und Veränderungen der Bauteile zu groß sind. Weiterhin ist es für die spätere Anwendung ehr unpraktisch. Diese Route könnte allerdings durch einen Pastendruck, wo weniger Kunststoff enthalten ist, wieder an Bedeutung erlangen und in künftigen Projekten untersucht werden.

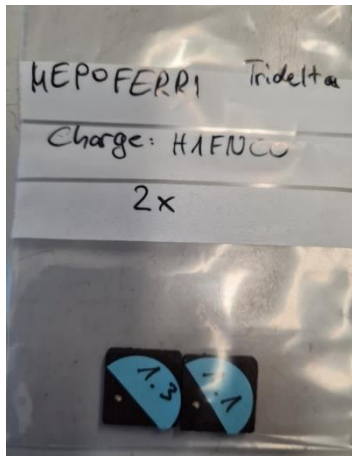
Charakterisierung der Demonstratoren Version 1:

In diesem Arbeitspaket wurde sich seitens der Hochschule Heilbronn mit dem Design und der Simulation von Induktivitäten befasst.

Der entwickelte Demonstrator umfasst einen 10x10x4 mm in Abmaßen kleines Bauteil mit 4 integrierten gedruckten Windungen als Schichtaufbau. (Abb.9) Es wurden sowohl Demonstratoren aus dem besten MZF-Komposit, sowie dem besten NZF-Komposit mit

den entwickelten Filamenten bei Neotech gedruckt. Die gedruckten Demonstratoren wurden an Würth Elektronik und Tridelta verschickt und elektrisch ausgewertet.

NZF



MZF



Abbildung 9: Demonstratoren der ersten Generation

Die Demonstratoren (Abb.10) wurden mit einem kurzen Kabel kontaktiert und dann elektromagnetisch ausgewertet. Es wurde zunächst die Induktivität (L_s) bestimmt und daraus versucht die Permeabilität zu berechnen, was zugegebenermaßen mit einem großen Fehler behaftet ist, da es für diesen Induktivitätentyp keine Umrechnungsvorgaben für die Kernparameter gibt. Es hat sich aber gezeigt, dass die angenommenen Kernparameter zu ähnlichen Permeabilitäten führen, wie bei der Materialuntersuchung am definierten Ringkern.

Wiegen des
Demonstrators



Messung von L_s am
MZF
G2FNCO



Messung von L_s am
NZF
H1FNCO



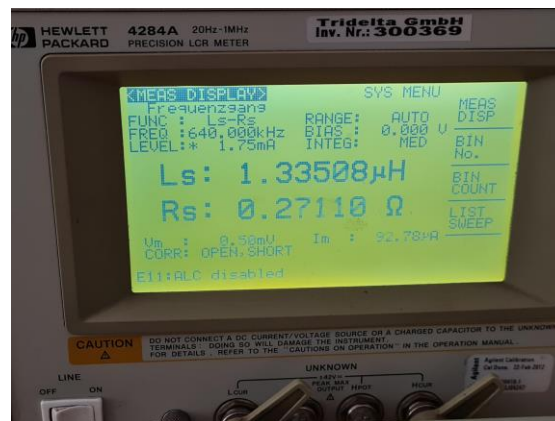


Abbildung 10: Kontaktierung und Messung der Initialpermeabilität am Demonstrator

In der Abb.11 sind die Messergebnisse dargestellt. Es wurden jeweils 2 Proben mit gleichem Material ausgewertet, um Streuungen zu kontrollieren. Die Induktivität ist bei geringen Frequenzen deutlich höher und fällt dann bis 12 kHz auf ein Minimum ab. Anschließend steigt Ls wieder ein wenig und ist dann bis zu höheren Frequenzen nahezu konstant. Ein signifikanter Unterschied zwischen den Werkstoffen ist nicht festzustellen. Es gibt allerdings einen geringfügigen Unterschied zwischen den H1FNC0-Demonstratoren, was vermutlich auf den Druckprozess zurückzuführen ist.

