Abschlussbericht

Thema: Integrierte Mikrospulen mit magnetischem Kern für Anwendungen in Mikrotrafos und Mikro-Aktor-Arrays (MIMAK)

zur Vorlage beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)
als Projektträger

Antragsteller: Siemens AG, Corporate Technology, CT MM1
Günther-Scharowsky-Str. 1
91058 Erlangen

Förderkennzeichen: 13N8976

Laufzeit: 01.05.06 bis 30.04.09

Autoren: R. Weiss, J. McCord

Inhaltsübersicht

1. Projektorganisation und Vorraussetzungen
1.1. Aufgabenstellung
1.2. Voraussetzung des Vorhaben
1.3. Zeitplan und Ablauf
1.4. Stand der Technik
1.5. Kooperation
2. Projektergebnisse
2.1 Technische Ergebnisse
2.2. Verwertungsmöglichkeiten
2.4. F&E Ergebnisse von dritter Seite bzw. Marktumfeld

1. Projektorganisation

1.1 Aufgabenstellung

Ziel des Projektes war die Entwicklung von Si-integrierten Mikrotransformatoren und Mikrospulen mit magnetischen Kernen, die sich durch hohe Wirkungsgrade bei der Arbeitsfrequenz (10MHz und darüber), hohe Induktivitäten von 5µH - 50 µH und durch eine hohe Kopplungsinduktivität auszeichnen. Um dieses Anforderungsprofil abzudecken, sollten Toroid-Transformatoren und planare Spulen in Dünnschichttechnik entwickelt werden. Durch ein Toroid-Design bei gleichzeitig geschichtetem Aufbau des Kerns und geeigneter Ausrichtung der magnetischen Vorzugsrichtung kann eine optimale Führung des magnetischen Flusses erreicht werden. Dies sollte zu einer signifikanten Steigerung der Induktivität und damit auch der Güte bei hohem Wirkungsgrad führen. Durch die Ringform des Magnetkerns ist eine hohe homogene Permeabilität bei hohen Frequenzen längs des Flusspfads eine technisch- naturwissenschaftliche Herausforderung. Um bei dieser Geometrie weiterhin die Anforderungen an die lokale Orientierung der magnetisch leichten Richtung erfüllen zu können, sollen neuartige metallische ferromagnetische Schichten mit gekreuzten Anisotropien verwendet werden. Die aus den neuartigen Kernen in Planartechnologie gefertigten Spulen und Transformatoren sollten bezüglich ihrer elektrischen Eigenschaften charakterisiert und die Technologie aufbauend auf diesen Erkenntnissen bezüglich hoher Güte, hoher Kopplung, hoher Induktivität und hoher Grenzfrequenz der Spulen und Transformatoren optimiert werden.

1.2 Vorraussetzungen des Vorhabens (Bisherige Arbeiten der Antragsteller und Literaturverzeichnis)

In der F&E Abteilung Corporate Technology, Innovative Electronics der Siemens AG, liegt seit vielen Jahren ein Schwerpunkt der Entwicklungstätigkeit auf magnetischen Schichtsystemen.
Die Kompetenz reicht von Werkstoffkenntnissen über Simulation komplexer Magnetkreise, Charakterisierung der magnetischen und elektrischen Eigenschaften von Bauelementen aus magnetischen Schichtsystemen (NanoMOK, Magnetokoppler, umfangreiche elektrische Messtechnik) über Elektronikauslegung für Messaufbauten bis hin zum Prototyping von einfachen elektronischen Systemen. Durch jahrelange Materialentwicklung auf dem Gebiet magnetischer Werkstoffe für ein ehemaliges Siemens-Tochterunternehmen (Vacuumschmelze GmbH) hat sich in der Arbeitsgruppe Magnetsensorik ein ausgeprägtes Knowhow auf dem Gebiet magnetischer Werkstoffe und Werkstoff-Composite aufgebaut, so dass im Projektvorhaben die Bewertung industriell relevanter physikalischer Messgrößen für Mikrotransformatoren mit magnetischen Kernen gewährleistet ist. Daneben besteht durch die F&E-Arbeiten auf dem Gebiet der GMR/TMR-Sensoren, der Arbeiten auf dem Gebiet der Magnetoelektronik und der magnetischen Speicherung von Daten (MRAM) auch ein breites Knowhow bezüglich der Machbarkeit und der Grenzen der Prozessintegration von magnetischen Materialien in die Siliziumprozesstechnology. Konkret wurden bereits vor Antragstellung

Berechnungen und Simulationen bezüglich der Hochfequenzeigenschaften von Induktivitäten mit Toroid-Kern durchgeführt.
Ausgewählte Veröffentlichungen der Arbeitsgruppe Magnetwerkstoffe und magnetische Microsysteme bei Siemens CT aus der Zeit vor der Antragstellung:

Magnetfeldinduzierte Anisotropien in Fe-Zr-B Legierungen
G. Rieger, G. Herzer, Materialica/Werkstoffwoche (1998)
Werkstoffe für die Informationstechnik, Wiley-VCH (1999)

