MEPOFERRI

WÜRTH ELEKTRONIK
MORE THAN YOU EXPECT

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Abschlussbericht

für das Teilvorhaben:

Materialentwicklung für Hybride Metall-Polymer-Filamente für die generative Fertigung von Ferriten und Induktivitäten

im Verbundvorhaben „MEPOFERRI“

Hybride Metall-Polymer-Filamente für die generative Fertigung von Ferriten und Induktivitäten

Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2021 – 30.04.2024

Zuwendungsempfänger: Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Ansprechpartner: Christian Robert

Förderkennzeichen: 03XP0372A

MEPOFERRI

WÜRTH ELEKTRONIK MORE THAN YOU EXPECT

Abschlussbericht Teil I: Kurzbericht Projekt „MEPOFERRI“

Die Würth Elektronik eiSos als Hersteller von elektronischen und elektromechanischen Bauelementen adressierte in dem Vorhaben, zusammen mit den Projektpartnern Tridelta Weichferrite GmbH, dem Fraunhofer IFAM und der Neotech AMT das Ziel, neuartige Ferrit-Polymer-Komposite zu entwickeln. Diese Weiterentwicklung konventioneller Ferritmaterialien wird durch eine individualisierte werkstoffliche Kombination basierend auf MnZn- und NiZn-Ferriten realisiert.

Die sich dadurch eröffnende Möglichkeit zur additiven Fertigung induktiver Bauelemente gestattet eine signifikante Steigerung der Designfreiheitsgrade bei der künftigen Auslegung des Systems „Kupferspule mit Ferritkern“, welches u.a. ein zentraler Bestandteil diverser elektronischer Bauelemente darstellt.

Innerhalb dieses Teilvorhabens wurden neuartige Ferrit-Polymer-Ringkerne als Technologiedemonstrator additiv hergestellt und im Folgenden messtechnisch auf ihre elektrischen Eigenschaften hin charakterisiert. Die gewonnen Erkenntnisse wurden im Anschluss an die Projektpartner zur Optimierung der herzustellenden Ferrit-Polymer-Filamente übermittelt, so dass eine deutliche Verbesserung der elektrischen Eigenschaften erzielt werden konnte.

Mit Hilfe der ermittelten Eigenschaften wurden erste, additiv hergestellte Ringkerne durch ein FEM-Basismodell modelliert und deren Verhalten simuliert. Im Rahmen der FEM-Modellierung wurde darüber hinaus eine Parameterstudie hinsichtlich des Einflusses verschiedener Kenngrößen durchgeführt. Aus den bis dahin gewonnen Erkenntnissen wurden, erste Produktdemonstratoren konstruiert sowie modelliert und im Anschluss additiv hergestellt.

Die metrologische Charakterisierung der ersten Produktdemonstratorgeneration offenbarte dabei notwendige Optimierungsbedarfe. Zur Erkenntnisgewinnung wurden neben elektrischen Messverfahren auch CT-Analysen eingesetzt. Die gewonnen Erkenntnisse dienten im Anschluss als Grundlage für die Ausarbeitung der zweiten Produktdemonstratorgeneration.

Anhand dieser Produktdemonstratoren konnte gezeigt werden, dass eine Speicherinduktivität grundsätzlich additiv realisiert werden kann. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass weitere Optimierungen additiv hergestellter Speicherinduktivitäten nötig sind, um dieses Verfahren zukünftig für die Herstellung elektronischer Bauteile zu nutzen.

Abschlussbericht Teil II: Eingehende Darstellung Projekt „MEPOFERRI“

1 Ursprüngliche Aufgabenstellung und Stand Wissenschaft und Technik

Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse stellen Arbeiten innerhalb des Verbundprojektes MEPOFERRI dar. Kapitel 2.1 geht kurz auf die hergestellten Ferrit-Polymer-Komposit-Filamente ein und zeigt die daraus erhaltenen Versuchsproben. In Kapitel 2.2 wird auf die erzielten Messergebnisse der Versuchsproben eingegangen, die in Kapitel 2.3 für die Simulation der Produktdemonstratoren genutzt wurden. Kapitel 2.4 stellt die erzielten Produktdemonstratoren und ihre messtechnische Charakterisierung dar.

2. Eingehende Darstellung

2.1 Herstellung von Ferrit-Polymer-Komposit-Filamenten

Für die Herstellung der Ferrit-Polymer-Komposit-Filamente stellte der Projektpartner Tridelta unterschiedliche Ferrit-Pulver bereit, welche sich in Korngröße und Form unterschieden. Die Herstellung der Filamente erfolgte dabei durch das Fraunhofer IFAM. Tabelle 1 zeigt dabei die Korngrößen und Eigenschaften ausgewählter unterschiedlicher Ferritfilamente.

Tab. 1: *Versuchsproben, deren Eigenschaften und grundsätzliche Verarbeitungsparameter*

Versuchsproben	Füllmaterial	Düsendurchmesser	Schichthöhe
A1 (MnZn)	20 – 200 µm (kugelförmiges Ferrit)	0,6 mm	0,2 mm
A2 (MnZn)	<90 µm (kugelförmiges Ferrit)	0,8 mm	0,2 mm
A3 (MnZn)	Ferritgranulat	0,6 mm	0,2 mm
B1 (MnZn)	Ferritpulver (D50 ca. 8µm) + Ferritgranulat	0,8 mm	0,2 mm
B2 (MnZn)	Ferritpulver (D50 ca. 8µm) + Ferritgranulat	0,8 mm	0,2 mm
C1 (MnZn)	MF114 (nicht gesintertes Vorferrit)	0,8 mm	0,2 mm
C2 (MnZn)	MF114 (nicht gesintertes Vorferrit)	0,8 mm	0,2 mm
G1 (MnZn)	Ferritpulver (D50 ca. 8µm) + 90 – 200 µm	0,8 mm	0,2 mm
G2 (MnZn)	Ferritpulver (D50 ca. 8µm) + > 200 µm	0,8 mm	0,2 mm
H1 (NiZn)	90 – 315 µm	0,6 mm	0,2 mm

Als Matrixpolymer wurde im Laufe des Projektes der Kunststoff Pa6 Copolymer Pebax von Arkema ausgewählt und verarbeitet. Im Anschluss wurde durch die Neotech AMT eine Parameterstudie zur Ermittlung passender Druckparameter durchgeführt und Ringkerne aus den unterschiedlich zusammengesetzten Ferritfilamenten gedruckt. Die Herstellung der Ringkerne erfolgte dabei durch das Fused-Filament-Fabrication-Verfahren (FFF).

2.2 Elektrische Charakterisierung der Technologiedemonstratoren

Um einen guten Vergleichswert mit konventionell hergestelltem Ferrit zu erhalten, wurde für die elektrische Charakterisierung der gedruckten Ferrit-Polymer-Komposit-Filamente ein Ringkern als Technologiedemonstrator mit den folgenden Maßen definiert: Außendurchmesser: 16 mm, Innendurchmesser: 8 mm, Höhe: 8 mm.

Abb. 1: gedruckte Ringkerne aus Ferritfilament

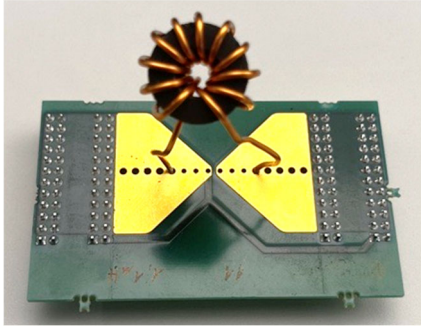


Abb. 2: bewickelter und für die Charakterisierung vorbereiteter Ringkern

Die Materialkennwerte der gedruckten Ringkerne wurden im weiteren Projektverlauf für die parallel verlaufenden Modellierungen und Simulationen der Technologie- als auch Produktdemonstratoren genutzt. Eine ausführliche Beschreibung der Simulations- und Modellierungsarbeiten findet sich in Kapitel 2.3.

2.2.1 Charakterisierung der relativen Permeabilität

Mit dem Vergleich der komplexen Permeabilität unterschiedlicher MEPOFERRI-Ringkern-Muster konnten zum einen die hergestellten Ferrit-Polymer-Komposit-Filamente charakterisiert und zum anderen auch Rückschlüsse auf die Prozessstabilitäten während des Druckes gezogen werden. Die entscheidenden Kriterien liegen dabei in der Herstellung der Ferritfilamente sowie bei der Wahl der für das hergestellte Ferritfilament angewendeten Druckparameter zur Herstellung der Ringkern-Muster.

Als Vergleichswert zu den ermittelten spezifischen Permeabilitätswerten der gedruckten Ringkerne wurde ein solider Nickel-Zink-Ferrit (Ref_NiZn) gemessen, der mit Hilfe von Sinterungsprozessen seine Eigenschaften erhält.