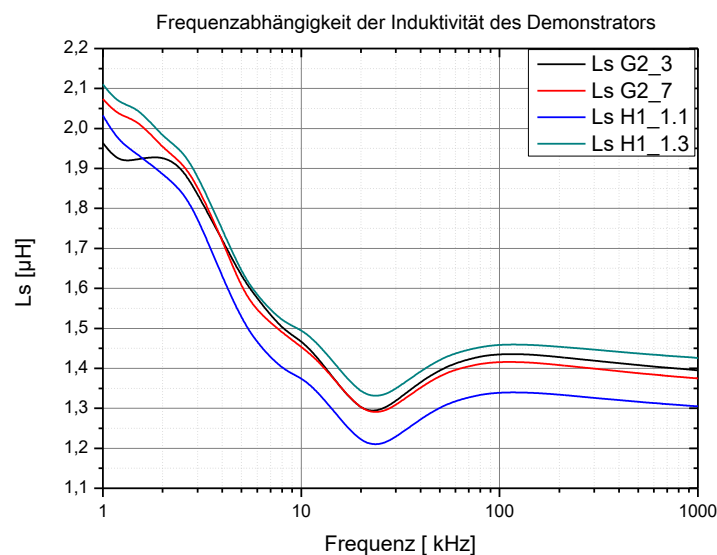


Abbildung 11: Induktivität über Frequenz am Demonstrator

Das zur Permeabilität umgerechnete Ls ist in Abb.12 dargestellt. Es bestätigt die Materialuntersuchungen am Ringkern.

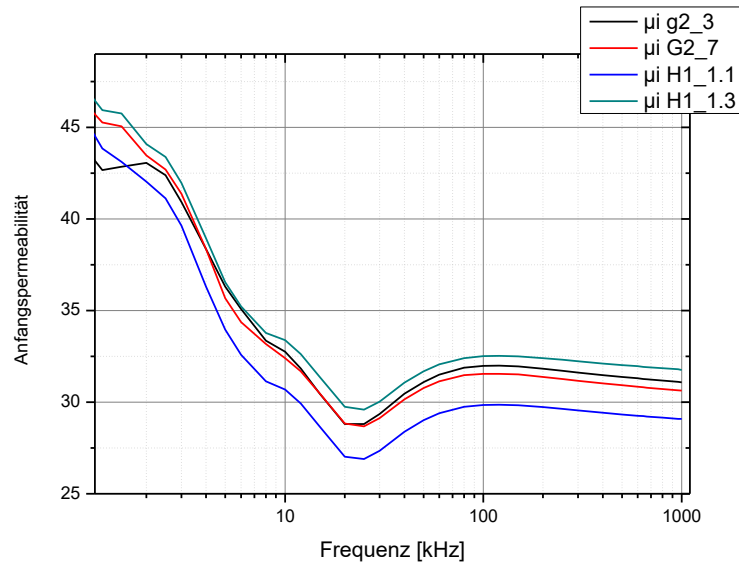


Abbildung 12: Permeabilität über Frequenz am Demonstrator

Anschließend wurden Verlustleistungen gemessen und in Abb. 13 dargestellt. Die Messparameter sind $B = 20 \text{ mT}$; $f = 16 \text{ bis } 800 \text{ kHz}$; $T = 25, 60 \text{ und } 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Es gibt keinen großen Unterschied zwischen den Demonstratoren. Die Temperaturabhängigkeit ist vorhanden, was eindeutiger auf den Einfluss des Ferrits zurückzuführen ist. Frequenzabhängigkeit ist ebenfalls vorhanden, mit einem Maximum der Verluste bei 400 kHz. Ab 400 kHz fallen die Verluste bis auf 0, was sehr untypisch ist und vermutlich ein Artefakt des Designs ist. Möglicherweise gibt es Kurzschlüsse zwischen den Metallschichten.

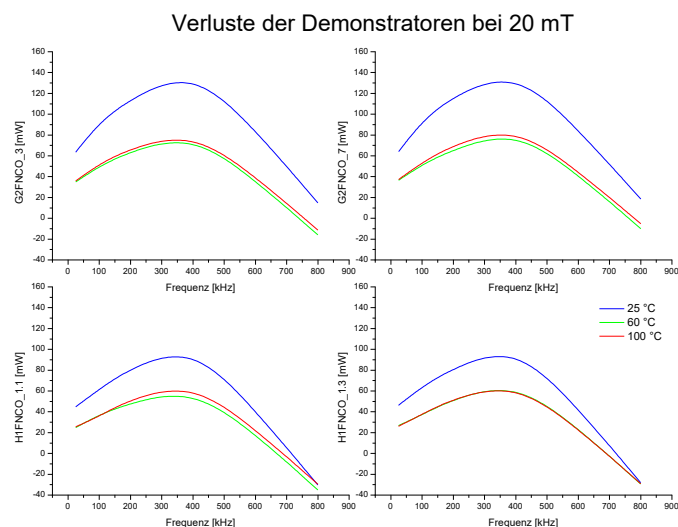


Abbildung 13: Verlustleistung der Demonstratoren über Frequenz

In Abb.14 sind die Messwerte über die Temperatur aufgetragen. Die Messparameter sind $B = 20 \text{ mT}$; $f = 16 \text{ bis } 800 \text{ kHz}$; $T = 25, 60 \text{ und } 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Eine Temperaturabhängigkeit ist eindeutig vorhanden, mit verringerten Verluste bei höheren Temperaturen, was eindeutig den Einfluss des Ferrits zeigt. Es gibt keinen nennenswerten Unterschied zwischen den Demonstratoren.