Soft Magnetic Iron Plastic Composites for Electrical and Electronic Applications
J. Huber, W. von Gentzkow, G. Piecha, Materials Week, 2002 München

GMR Sensors for Contactless Position Detection
G. Rieger, K. Ludwig, J. Hauch, W. Clemens
European Magnetic Sensors and Actuators 2000, Dresden (2000)
Sensors and Actuators A91 (2001) 7-11

Adapting GMR Sensors for Integrated Devices
K. Ludwig, J. Hauch, R. Mattheis, K. U. Barholz, G. Rieger
EMSA2002, Athen (June 2002)

1.3 AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG DES ARBEITSPLANES

Die Arbeiten am Projekt begannen mit dem Entwurf verschiedener Toroid-Transformatoren, planarer Spulen und Teststrukturen, aufbauend auf Simulationsergebnissen des Magnetkreises unter Berücksichtigung der besonderen Eigenschaften der verwendeten magnetischen Dünnschichten z.B. FeCoBSi/SiO_2/FeCoBSi-Schicht mit gekreuzter Anisotropie und unserer Erfahrungen in der magnetischen Dünnschichttechnik. Nach den ersten Prototypen-Durchläufen zeigte sich, dass um den Meilenstein M2 zu halten ein neues Schichtsystem am Caesar unter Beratung von Hr. McCord vom IFW entwickelt werden musste. Nach aufwändigen Versuchen und elektrischen und magnetooptischen Messungen (am IFW und bei Siemens) konnte mit dem Schichtsystem aus NiFe/SiO_2/NiFe (auf Permaloybasis) die Lösung zum erreichen der Werte des Meilensteins M2 gefunden werden. Durch die ungünstigen magnetostriktiven Eigenschaften der FeCoBSi/SiO_2/FeCoBSi-Schicht wurde zum ersten Mal eine größere Umplanung erforderlich.
Teilweise parallel zur Optimierung des Schichtsystems wurden aufbauend auf die Ergebnisse der ersten Untersuchungen an den NiFe-basierten Schichten neue Toroid-Transformatoren und Planarspule so ausgelegt, dass die geforderten Induktivitätswerte bei hoher Kopplung und bei einer Arbeitsfrequenz von 10MHz erreichbar sein sollten.
Als weiterer Punkt wurde ein Testkonzept aufbauend auf Teststrukturen, in Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Herrn Quandt (damals am Caesar), das -wenn möglich- eine Kontrolle des Fertigungsprozesses erlaubt, entwickelt. Dieses Konzept lies die Charakterisierung von wichtigen Einzelparametern, die

am fertigen Bauelement nicht mehr ohne erheblichen Mehraufwand gemessen werden können -wie z.B. Schichtwiderstände der einzelnen Metallisierungen und der magnetischen Kerne, Kontaktwiderstände usw.- zu.
Im Laufe des Projekts wurden 3 verschiedene Layouts mit jeweils unterschiedlichen Microspulen und Microtransformatoren entworfen. Zu den Layoutentwürfen wurden Masken beauftragt und entsprechend an die Arbeitsgruppe von Herrn Quandt (Caesar) weitergegeben.
Einen weiteren wichtigen Punkt des Projektes stellte die Charakterisierung der elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Übertragerbauelemente und der Teststrukturen durch elektrische und magnetische und gegebenenfalls magnetooptische Messungen dar. Darin enthalten war die Dokumentation der durch die Messungen gewonnenen Erkenntnisse zur Optimierung des Herstellungsprozesses, des Layouts (Redesign) und des Parametersatzes zur numerischen Simulation. Dazu wurden unter anderem der Gleichstromwiderstand der Wicklung der Frequenzgang der Induktivitäten bis zur Arbeitsfequenz parasitäre Kapazitäten und Widerstände sowie deren Frequenzgang bestimmt.
Es wurde ein Messplatz, der die Messung der wichtigsten elektrischen Basiseigenschaften wie z.B. Induktivität und Widerstand der Spulen direkt auf dem Wafer ermöglicht und so über ein „mapping“ dieser Eigenschaften über den Wafer wichtige Erkenntnisse zur Prozessoptimierung ermöglichte, aufgebaut.
Zur Unterstützung der Aktivitäten bestand ein Unterauftrag mit dem IFW, wo vor allem spezielle magnetooptische und induktive Messungen zur Beurteilung der Schichtqualität durchgeführt wurden. Darüber hinaus half die Expertise von Herr McCord bei der Auswahl und Optimierung der Schichtmaterialen beträchtlich. Der in Abb. 1 dargestellte ausführliche Zeitplan könnte bis auf kleine Abweichungen eingehalten werden.