Die gedruckten Ringkerne zeigen eine erwartungsgemäß geringe spezifische Permeabilität auf, da aufgrund des Herstellungsverfahrens mit einem hochgefüllten Ferritfilament, ein

verteilter Luftspalt in den Ringkern eingefügt wird, welcher eine Senkung der magnetischen Leitfähigkeit bewirkt. Dieser verteilte Luftspalt entsteht durch die Isolation der einzelnen ferritmagnetischen Körner aufgrund der im Filament enthaltenen Bindemittel (Kunststoffe), ohne diese das Filament jedoch nicht druckbar wäre, sondern ein hartes und sprödes Material vorliegt (Ferritkeramik). In Abhängigkeit des verwendeten Ferritmaterials lag die spezifische Permeabilität zwischen 3 und 6 (Abb. 3). Dabei zeigte sich, dass die Ferritmaterialien G1 und G2 mit einer Zusammensetzung von sehr feinen Ferritkörnern und gröberen Ferritkörnern (Ø = 8 µm + 90 – 200 µm (G1) und Ø = 8 µm + > 200 (G2)) die höchsten (komplexe) relative Permeabilitäten erlaubten. Ähnliche Ergebnisse erreichte das Ferritmaterial B1 mit einer Ferritpulver und -granulat Zusammensetzung.

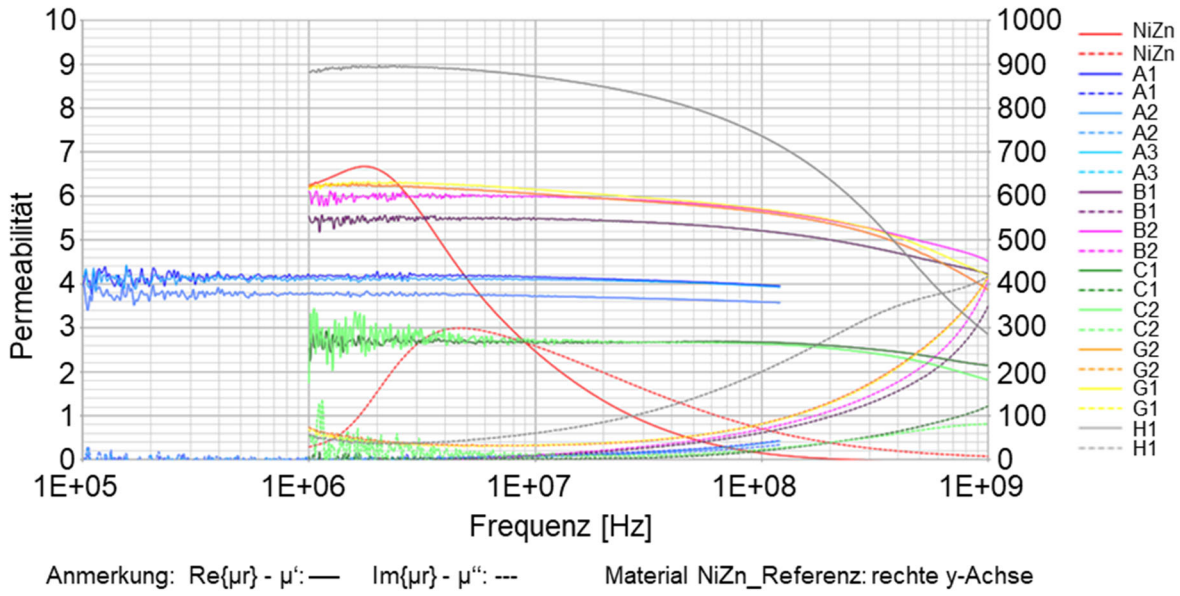


Abb. 3: Messdaten der Frequenz vs. Permeabilität gedruckter Ferrit-Ringkerne und Referenzmaterial

Aus diesen ersten Untersuchungen schlussfolgernd, konnte festgestellt werden, dass Aufgrund der niedrigen rerlativen Permeabilitäten sich gedruckte Ferritbauteile weniger für den Einsatz als Entstörbauteil eigen, da für diesen Einsatzzweck höhere Permeabilitäten benötigt werden, um die geforderten Dämpfungseigenschaften bei ungewollten Frequenzbereichen zu erzielen.

Beispielhafte Einsatzgebiete gedruckter Ferrite könnten daher im Leistungselektronikbereich angesiedelt sein. Hier kommen heutzutage oftmals eisenpulverbasierte Materialien zum Einsatz die einen verteilten Luftspalt nutzen, um die Sättigung des Bauteils so weit wie möglich zu höheren Strömen zu verschieben und als Folge dessen, ebenfalls niedrige Permeabilitäten besitzen. Aufgrund dessen wurde als Referenzmaterial ein Carbonyl Eisenpulver ausgewählt.

2.2.2 Charakterisierung der spezifischen Sättigung

Um eine aussagekräftige Beurteilung zu erhalten, ob ein Einsatz gedruckter Ferritmaterialien im Bereich der Leistungselektronik sinnvoll ist, wurde die spezifische Sättigung des Ferritmaterials B1 untersucht und mit einem Carbonyl-Material verglichen.

Hierzu wurden zunächst Ringkernmuster mit einem Lackdraht bewickelt. Mit Hilfe eines LCR-Meters wurde bei einer Frequenz von 10 kHz die Anzahl der benötigten Windungen zum Erreichen einer Induktivität von 1 µH bestimmt.

Es zeigte sich, dass bei dem verwendeten Carbonyl-Muster 7 Windungen und beim B1-Muster 11 Windungen nötig waren, um eine Induktivität von 1 µH zu erzielen. Dies ist ein Hinweis darauf, dass die Permeabilität beim Carbonyl-Muster höher ist.

Um einen tieferen Einblick in die Sättigung der Materialien zu erlangen, kamen zwei unterschiedliche Messprinzipien zur Anwendung. Zum einen ein Pulstester (Abb. 5), der über Spannungsimpulse Ströme induziert und einem LCR-Meter welches ein Messsignal mit einem DC-Offset beaufschlagt.

Mit Hilfe dieser beiden Messverfahren konnte eine detailliertere Betrachtung der unterschiedlichen Sättigungsgrade ermöglicht werden. Es zeigte sich, dass sich bei dem Carbonyl-Material durch mehr Windungen die Sättigung früher und deutlicher ankündigt, da infolgedessen, ein höherer magnetischer Fluss hervorgerufen wird.

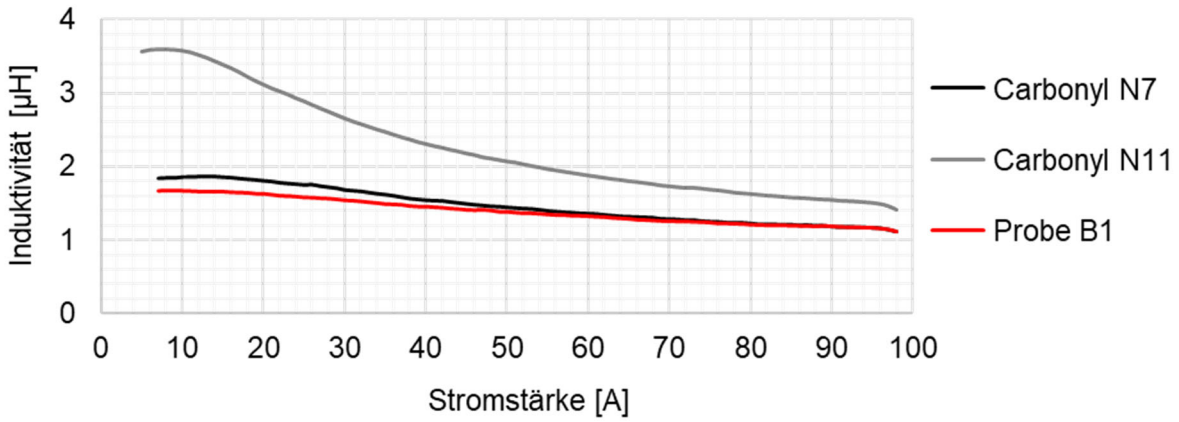


Abb. 4: Bestimmung der Induktivität mittels Ed-K Pulstester

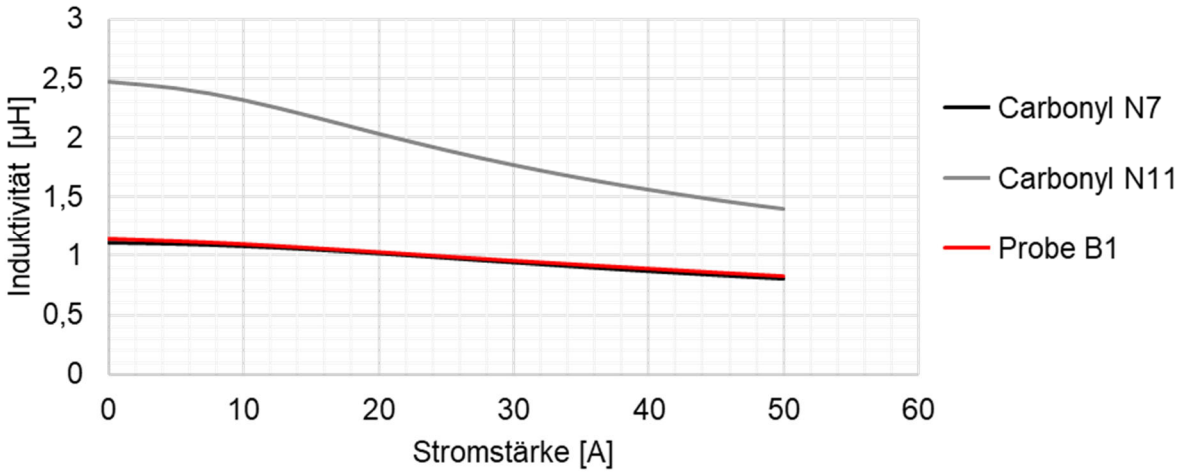


Abb. 5: Bestimmung der Induktivität mittels Wayne Kerr

2.2.3 Charakterisierung der spezifischen Verluste

Für die qualitative Charakterisierung der spezifischen Verluste und zum Vergleich zwischen den unterschiedlichen Ferritmaterialien und dem Standard Carbonyl-Material wurde ein Messverfahren verwendet, welches die Verluste im realen Bauteil aufzeigt. Dies entspricht methodisch einem DC-DC-Converter und soll aussagekräftige Daten zu den Verlusten im späteren Einsatz liefern.