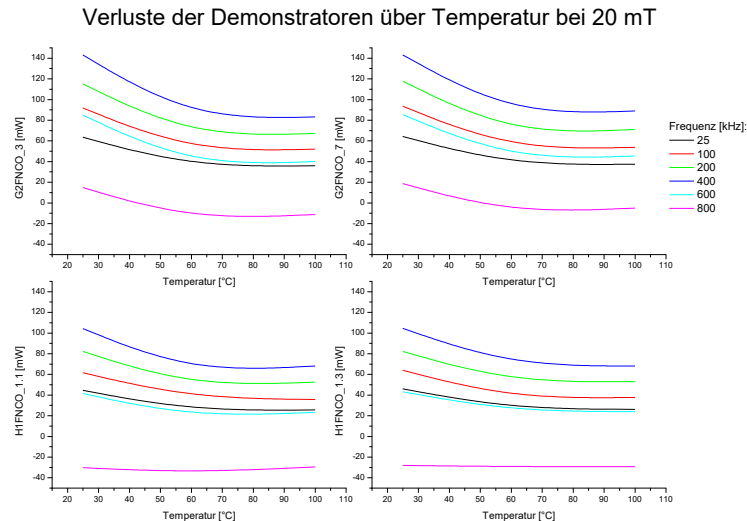


Abbildung 14: Verluste über Temperatur der Demonstratoren

In Abb.15 sind die Messwerte der Hysterese aufgetragen. Die Messparameter sind $H = 100 \text{ A/m}$; $f = 16 \text{ kHz}$; $T = 25 \text{ und } 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Eine Temperaturabhängigkeit ist eindeutig vorhanden, was eindeutig den Einfluss des Ferrits zeigt. Es gibt keinen nennenswerten Unterschied zwischen den Demonstratoren.

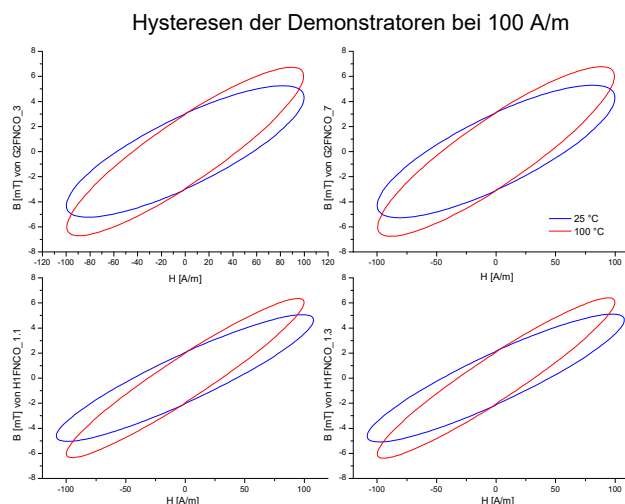


Abbildung 15: Hysteresen der Demonstratoren bei 25 und 100 °C

Folgende Trends können für die ersten Demonstratoren festgehalten werden:

- Zwischen den Materialsorten ist kein eindeutiger Unterschied erkennbar
- H1FNC0 ist ein wenig besser, aber nicht wesentlich
- Verlustleistungen sind sehr hoch und bilden ein Maximum bei 400 kHz
- Ab 400 kHz gehen die Verluste nach unten, das liegt aber vermutlich an internen Kurzschlüssen
- Verlustleistungen zeigen Temperaturabhängigkeit:
 - Sind bei Raumtemperatur höher
 - Minimal ab 70 °C, dann konstant im Messbereich
- Initialpermeabilität liegt, wie auch die vorherigen Demonstratoren um die 50
- Es bildet sich keine richtige Hysterese, mehr eine Ellipse ohne Sättigung
 - Temperaturabhängig
 - Feldabhängig

Dies zeigt, dass das Bauteil mit der neuen Technologie magnetische Eigenschaften aufweist, die durch das entwickelte Material bestimmt werden.

Im nächsten Schritt wurden die Ferritschichtdicken verdoppelt, weil festgestellt wurde, dass möglicherweise ein Kontakt zwischen den Metallisierungsschichten vorliegt, was zu Kurzschlüssen bei höheren Frequenzen führt.

Charakterisierung der Demonstratoren Version 2:

An dem neuen Demonstratordesign wurde nicht nur die Ferritdicke erhöht, sondern auch die Kontaktierung über Pads erleichtert. An der Draufsicht sind keine markoskopischen Defekte zu erkennen. Diese ist in Abb.16 gezeigt.