Dabei ist zu beachten, dass die verwendeten Bauteile (Ringkerne mit Wicklung) möglichst den gleichen Induktivitätswert bei einer Frequenz aufzeigen, sowie das Volumen möglichst gleich ist. Um einen vergleichbaren Induktivitätswert zu erhalten, wurde die Frequenz von 10 kHz gewählt und anschließend über die Windungsanzahl so weit wie möglich angeglichen. Für die Bestimmung der spezifischen Verluste bei vergleichbaren Volumen, wurde mathematisch aus den erhaltenen Messwertkurven der absolute Verlust in Abhängigkeit vom Volumen berechnet. Für die Berechnungen wurden die vorab definierten Ringkernmaße von (16 x 8 x 8) mm angesetzt.

Die Verlustmessungen wurden für ausgewählte Ringkernmuster sowie für das Carbonyl-Material durchgeführt und miteinander verglichen. Tabelle 2 zeigt dabei die erhaltenen Messwerte.

Auffällig ist eine gewisse Varianz zwischen den untersuchten Prüfmustern. Es ist dabei wahrscheinlich, dass dies auf die unterschiedlichen Materialzusammensetzungen des Ferritfilamentes, als auch auf den verwendeten Fertigungsprozess zurückzuführen ist. Weitere Einflussfaktoren sind dabei mögliche Inhomogenitäten innerhalb der Versuchsproben sowie die Maßhaltigkeit der gedruckten Probenkörper. Einige der Muster zeigen dabei geringere Verluste, als das etablierte Carbonyl-Material und können somit für einen Einsatz im Bereich der Leistungselektronik in Betracht gezogen werden. Herauszuheben ist dabei das Versuchsmuster H1, welches über die Gesamtheit betrachtet die besten Kennwerte liefert.

Tab. 2: *Vergleich der spezifischen Verluste*

		Carbonyl	A1	A2	A3	B1	G1	G2	H1
Frequenz	U_{source}		P_{ac}/V [W/cm³]	P_{ac}/V [W/cm³]	P_{ac}/V [W/cm³]	P_{ac}/V [W/cm³]	P_{ac}/V [W/cm³]	P_{ac}/V [W/cm³]	P_{ac}/V [W/cm³]
1,00E+05	10	1,282	0,660	1,238	0,859	1,500	0,937	0,862	1,049
1,00E+05	15	3,469	1,596	3,073	2,128	3,952	2,189	2,109	3,443
1,00E+05	20	6,249	3,071	5,528	3,935	7,466	4,205	3,837	6,406
5,00E+05	10	0,231	0,097	0,133	0,091	0,112	0,113	0,121	0,093
5,00E+05	20	1,040	0,400	0,730	0,430	0,719	0,513	0,488	0,467
5,00E+05	30	2,651	0,960	1,904	0,988	1,938	1,096	1,130	1,474
1,00E+05	40	2,420	0,804	1,452	0,811	1,282	1,001	0,981	0,966
1,00E+05	50	3,925	1,341	2,555	1,387	2,352	1,653	1,635	1,758

2.3 Simulation und Produktdemonstratoren

2.3.1 Multiphysikalische Simulation

Basierend auf den zuvor beschriebenen Spezifikationen wurde für einen ersten Technologiedemonstrator ein FEM-Basis- bzw. Referenzmodell zur Abbildung korrespondierender Streu- und Impedanzparameter (S-Parameter, Z-Parameter) aufgebaut. Dabei wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie der Validierung äquivalente Modelle mittels der Simulations-Software Ansys und COMSOL Multiphysics® realisiert. Die FEM-Modelle gestatten dabei die Implementierung der vorab ermittelten materialspezifischen Mess- und Referenzdaten, was für die Vorhersage des Bauelementverhaltens von großer Relevanz ist. Erste FEM-Modelle basierten zu Beginn auf

vorhanden Daten konventioneller Standardringkerne, konnten durch die erfolgreiche Entwicklung und Herstellung der Ferrit-Polymer-Komposit-Filamenten iterativ durch Messdaten der gedruckten und charakterisierten Technologiedemonstratoren ersetzt werden, um die Einsatzmöglichkeiten der generativ gefertigten Ferritkerne gemäß den erzielten Kenndaten zu erörtern.

Im weiteren Verlauf wurden überdies komplexere Ferritkerngeometrien bis hin zu einem Modell eines Produktdemonstrators aufgebaut und simulationsgestützt charakterisiert. Durch eine iterative Optimierung der FEM-Modelle, insbesondere unter Berücksichtigung anlagenspezifischer Gestaltungsregeln bzgl. des FFF-Drucks und des PiezoJet-Verfahrens, konnten erste Produktdemonstratoren gefertigt werden.

2.3.2 Multiphysikalische Simulation des Technologiedemonstrators

Für die angestrebte Applikationen im Hochfrequenzbereich ist primär die Untersuchung von Streuparametern zur Beschreibung eines Netzwerks auf Grundlage von Wellengrößen

angezeigt. Anhand von Wellenstreuungsphänomenen können die Eigenschaften von Schaltungen mit multiplen Ein- oder Ausgängen aus messtechnischer Perspektive gegenüber Impedanzen oder Admittanzen verhältnismäßig einfach bestimmt werden. Die genaue Anzahl der zu ermittelnden Streuparameter (S-Parameter) korreliert dabei mit der Anzahl der Tore. Im Falle des vorliegenden FEM-Basismodells wurde der Eingangsreflexionsfaktor S11, das Verhältnis von reflektierter Welle zu eingehender Welle an Tor 1 ohne eine Anregung am entsprechenden Ausgang von Tor 2, bestimmt. Des Weiteren wurde die korrespondierende Impedanz-Charakteristik (Z-Parameter) des Ringkernmodells numerisch untersucht. Für eine adäquate Eichung der Referenzmodelle wurden die entsprechenden vorab erzielten Messdaten genutzt (z.B. S-Parameter S11, Z-Parameter, komplexe relative Permeabilität (μ‘ bzw. μ“)). Diese wurden als Instrument der Qualitätssicherung in die Modelle implementiert. Der dadurch ermöglichte, unmittelbare Abgleich der Ergebnisse erlaubt eine Generierung möglichst kongruenter Resultate.

Abb. 6: Gedruckte Technologie-demonstratoren (Bild Fraunhofer IFAM)

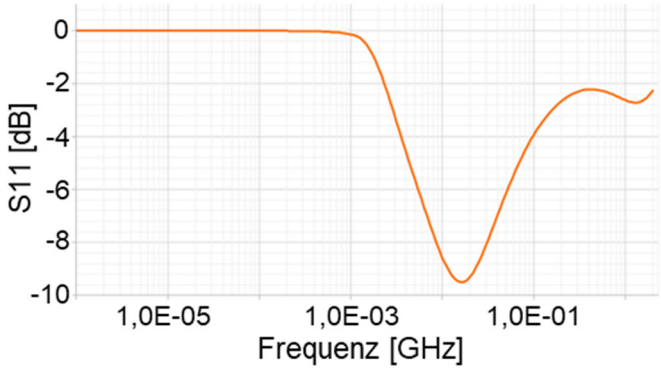


Abb. 7: S-Parameter Ringkern FEM-Simulation

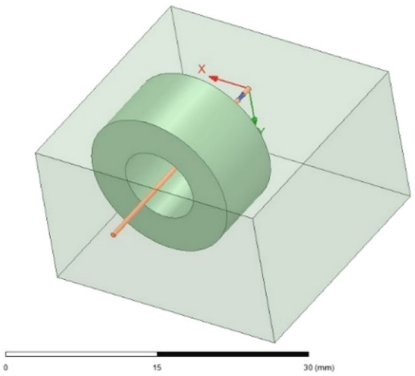


Abb. 8: FEM-Modell Ringkern

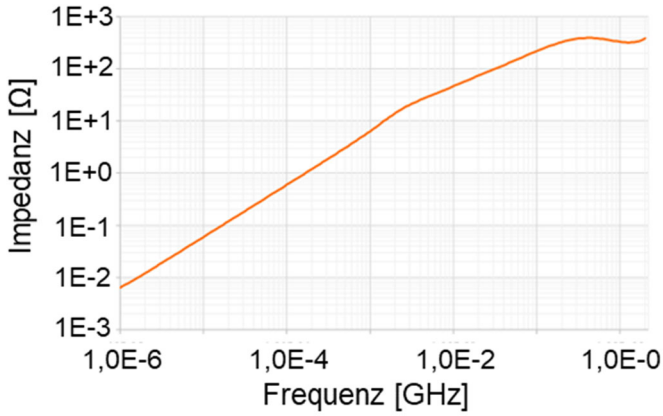


Abb. 9: Z-Parameter Ringkern FEM-Simulation

Im Rahmen der FEM-Modellierung wurde darüber hinaus eine Parameterstudie hinsichtlich des Einflusses verschiedener Kenngrößen auf den Eingangsreflexionsfaktor durchgeführt. Das Basismodell bestand dabei aus dem einführend beschriebenen Ringkern sowie einem

einfachen Kupferkabel, welches durch die Mitte des Ferritkerns verläuft. Im ersten Schritt wurde dabei eine Variation der Kabellänge gemäß charakteristischer Maße im industriellen Umfeld (25mm-200mm) vorgenommen.

Bestimmt wurden diesbezüglich u.a. die Grenzfrequenz mit $f_{-3dB} \cong 3{,}0$MHz, die jeweilige Peakfrequenz f_{Peak} sowie die Steigung der S-Parameter-Kurve von ≅ 8,3 dB/dek (Abb. 8). Zusätzlich wurden der Einfluss des Kabeldurchmessers (500 µm – 200 µm) sowie potenzielle Veränderungen der Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Position des Ports (Abb. 10), welcher für die Bestimmung der Streuparameter unabdingbar ist, ermittelt. Eine Variation bzw. Erhöhung des Kabeldurchmessers mündete dabei in einer Zunahme des Eingangsreflexionsfaktors. Zudem war eine leichte Steigerung der Peakfrequenz f_{Peak} zu beobachten. Die entsprechenden Resultate der Parameterstudie können der Simulationsmatrix in Tabelle 3 entnommen werden.

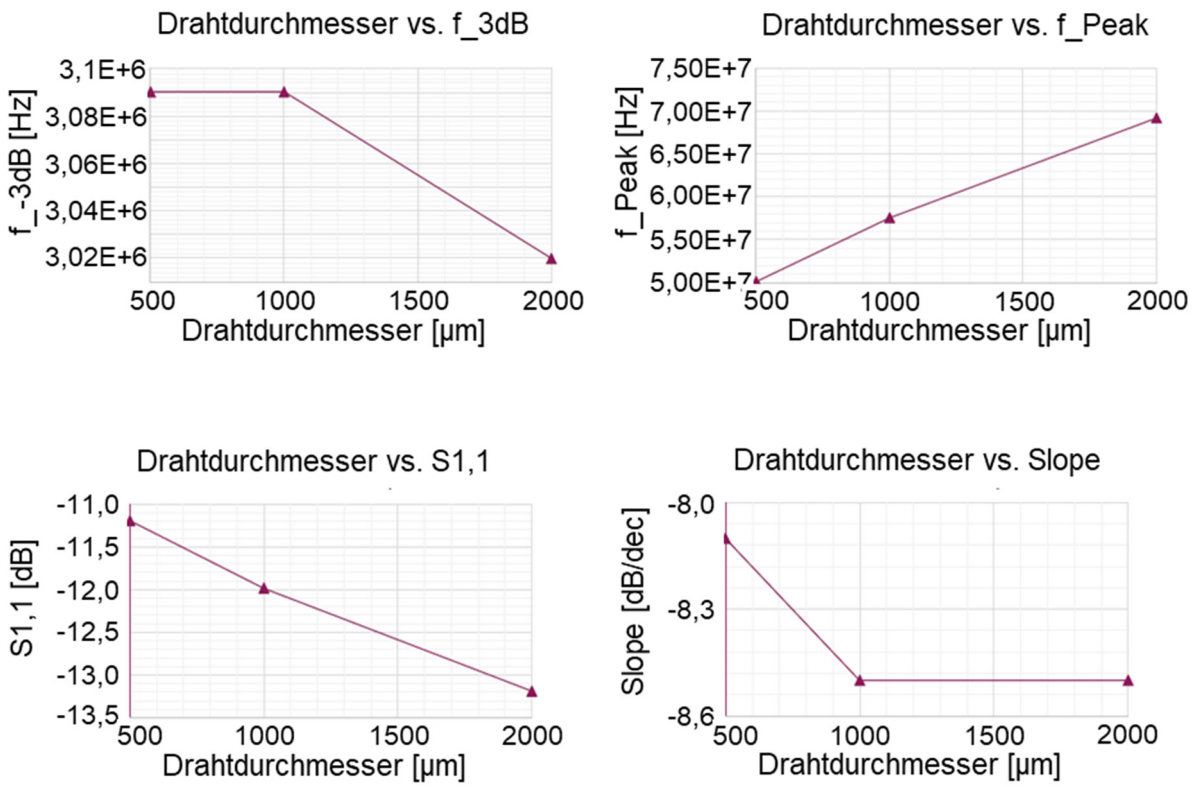


Abb. 10: Simulationsergebnisse in Abhängigkeit des Drahtdurchmessers

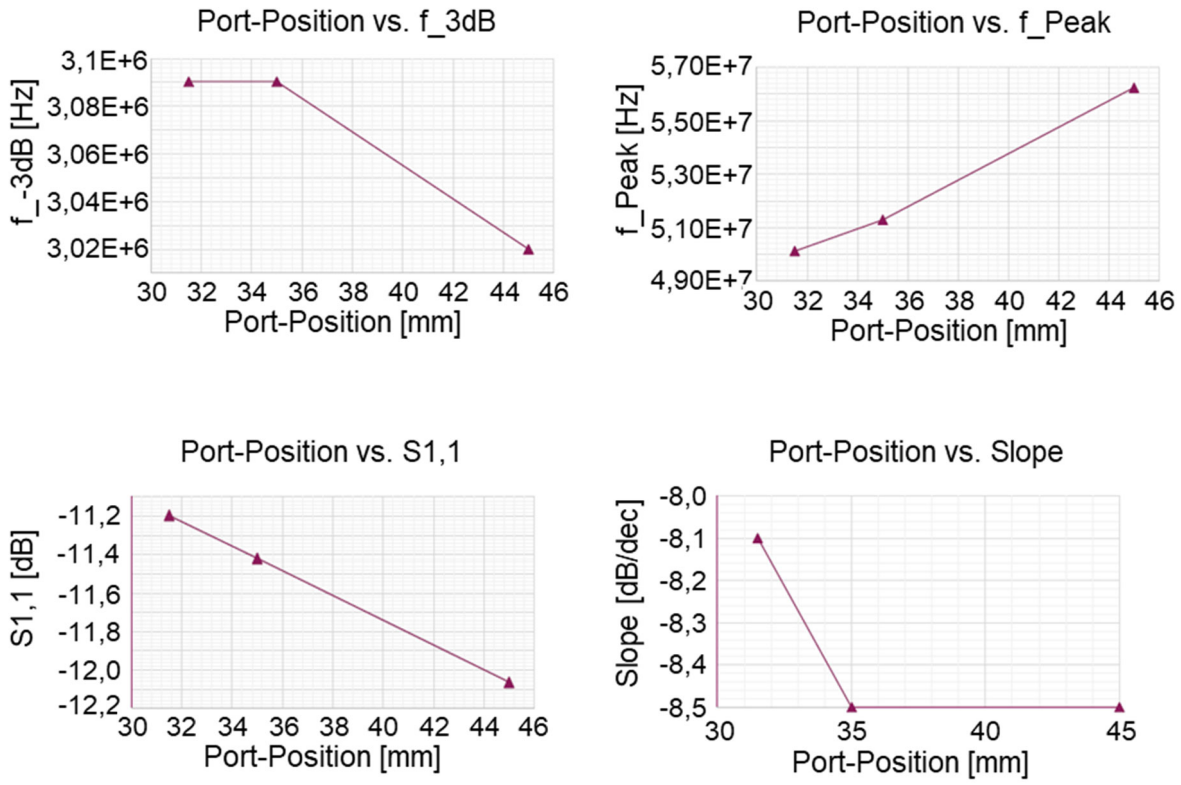


Abb. 11: Simulationsergebnisse in Abhängigkeit der Port-Position

Um eine möglichst gute Passgenauigkeit der FEM-Modelle gegenüber Messungen von Technologie- oder Produktdemonstratoren zu erreichen, wurden zusätzlich spezielle Randbedingungen (z.B. Perfect-E-Bedingung, Infinite-Ground-Element) in die Simulationsmodelle implementiert sowie ein Mesh-Refinement im Bereich des Lumped-Ports vorgenommen, um eine größtmögliche Konvergenz zu erzielen. Dieser dadurch generierte Mehrwert spiegelte sich auch bei der anschließenden Bestimmung der Impedanzwerte des Ringkernmodells sowie einhergehender Resonanzphänomene wider. Im Rahmen der messtechnischen Aufnahme von Impedanzwerten bei reinen Kupferdrähten ohne Ferritkern waren Resonanzpeaks im Frequenzbereich ab ca. 1GHz zu beobachten. Durch Adaption der genannten Boundary Conditions in der Simulationssoftware konnte infolgedessen eine gute Übereinstimmung zwischen Mess- und Simulationsergebnissen im Zusammenhang mit Z-Parametern und dabei auftretenden Resonanzpeaks beobachtet werden.