Mikroskopie: Draufsicht

MZF 2077 + > 200 µm Kugeln

NZF 90 – 315 µm



Abbildung 16: Draufsicht der Demonstratoren zweiter Generation

Bei der Kontaktierung in Abb.17 ist im Via zur ersten Metallisierungsschicht eine Vertiefung bei allen Proben sichtbar. Dieser Defekt hat aber bei der Messung nicht gestört.

Mikroskopie: Kontaktierung

Manchmal gibt es eine Vertiefung an der Via

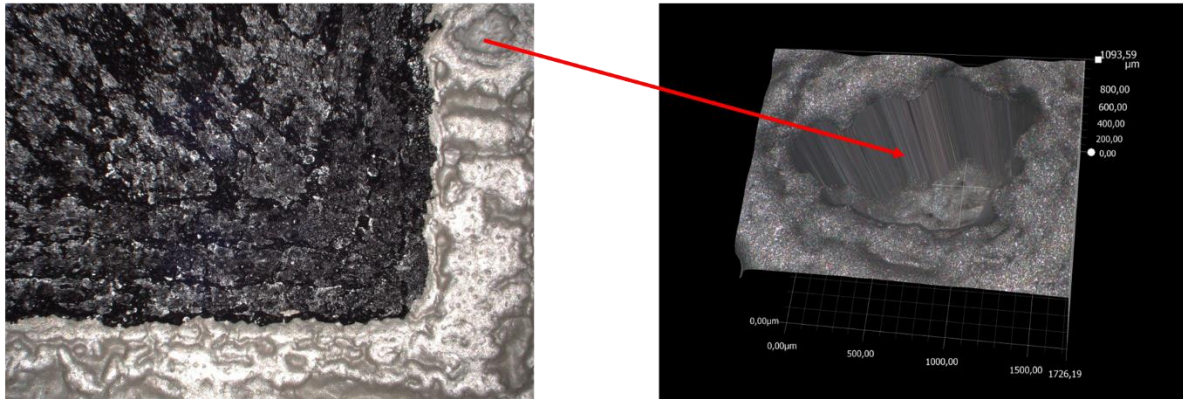


Abbildung 17: Betrachtung der Kontaktierung

In der Seitenansicht in Abb.18 sieht man den Schichtaufbau mit den einzelnen Layern. Der rotstich beim NZF kommt durch andere Belichtungseinstellungen am Mikroskop. Beide Proben sind ähnlich.

Mikroskopie: Seitenansicht

MZF 2077 + > 200 µm Kugeln

NZF 90 – 315 µm

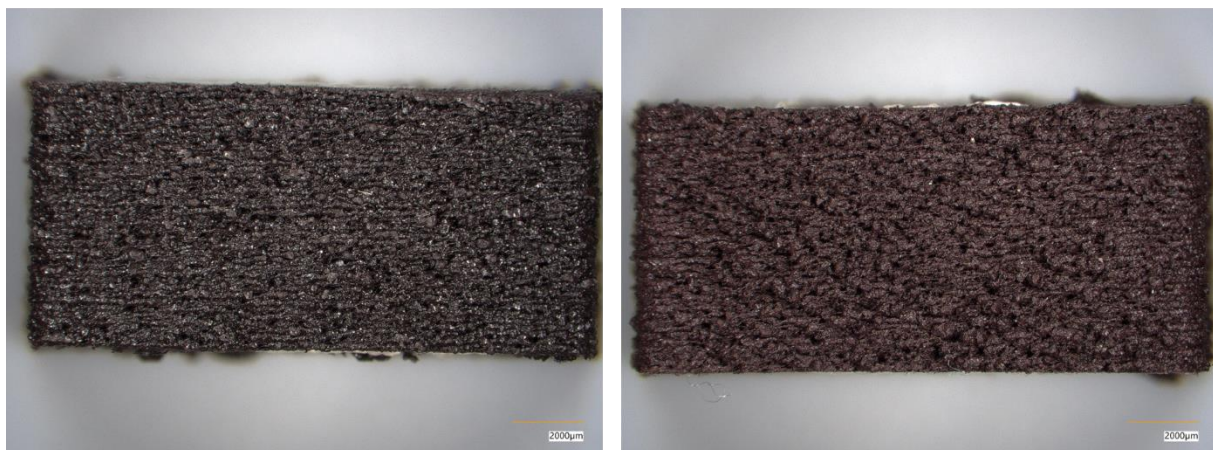


Abbildung 18: Seitenansicht der Demonstratoren

In der Nahaufnahme mit 1500x bei Abb.19 sind kleine Unterschiede zwischen den Demonstratoren zu erkennen. Beide zeigen noch offene Poren, wobei bei MZF tendenziell mehr sichtbar sind. Das könnte an unterschiedlichen Druckeigenschaften

der Filamente liegen. Eventuell ist das MZF-Filament etwas weniger gut aufschmelzend als das NZF-Filament und dadurch entstehen Poren beim Drucken.