Tab: 3: *Matrix der Simulationsreihen des Ringkernmodells*

Simulations-Matrix S-Parameter des Ringkernmodells					
Drahtlänge	Drahtdurch-messer	Port-Position	f_{-3dB}	f_{Peak}	$S_{1,1Peak}$
[mm]	[µm]		[Hz]	[Hz]	[dB]
8	500	Referenz*	$3{,}0200 \times 10^6$	$2{,}2909 \times 10^8$	-22,9290
25	500	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$9{,}5499 \times 10^7$	-15,2441
50	500	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$5{,}0119 \times 10^7$	-11,1944
100	500	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$2{,}8184 \times 10^7$	-8,6438
150	500	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$2{,}1878 \times 10^7$	-7,4901
200	500	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$1{,}8154 \times 10^7$	-6,6951
50	500	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$5{,}0119 \times 10^7$	-11,1944
50	1000	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$5{,}7544 \times 10^7$	-11,9835
50	2000	Referenz*	$3{,}0903 \times 10^6$	$6{,}9183 \times 10^7$	-13,1900
50	500	Referenz*	$3{,}0200 \times 10^6$	$5{,}0119 \times 10^7$	-11,1944
50	500	35 mm ab Außenkante Infinite-Element	$3{,}0903 \times 10^6$	$5{,}1286 \times 10^7$	-11,4179
50	500	45 mm ab Außenkante Infinite-Element	$3{,}0200 \times 10^6$	$5{,}6234 \times 10^7$	-12,0636

2.3.3 Multiphysikalische Simulation des Produktdemonstrators

Anhand der Parameterstudien konnte der Einfluss von Drahtlänge, Drahtdurchmesser, der Port-Position sowie das Auftreten etwaiger Resonanzeffekte dargestellt werden. Ausgehend von diesen grundlegenden Erkenntnissen, welche insbesondere bei der nachgelagerten Implementierung komplexerer Ferritkern- bzw. Bauelementgeometrien in die FEM-Modelle von Relevanz sind, wurde in nächster Instanz ein Workflow entwickelt, welcher dem möglichst automatisierten Aufbau diffiziler Geometrien mittels CAD- und FEM-Tools dient sowie eine Eruierung der numerischen Gültigkeit gestattet. Zudem erlaubt dieses Vorgehen einen bidirektionalen Import bzw. Export unterschiedlicher Dateiformate (ipt., stl. etc.), was den Transfer von Modellen und deren Kompatibilität mit im industriellen Umfeld gebräuchlichen Softwareumgebungen gewährleistet. Dieser Aspekt ermöglicht perspektivisch auch eine signifikante Steigerung der Designfreiheitsgrade bei der Entwicklung elektronischer Bauelemente sowie die künftige Realisierung prototypischer sowie gleichermaßen kundenspezifischer und wirtschaftlich effizienter Projekte bis hin zur Losgröße eins. Insbesondere die individuelle Gewinnung von Simulationsdaten zur Abschätzung potenziell

erzielbarer Kenngrößen birgt ein hohes Einsparpotenzial durch den Wegfall einer Notwendigkeit aufwändiger Messreihen und der kostenintensiven Fertigung einzelner Prototypen.

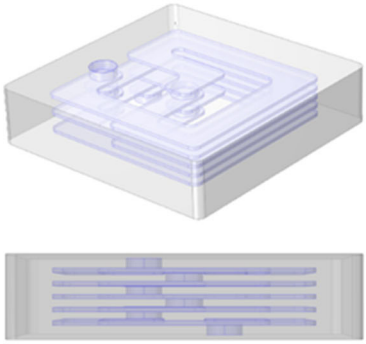
Darauf aufbauend erfolgte die Einbettung komplexerer Spulenverläufe in die FEM-Modelle. Die geometrischen Strukturen sind dabei u.a. angelehnt an in wissenschaftlichen Publikationen präsentierten Designs für Applikationen 3D-gedruckter, weichferritischer Komponenten im Bereich der Leistungselektronik. Im Speziellen sind dabei im Ferritkern eingebettete Cu-Strukturen sowie gestapelte Spulenverläufe zur erheblichen Steigerung der Drahtlänge im Hinblick auf die Performance künftiger Bauelemente von Interesse. Im Zuge der iterativen Validierung der FEM-Simulationsmodelle wurden auch hier relevante wellengrößenabhängige Parameter erhoben. Zur Abbildung der im Projekt eingesetzten technologischen Ansätze zur Herstellung der Technologiedemonstratoren (Filament, Pellet-Extruder, Dispensen von Ferritpaste) wurden u.a. die Daten der unterschiedlichen messtechnisch charakterisierten Probenkörper in die Simulationen eingepflegt beispielhaft ausgewertet.
Für eine weiterführende, adäquate Eichung der Simulationsmodelle wurde, analog zum Vorgehen bzgl. des Technologiedemonstrators, ein Referenzmodell für die Optimierung von Ferritkernen und als Vorarbeit zur Generierung eines nachgelagerten Entwurfs des Demonstratorbauteils, erarbeitet. Zielsetzung ist hier insbesondere die Auslegung von Ferritkernen bei möglichst geringem Materialeinsatz sowie mit konventionellen Ferritmaterialien vergleichbaren Leistungswerten. Auf diese Weise sollen insbesondere auch Materialkosten eingespart werden. Eine additive Herstellung gestattet zudem auch die Verlagerung von Spulenstrukturen ins Innere des Ferritkerns, was bspw. durch äußeremechanische Einflüsse bedingte Bruchstellen bzw. -kanten am Übergang zu Lötpads entgegenwirkt und im Sinne der Qualitätssicherung zu befürworten ist.

Zunächst wurde ein Referenzmodell anhand zweier rudimentärer Geometrien des Ferritkerns, eines Zylinders bzw. Quaders, bei jeweils vergleichbaren Volumina unter Variation geometrischer Parameter (Zylinderradius bzw. Kantenlänge des Quaders) evaluiert. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung gedruckter Produktdemonstratoren wurden die erhobenen Permeabilitätswerte μ` bzw. μ`` der Proben H1.1 sowie H1.2 (NiZn-Ferrit, Partikelgröße 90 – 315 μm) in den FEM-Simulationen implementiert, da diese mit Maximalwerten von $\mu`_{H1.1} \approx 7{,}2$ bzw. $\mu`_{H1.2} \approx 9{,}0$ die besten Messresultate aller charakterisierten Proben aufweisen. Die Variation bzw. sukzessive Verringerung des Zylinderradius (2,0 mm bis 0,5 mm) sowie der Kantenlänge des Ferrit-Quaders (3,54 mm bis 0,89 mm) zeigte keinen signifikanten Einfluss

auf die Streuparameter. Ein vergleichbares Simulationsergebnis war auch bzgl. der Z-Parameter zu beobachten.

Des Weiteren wurde im Rahmen der Vorüberlegungen zur Fertigung eines Produktdemonstrators ein Äquivalenzmodell aufgebaut. Durch die erwartete Verdruckbarkeit der hergestellten hybriden Filamente sowie der Einsatz der 5-Achs-Drucktechnologie der Neotech AMT könnten auch innenliegende Kupferstrukturen additiv gefertigt werden.

Aufgrund der anlagentechnischen Spezifikationen der im Projekt genutzten 5-Achs-Drucktechnologie, wurde das Äquivalenzmodell der Speicherdrossel hinsichtlich einer besseren Druckbarkeit im weiteren Verlauf grundlegend adaptiert. Eine adäquate Verarbeitung der durch das IFAM hergestellten hybriden Ferrit-Polymer-Filamente auf Mangan-Zink (MnZn) bzw. Nickel-Zink (NiZn) Basis sowie einer geeigneten Silberpaste (WIK bzw. ECI 1011) zur Generierung leitfähiger Strukturen war gekoppelt an die Designregeln des FFF-Verfahrens sowie des PiezoJet-Verfahrens, zur Applikation der Ferrit-Filamente bzw. der Silberpaste. Dabei geht die FFF-Methode mit einer minimalen Linienbreite von 800 µm, minimalen Radien von 300 µm sowie einer minimalen Schichtdicke von 300 µm einher. Ein maximaler Überhang von 45° war zulässig. Der Innendurchmesser der verwendeten Druckdüse wurde auf 800 µm festgelegt. Im Gegensatz dazu ist das PiezoJet-Verfahren auf minimale Linienbreiten von 500 µm ausgelegt. Schichtdicken von 25 - 30 µm sind prinzipiell realisierbar sowie eine Herunterskalierung der Radien auf 300 µm. Diese technologischen Randbedingungen, die werkstoffliche Zusammensetzung der hybriden Ferrit-Polymer-Filamente (u.a. Durchmesser der Ferritpartikel) sowie die Ergebnisse der multiphysikalischen Simulationen waren Grundlage für die Auslegung weiterer Produktdemonstratoren. Dazu wurde ein modifizierter Demonstrator mit den Außenmaßen 16,0 x 16,0 x 3,8 mm³ mit einer Schichtdicke der Silberleiterbahnen von 2 x 200 µm und Zwischenlagen aus den hybriden Ferrit-Polymer-Filamenten von 400 µm ausgelegt (Abb. 12).



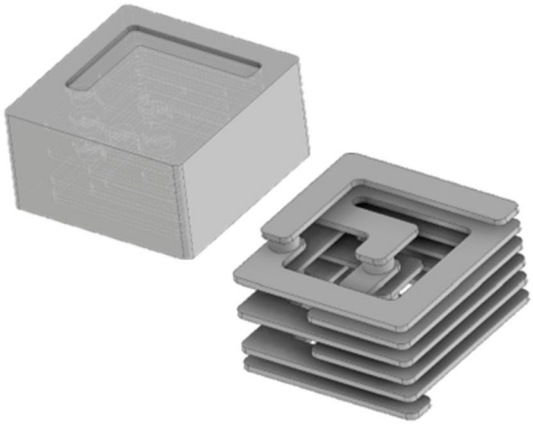
Spezifikation Produktdemonstrator 2. Entwurf:

- d_{Ag}= 200 µm
- $d_{Ferrit_Zwischenlagen}$ = je 2x 200 µm
- $h_{Kontakte}$ = 600 µm (3x 200 µm)
- R = 0,5 mm (alle Radien)
- $B_{leiterbahnen}$ = 2,0 mm
- $D_{kontakte}$ = 1,8 mm
- Außenmaße Ferritkern: 16,0 x 16,0 x 3,8 mm³
- Anzahl Silberlagen: 5

Abb. 12: FEM-Modell des 2. Entwurfs des Produktdemonstrators

Aufgrund der im Projekt ermittelten Permeabilitätswerte μ` bzw. μ`` durch die Charakterisierung der Technologiedemonstratoren (Ringkerne) wurden die werkstofflichen Kombinationen mit den besten Materialkennwerten H1 (NiZn-Ferrit; Ferritpulver 90 - 315 μm) und G2 (MnZn-Ferrit; Ferritpulver (D50 ca. 8 μm) + > 200 μm) eingesetzt.

Eine metrologische Charakterisierung des modifizierten Demonstrators zeigte allerdings unzureichende Ergebnisse und ließen auf Kurzschlüsse zwischen den einzelnen Silberlagen schließen. Eine genaue Beschreibung des ersten gefertigten Produktdemonstrators sowie eine Fehleranalyse findet sich in Kapitel 2.4. Messtechnische Charakterisierung der Produktdemonstratoren. Um die Separation der einzelnen Silberschichten zu gewährleisten und somit Kurzschlüsse zwischen den Silberstrukturen zu verhindern, wurden die Schichtdicken der Ferrit- und Silberlagen verdoppelt. Des Weiteren wurden, für eine Vereinfachung der nachgelagerten messtechnischen Charakterisierung der Produktdemonstratoren, die Kontaktflächen deutlich vergrößert. Für eine möglichst flexible Kontaktierung der Demonstratoren sind drei unterschiedliche Varianten erarbeitet worden (runde Kontakte auf Deck- und Bodenfläche, großflächige Kontakte auf der Deckfläche bzw. L-förmige Kontaktflächen oben und unten).



Spezifikation Produktdemonstrator 2. Entwurf:

- d_{Ag}= 400 μm
- $d_{Ferrit_Zwischenlagen}$ = je 2x 400 μm
- $h_{Kontakte}$ = 600 μm (3x 200 μm)
- R = 0,5 mm (alle Radien)
- $B_{leiterbahnen}$ = 2,0 mm
- $D_{kontakte}$ = 1,8 mm
- Außenmaße Ferritkern: 16,0 x 16,0 x 8,4 mm³
- Anzahl Silberlagen: 5

Abb. 13: FEM-Modell des finalen Entwurfs des Produktdemonstrators

Im Zuge dessen wurde ebenfalls das Widerstandverhalten simulativ ermittelt (0,08 Ω für Silberpaste „WIK“) sowie die zugrundeliegenden Streu- und Impedanzparameter. Auf dieser Basis hat die Neotech AMT weitere Demonstratoren mittels der 5-Achs-Technologie gefertigt, wobei die Kontaktflächen oben und unten eine L-förmige Kontur aufgewiesen haben. Das Ferritpulver lag entweder in Form von MnZn oder NiZn vor. Abbildung 13 stellt den finalen Produktdemonstrator mit der dazugehörigen Spezifikation dar.

2.4 Messtechnische Charakterisierung der Produktdemonstratoren

Auf Grundlage der vorab aufgezeigten Untersuchungen wurden, wie in Kapitel 2.3.3 vorab dargestellt, erste Produktdemonstratoren auf Basis von MnZn- und NiZn-Ferritkomposit durch die Neotech AMT gedruckt und der Würth Elektronik zur Verfügung gestellt. Tabelle 4 zeigt dabei die Zusammensetzung ausgewählter Prototypen.

Tab. 4: Zusammensetzung erster Produktdemonstratoren

Versuchsprobe	Füllmaterial	Schichthöhe
PD1 G2	Ferritpulver (D50 ca. 8µm) + > 200 µm	200 µm
PD2 G2	Ferritpulver (D50 ca. 8µm) + > 200 µm	200 µm
PD3 H1	90 - 315 µm	200 µm

2.4.1 Erste Generation gedruckter Produktdemonstratoren

Analysen der elektrischen Messungen zeigten dabei eine große Messvarianz zwischen den unterschiedlichen Demonstrator-Bauteilen. Die hier ausgewählten und dargestellten Prototypen der ersten Generation wiesen einen sehr geringen Gleichstromwiderstand (RDC) mit jeweils 14 mOhm (PD1 G2), 35 mOhm (PD2 G2) und 140 mOhm (PD3 H1) als auch eine sehr niedrige Impedanz auf (Abb. 14). Der Produktdemonstrator PD3 H1 mit einer NiZn-Ferrit-Zusammensetzung zeigt dabei noch einen deutlich höheren Gleichstromwiderstand und höhere Impedanz als die MnZn-Ferrit-Demonstratoren. Die Serieninduktivität stellt sich, aufgrund der sehr geringen Werte im niederfrequenten Bereich, als sehr stark verrauscht dar (Abb.15). Die Sättigungsmessungen gestalteten sich äußerst schwierig. Darüber hinaus kam es zu einer starken Wärmeentwicklung, die zu einer Rauchentwicklung und anschließenden Zerstörung des Bauteils im inneren führte.