Mikroskopie: 1500x Lichtmikroskop Balken sind 200 μm

Unterschiedliche Farben kommen von Beleuchtung; mit Koaxial schwarz mit Ringlicht Rot

MZF 2077 Probe 1, 6, 7, 8, 12

NZF 90 – 315 μm Probe 3, 4, 8, 10

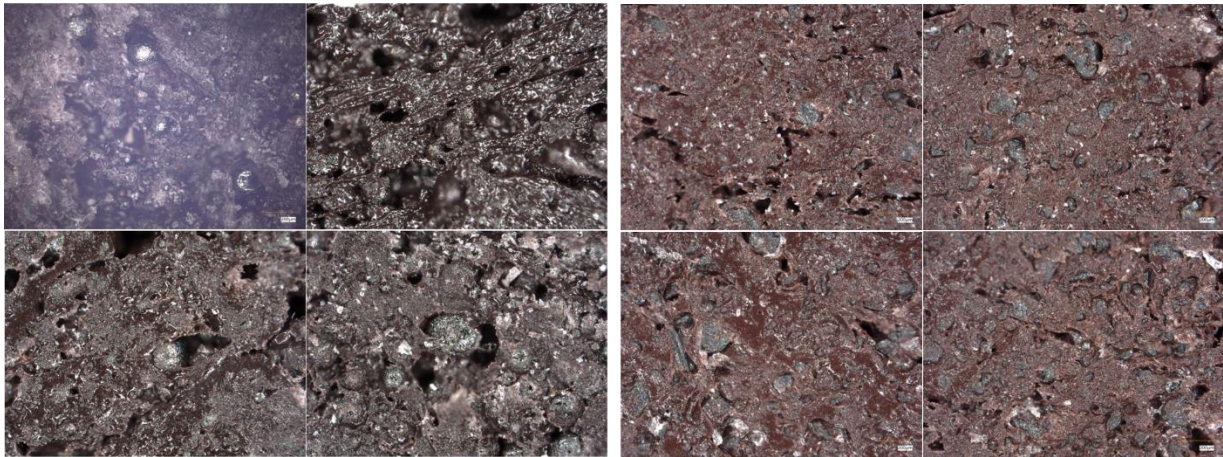


Abbildung 19: Strukturaufnahme der Demonstratoren

Eine genauere Betrachtung bei 2000x in Abb.20 zeigt den eingebrachten Ferrit. Bei MZF sind Kügelchen mit verschiedenen Größen deutlich sichtbar, die das Magnetfeld im Komposit weiterleiten. Man sieht auch, dass die Kügelchen nicht aneinander liegen und dadurch Luftspalte bilden. Beim NZF hingegen sind die Partikel nicht so eindeutig erkennbar. Es sind die grauen Partikel, die manchmal sichtbar sind. Die NZF-Partikel sind keine Kugeln, weil diese anders hergestellt wurden, es sind mehr Splitter. Der eindeutige und sichtbare Unterschied zwischen den Materialien führt, wie vorher gezeigt, nicht zu Änderungen der magnetischen Eigenschaften.

Mikroskopie: 2000x Lichtmikroskop

Bei MZF eine Ferritkugel und bei NZF silbrige Splitter

MZF 2077+ > 200 μm

NZF 90 – 315 μm

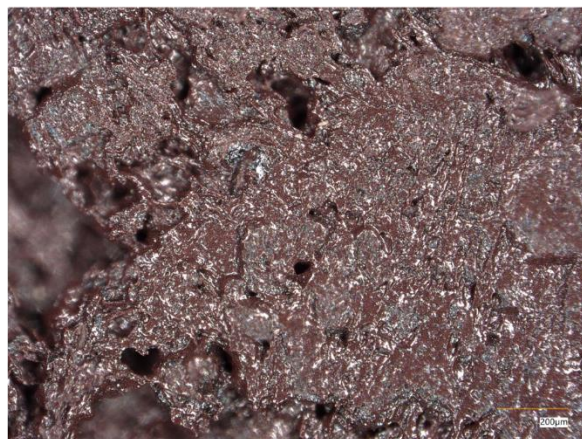
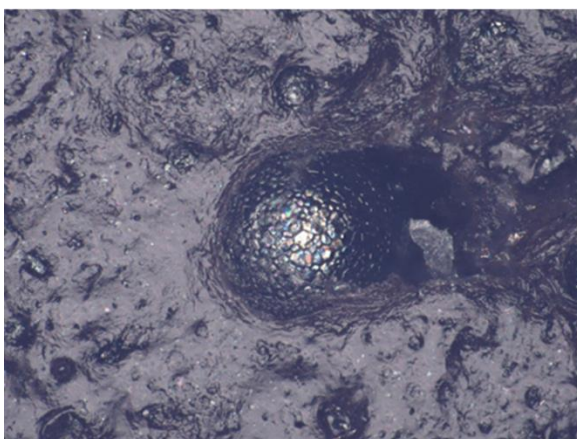


Abbildung 20: Nahaufnahme der Demonstratoren

Die magnetischen Auswertungen zeigen deutlich bessere Ergebnisse als am Demonstrator V1. Die Induktivität L_s , Abb.21, ist bei dem neuen Bauteil nahezu konstant mit leichter Senkung bei höheren Frequenzen. Das kann aber auch am Messverfahren liegen. Der Demonstrator MZF_01 ist ein wenig niedriger im Wert, aber sonst sind die restlichen Demonstratoren nahezu identisch. Im Vergleich zum Demonstrator V1 gibt es hier keinen starken Abfall von L_s bei 12 kHz. Dies lässt schlussfolgern, dass es bei den alten Demonstratoren mit zunehmender Frequenz Kurzschlüsse gab, die die Induktivität gesenkt haben. Die Optimierung der Ferritschichtdicke hat demnach funktioniert.

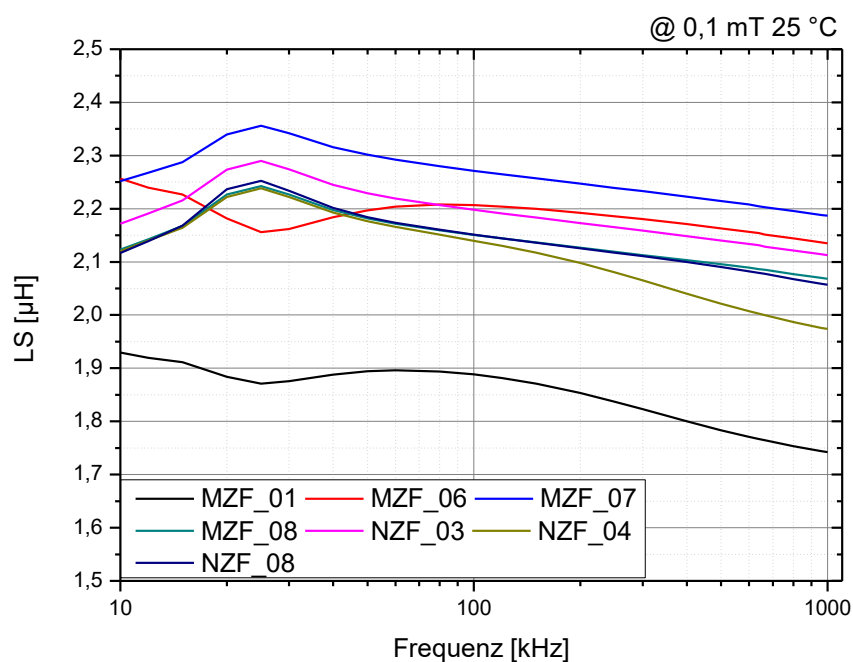


Abbildung 21: Induktivität über Frequenz der Demonstratoren

In Abb. 22 sind die Verluste bei 20 mT von den neuen Demonstratoren dargestellt. Es gibt keinen eindeutigen Unterschied zwischen den Materialien. Gezeigt sind die Grenzdemonstratoren (Min und Max). Die restlichen Demonstratoren liegen dazwischen. Es gibt ein ferrittypisches temperaturabhängiges Verhalten. Geringste Verluste bei Raumtemperatur, größere Verluste bei höheren Temperaturen. Im Vergleich zu Vollferrit sind die Verluste enorm hoch.