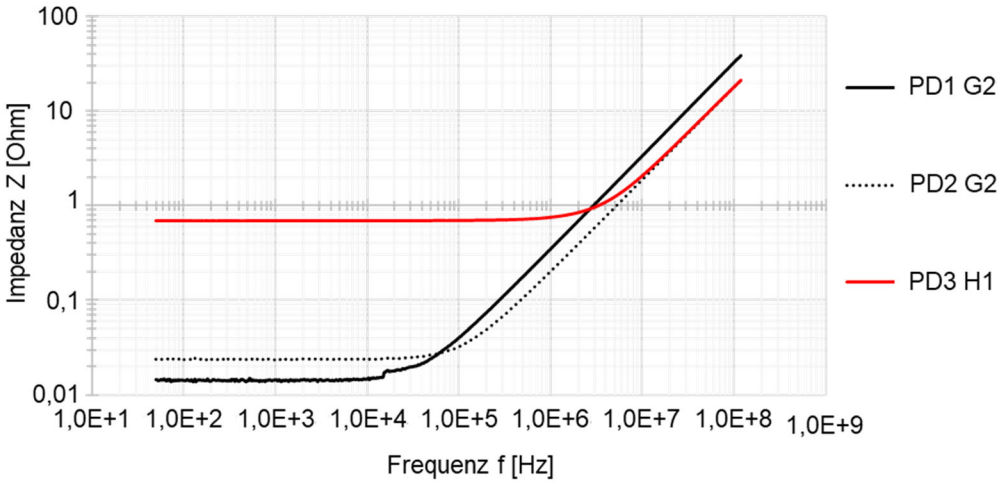


Abb. 14: Impedanz der ersten Generation der Produktdemonstratoren

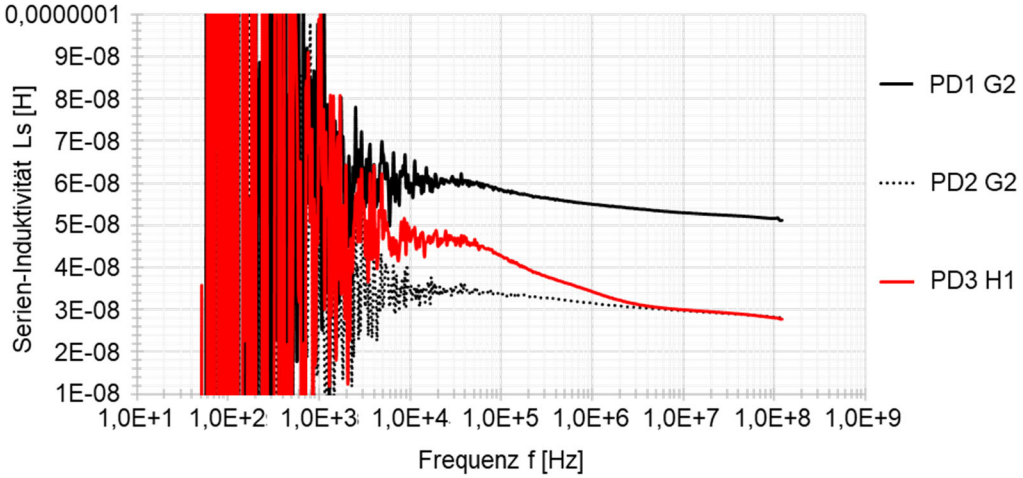


Abb. 15: Induktivität der ersten Produktdemonstratoren

Um einen genaueren Einblick in die gedruckte Bauteilstruktur zu erhalten, wurden CT-Analysen durchgeführt. Dabei konnte eine sehr zerklüftete und poröse Struktur der aufgebrachten und ausgehärteten Silberpaste festgestellt werden. Dies kann zum einen auf die sehr raue Oberfläche der verdruckten Ferrit-Polymer-Komposit-Filamente zurückgeführt werden. Zum anderen wies eine lichtmikroskopische Kontrolle der gedruckten Silberleiterbahnen vor dem Aushärteprozess eine gleichmäßige Materialverteilung auf. Aus diesem Grund ist des Weiteren davon auszugehen, dass die hohe Porosität der Strukturen auch auf das Verdampfen des enthaltenen Lösungsmittels während der Aushärtung zurückzuführen ist. Auf dieser Grundlage hat die Neotech AMT den Sinterprozess optimiert (Temperaturprofil etc.) und eine deutliche Verbesserung der gedruckten Silberleiterbahnen erreicht.

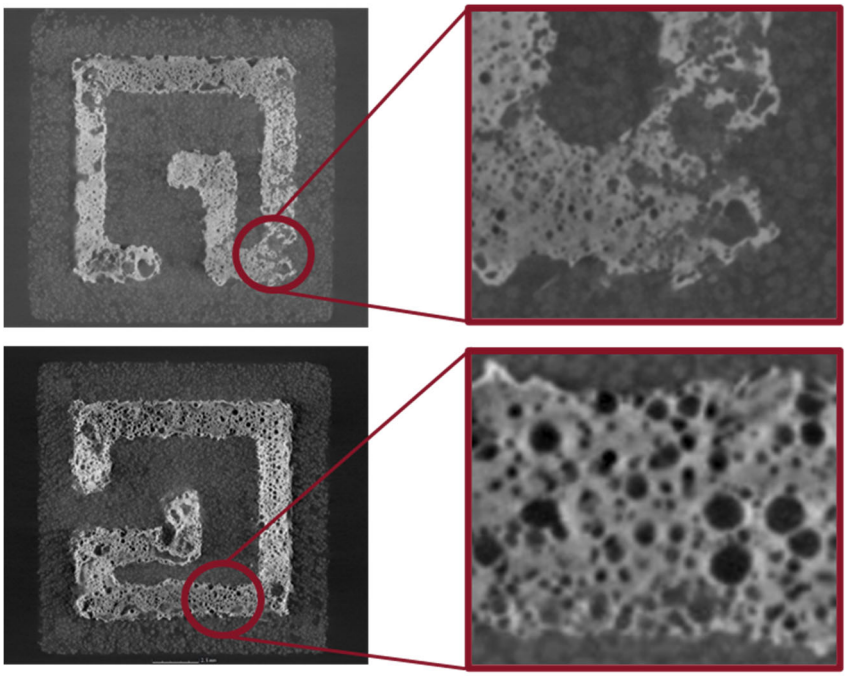


Abb. 16: CT-Analyse gedruckter Leiterbahnen

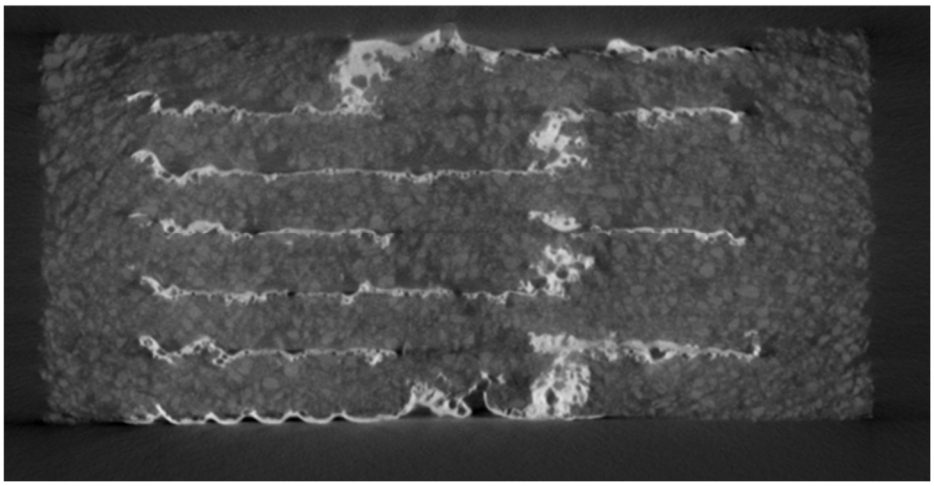


Abb. 17: CT-Analyse der gedruckten Leiterbahnschichten

Abbildung 16 stellt exemplarisch die gedruckten Leiterbahnen (hell) als Draufsicht dar. Es kann dabei gut die Porosität der Silberleiterbahnen sowie die Zerklüftung und Verringerung des Leiterbahnquerschnittes erkannt werden. Eine Gesamtübersicht der gedruckten Leiterbahnschichten zeigt das untere Bild in Abbildung 17. Weiterhin konnte eine Verbindung zwischen den unterschiedlichen Lagen der Silberbahnen festgestellt werden, wodurch Kurzschlüsse innerhalb der Produktdemonstratoren hervorgerufen worden sind.

Zweite Generation gedruckter Produktdemonstratoren

Für die zweite Generation wurden die in Kapitel 2.3 Abb. 13 beschriebenen Druckparameter gewählt und auf Basis von MnZn- und NiZn-Ferrit Produktdemonstratoren hergestellt. Innerhalb dieses Berichtes sollen zwei ausgewählte Proben PD4 H2 und PD5 J1 miteinander verglichen werden (Tabelle 5).

Anhand des erhöhten Gleichstromwiderstandes gegenüber den Demonstratoren der ersten Generation lässt sich ablesen, dass der leitende Pfad länger ist, was darauf schließen lässt, dass keine oder zumindest wenige Lagenkurzschlüsse vorliegen. Auch die erhöhte Induktivität ist ein Indiz dafür, dass die Erhöhung des Lagenabstandes der gedruckten Silberleiterbahnen das Risiko von Lagenkurzschlüssen verringert und der Aufbau mehrerer Windungen entspricht.

Tab. 5: Produktdemonstratoren zweiter Generation und elektrische Charakterisierung

Versuchsprobe	Füllmaterial	Schichthöhe	Gleichstrom-widerstand	Induktivität
PD4 H2	90 - 315 µm	400 µm	477 mOhm	825 nH
PD5 J1	Ferritpulver (D50 ca. 8µm) + > 200 µm	400 µm	530 mOhm	690 nH

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass sich auf Basis des NiZn-Ferritkomposits (PD4 H2) eine höhere Induktivität (Abb. 17) gegenüber dem MnZn-Ferritkomposits (PD5 J1) (Abb. 18) erzielen lässt. Es ist nun zu erkennen, dass sich mit der Version 2 eine Speicherinduktivität realisieren lässt, die aufgrund der Messungen am Ringkern bereits ermittelten niedrigen Verluste eine Eignung als solche zeigt.