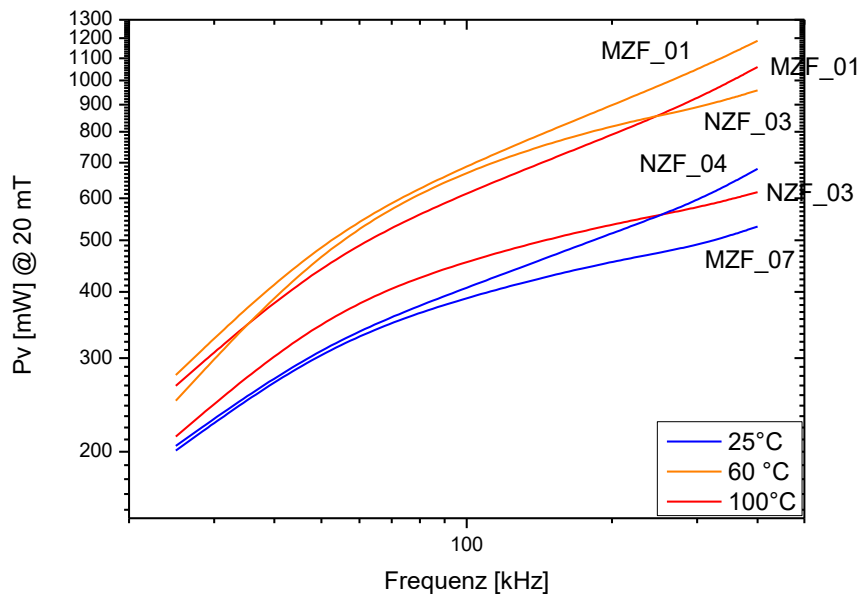


Abbildung 22: Streufeld der Verluste über Frequenz der Demonstratoren

Die Messung der Hysterese, siehe Abb 23, hat ergeben, dass die Demonstratoren, mit dem vorhandenen Setup, nicht in die Sättigung zu führen sind. Es bilden sich Ellipsen mit hohem remanenten B und hohem H_c . Zwischen MZF und NZF ist kein Unterschied festzustellen.

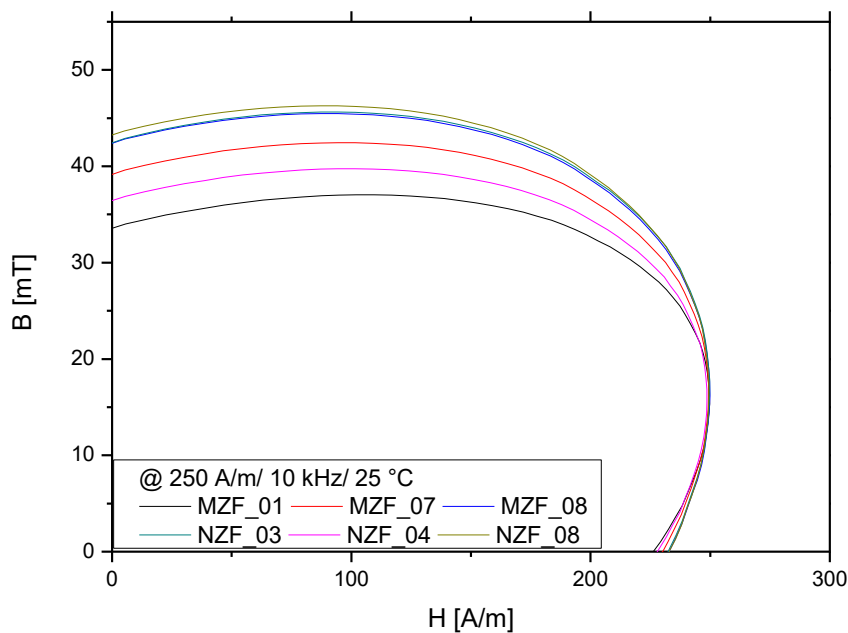


Abbildung 23: 2. Quadrant der Hysterese der Demonstratoren

Vergleich zur ursprünglichen Vorhabensbeschreibung:

Geplante Ziele	Ziel erreicht?	Bemerkung
Metall-Polymer-Filament	Nein	Es wurde vorerst auf eine Metallisierungspaste zurückgegriffen
Ferrit-Polymer-Filament	Ja	Mehrere Varianten
Generative Fertigung von Ferritbauteil/ Induktivitäten	Ja	
Kennwerte „Kupferspule mit Ferritkern“ erreichen	Ja	
Performancesteigerung	Teilweise	Langzeittests nicht Bestandteil der Versuche
Hybrides-Druckverfahren realisiert	Ja	Demonstratoren wurden in einem Prozess gedruckt; Ferritfilament und Metallisierungspaste
Erarbeitung des Pulverprozesses	Ja	
Bereitstellung von MnZn-Ferritquellen für FFF	Ja	Zusätzlich noch Ni-Zn-Ferrit, aber kein Performance-Unterschied festgestellt
Charakterisierung der Demonstratoren nach Verlustleistungen, Permeabilität, Frequenzstabilität, Curie-Temperatur und Sättigungsmagnetisierung	Ja, außer Curie-Temperatur	Messung der Curie-Temperatur war nicht möglich, wegen dem Polymer und der Metallisierung, was vorher schmelzen und Verbrennen würde, aber T_c liegt um die 230 °C

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es keinen eindeutigen Favoriten zwischen MZF und NFZ gibt. Bei allen Proben schlägt der Entmagnetisierungsfaktor und die Luftspalte zu. Ein Grund dafür sind die kugelförmigen Partikel, wobei die Partikelgröße für die magnetischen Eigenschaften nachrangig ist. Es ist vorstellbar, dass größere Partikel auch zu besseren magnetischen Eigenschaften führen, diese Größe ist in diesem Projekt allerdings durch die Filamentherstellung und -verarbeitung limitiert.