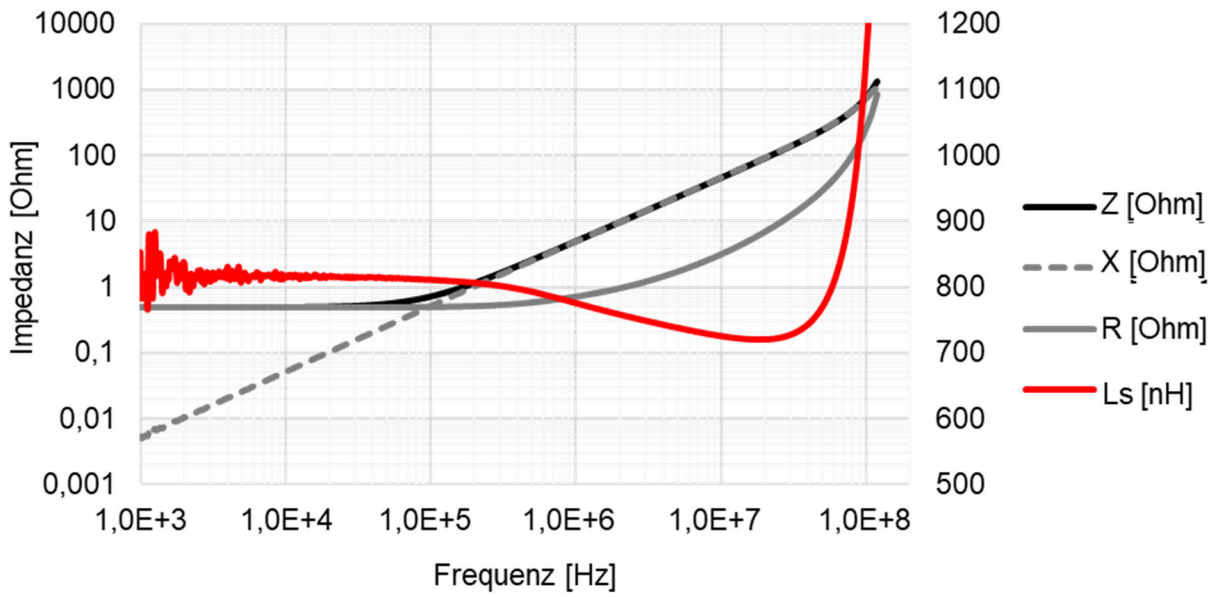


Abb. 17: Induktivität des Produktdemonstrators PD4 H2

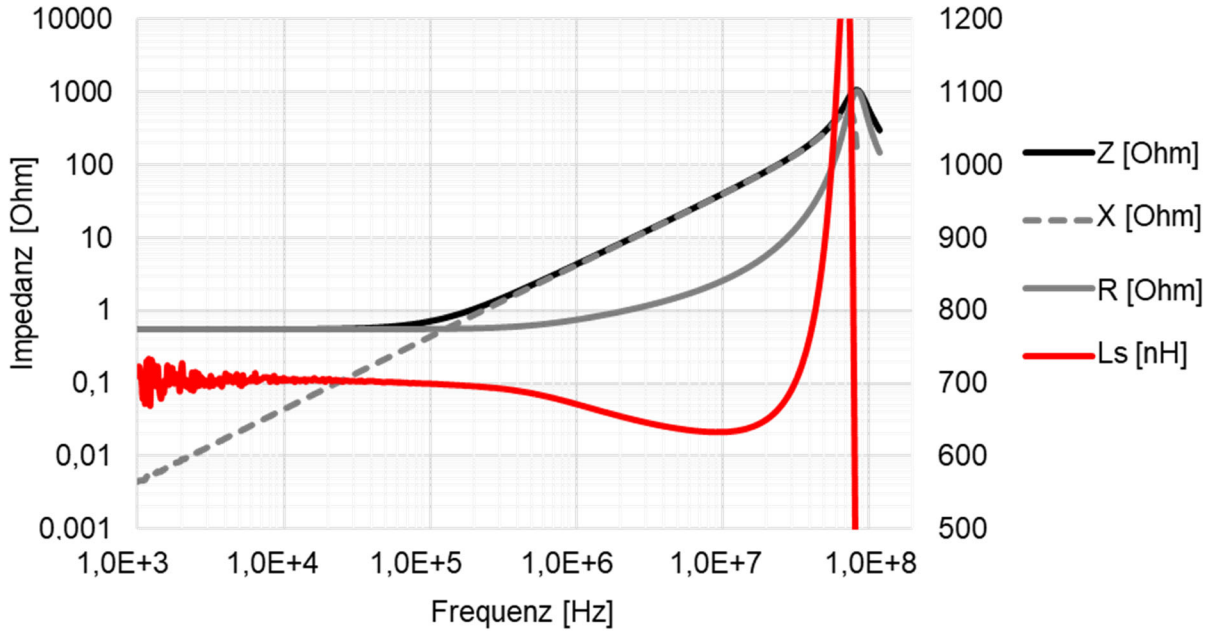


Abb. 18: Induktivität des Produktdemonstrators PD5 J1

Zudem wurden zu Vergleichszwecken erneut CT-Scans durchgeführt. Hier zeigten sich wiederholt sehr poröse Silberstrukturen und Unregelmäßigkeiten im Schichtaufbau. Es konnten durch eine Aufdopplung der Schichtdicken erkennbare Verbesserungen hinsichtlich des elektrischen Verhaltens erzielt werden. Die Messungen der Widerstandswerte waren reproduzierbar, wenngleich noch deutliche Diskrepanzen gegenüber den Simulationsergebnissen zu verzeichnen sind. Diese Abweichungen sind durch die Annahme einer idealen Materialverteilung von Ferrit-Filament und Silberpaste zu begründen und die Widerstandswerte würden bei einer wesentlich geringeren Porosität des Silberpaste deutlich mehr approximieren.

2.5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Für die Bearbeitung des Projektes wurden Ingenieure und Techniker mit unterschiedlichen Fachkompetenzen aus z.B. der Materialherstellung, Drucktechnologie, Messtechnik, Elektronik, Simulation und anderen eingesetzt. Hierdurch konnten die unterschiedlichen Teilaspekte dieses Projektes wirksam bearbeitet werden.

Zu Beginn des Projektes waren die zu entwickelnden Prozessketten mit erheblichen Risiken verbunden. So konnten mit Hilfe der verschiedenen Versuchsreihen die Verdruckbarkeit der hergestellten Ferrit-Polymer-Komposit-Filamente gezeigt werden. Durch die messtechnische Charakterisierung der Filamente konnten die zielführendsten Ferritkombinationen für ihren Einsatz identifiziert und für die Simulations- und Modellmodellierung genutzt werden. Die durch den engen Austausch von Knowhow-Trägern im Konsortium ermöglichten Technologie- und Produktdemonstratoren zeigen die disziplinübergreifende Erforderlichkeit. Weiterhin konnten die technischen Risiken so erfolgreich reduziert werden. Ohne die erhaltene Förderung wäre dieses Vorhaben und dem damit einhergehenden zügigen Wissensaufbau und -transfer nicht realisierbar gewesen. Auch hätte das Projekt aufgrund der damit verbunden technischen und wirtschaftlichen Risiken nicht erfolgreich bearbeitet werden können

2.6 Zukünftige Nutzung der im Vorhaben erzielten Ergebnisse

Innerhalb des Projektes konnte gezeigt werden, dass mit der hergestellten 2. Produktdemonstratorgeneration eine Speicherinduktivität realisiert werden kann. Können die Probleme der Lagenkurzschlüsse gelöst werden und sich kompaktere Bauteile realisieren lassen, könnte sich das Verfahren in Zukunft zur Herstellung von Speicherinduktivitäten eignen. Des Weiteren könnte die Implementierung eines Drahteinlegeprozesses in Symbiose mit dem Druck hybrider Ferrit-Polymer-Filamente die Designfreiheitsgrade bei der Entwicklung neuer Bauelemente sowie deren Kennwerte signifikant steigern. Zudem ist dadurch eine Optimierung der anlagespezifischen Parameter (Linienbreite, Radiengröße, Schichtdicke etc.) zu erwarten, was dem Streben nach sukzessiver Miniaturisierung innovativer Bauelemente mit hoher

Integrationsdichte sowie einer Realisierung materialsparender Fertigungsprozesse entgegenkommt. Zur weiterführenden multiphysikalischen Analyse derartiger Demonstratoren und einer Designoptimierung mittels FEM-Simulationen ist zudem eine systematische Erhebung zusätzlicher Messdaten (Widerstandswerte, Permeabilität, B-H-Kurven usw.) von Nöten, um diese in die Simulationsmodelle integrieren und entsprechend eichen zu können. Eine Möglichkeit zur Steigerung der Performance kann auch weiterhin in der Zusammensetzung der eingesetzten Ferritpulver liegen. Mit derzeitigen Ferritpartikelgrößen bis 315 µm ist eine Realisierung sehr homogener Schichten im Produktdemonstrator meist schwer umsetzbar. Eine Beimengung von Partikeln im sub-µm-Bereich könnte der Entstehung großer Hohlräume entgegenwirken und so die „Verdrängung“ der Silberpaste in die Ferritschichten bei der Aushärtung bzw. dem Ausdampfen der Lösungsmittel in gewissem Maße nivellieren.

2.7 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens an anderer Stelle

Auf dem Gebiet der hybriden Ferrit-Polymer-Komposit-Filamenten in Verbindung mit gedruckten Leiterbahnen zur Herstellung neuartiger, additiv gefertigter Induktivitäten sind dem Zuwendungsempfänger keine weiteren Forschungsvorhaben Dritter bekannt geworden.

2.8 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen:

Es sind derzeit keine Veröffentlichungen geplant noch erfolgt.