In allen Fällen sind die Permeabilitäten und Verlustleistungen signifikant schlechter als bei einem Vollferrit. Der Sachverhalt der Luftspalte bleibt stets bestehen, was die Permeabilität deutlich reduziert, da sich kein durchgehendes Magnetfeld im Kern

ausbilden kann. Weiterhin ist die Dichte durch den hohen Polymergehalt zu gering, was wiederum die Sättigungsmagnetisierung, die hier nicht weiter betrachtet wurde, ebenfalls reduziert.

Es wurde gezeigt, dass die FFF-Technologie funktioniert, aber die Eigenschaften des Ferrits werden dadurch signifikant abgeschwächt.

Ergänzungen zu:

Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises:

Position	Vorkalkulation [€]	Entstandene Kosten [€]	2021 [€]	2022 [€]	2023 [€]
Personalkosten	158581,92	45484,94	6275,08	22984,86	16225
Reisekosten	2448	1099,46	0	674,45	425,01

Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten:

Die tatsächlichen Arbeiten, die für das Projekt notwendig waren, wurden von Seitens der TRIDELTA Weichferrite GmbH umfassend geleistet. Es wurden sämtliche Herausforderungen der Projektumsetzung kosten und zeiteffektiv gemeistert. Der existierende Unterschied in den geplanten und benötigten Projektstunden ist dennoch sehr hoch, es wurde nur ein Drittel der geplanten Arbeitszeit benötigt. Dies hatte folgende Gründe:

- Engpass beim Forschungspersonal
- Unerwartetes Aufkommen von zusätzlichen Projekten (Planung/Antrag)
- Umzug der Fertigung/Labore/Technikum während Projektlaufzeit
- Weniger benötigte Pulvermengen als erwartet
- Weniger Untersuchungsaufwand am Pulver als erwartet
- Teilweise lange Bearbeitungs-/ Rückmeldungszeiten von Projektpartnern
- Größtenteils Wegfall eines Untersuchungsschwerpunkts (Route A) mit vielen Projektstunden

Voraussichtliche Nutzen, Verwertbarkeit der Ergebnisse:

Im Projekt „MEPOFERRI“ ist herausgekommen, welche Materialien und in welcher Konfiguration (u.a. Partikelgröße) zu bestimmten Ergebnissen führen. Darauf

aufbauend wird, wie im Projektantrag beschrieben, ein Ferritpulver für die generative Fertigung bis 2025 entwickelt und in größeren Mengen bereitgestellt.

MEPOFERRI-Produkt	Geplanter Zuwachs Umsatz & Arbeitsplätze (konservativ-progressiv)	Maßnahmen bis zum Markteintritt	Maßnahmen Verwertung (Marketing, Vertrieb)
Ferritpulver für generative Fertigung <i>Markteintritt: 2025</i>	2027: + 20 TEUR 2031: + 100 TEUR + 1 Mitarbeiter	Schrittweise Umsetzung der wissenschaftlichen Ergebnisse auf industriellem Maßstab	Testphase bei der kundenspezifischen Anwendung Aufnahme ins Portfolio

Wir werden auf Messen, z.B. PCIM 2025, bereits auf das kommende Produkt aufmerksam machen und unsere Kunden über die neue Möglichkeit der Komponentenherstellung informieren.

Fortschritte durch andere Stellen bekannt geworden?:

Auf dem Gebiet der gedruckten Ferritkomponenten gibt es nach aktueller Recherche keine kompetitiven Entwicklungen durch andere Marktteilnehmer. Lediglich durch ein weiteres internes Projekt sind neue Erkenntnisse entstanden, wie man gedruckte Ferritkomponenten mit einer anderen Technologie mit besseren magnetischen Eigenschaften herstellen kann. Dafür müssen diese aber noch gesintert werden.

Erfolgte oder geplante Veröffentlichung:

Im Rahmen des Projekts und in Abstimmung der Projektpartner, wird es eine Teilveröffentlichung der Ergebnisse in Form eines Informationsblattes zur entwickelten Technologie zum Drucken von Ferritkomponenten für Elektronikbauteile geben. Das Informationsblatt wird dann auf Anfrage von Kunden zu Ferritfilamenten weitergereicht oder auf Messen präsentiert.

Datum der Erstellung: 19.08.2024

Erstellt von: S. Bachmann
TRIDELTA Weichferrite GmbH
Robert-Friese-Straße 8-10
07629 Hermsdorf