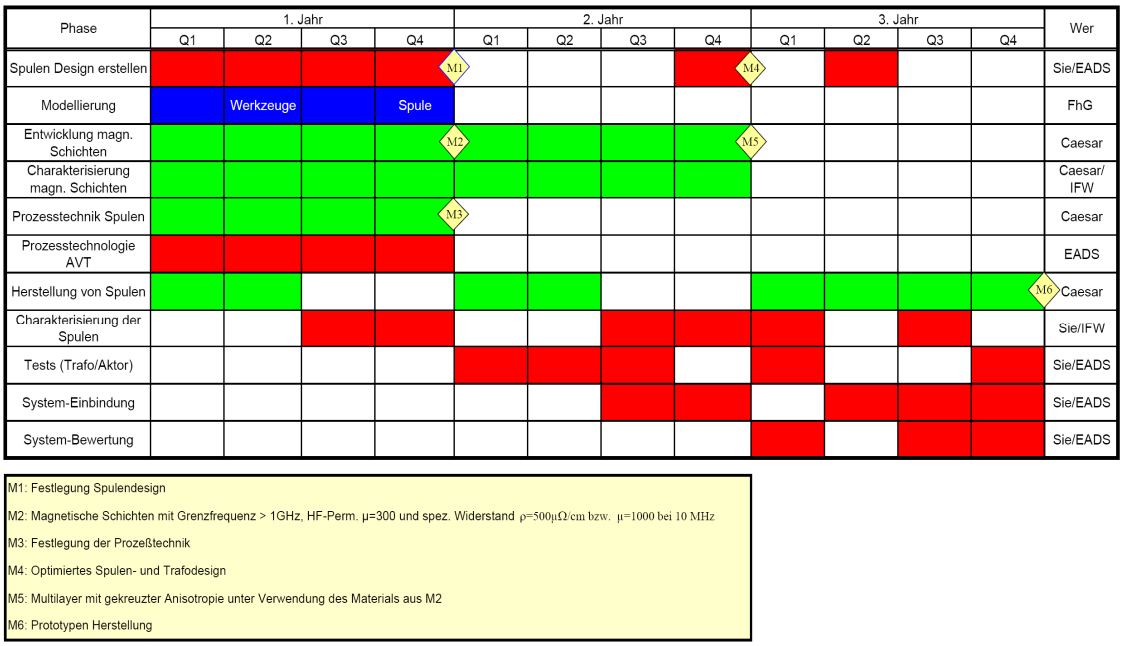


Abb. 1 Zeitplan

1.4 Stand der Wissenschaft und Technik

Zum Zeitpunkt der Antragstellung wurden miniaturisierte Transformatoren und Spulen in großen Stückzahlen als hybrid aufgebaute bewickelte Ferritkerne angeboten (Abb. 2a). Dagegen wurden reine Induktoren auf Si-Basis in IC-Technologien (CMOS, Bipolar, BiCMOS) in der Regel als Spiralspulen ohne magnetischen Kern ausgelegt, die durch die obersten zwei Metallisierungslagen realisiert werden.

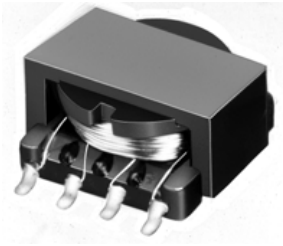
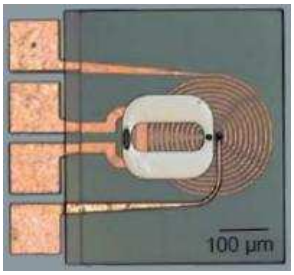
a)  b) 

Abb. 2 a) Kommerzieller, SMT-fähiger aber hybrid aufgebauter Kleintrafo. b) Forschungsansatz: Mikrotrafo mit Planarspulen (siehe b.)

Die hybrid aufgebauten Transformatoren sind in der Fertigung vergleichsweise aufwändig (Zeitaufwand) da es sich bei den hierbei zum Einsatz kommenden Fertigungsverfahren um serielle Fertigungsprozess handelt. Zudem müssen für den Einsatz der hybrid aufgebauten Transformatoren auch immer Hybridsysteme mit dem entsprechenden Platzbedarf und Materialaufwand gefertigt werden. Die auf dem IC integrierten Induktoren umgehen zwar die aufwändige Herstellung hybrider Systeme, verfügen aber nicht über einen geeigneten Magnetkern und weisen deshalb beträchtliche Nachteile wie geringe Induktivität, Güte und Kopplung auf.

Zu Projektbeginn wurden in der Literatur verschiedene Konzepte diskutiert und es wurde über die prototypische Realisierung und Untersuchung einiger dieser Konzepte berichtet. Ein damaliger Ansatz war die hybride Planarintegration von amorphem magnetischem Bandmaterial [12]. Weitere wichtige Ansätze betrafen die Dünnschichtintegration von magnetischen Kernen in verschiedenen Mikrotransformatorendesigns, wie planare Spiralspulen mit magnetischen Sandwichschichten (Abb. 2b, 3a) [1-3, 12, 15,16, 19], Solenoide [1,], d.h. ein Kern ist von einer Spule umwickelt (Abb. 3b), den sogenannte. „low resistivity inductor“ [3, 17, 18] und Streifenleiter mit magnetischem Mantel für sehr hohe Frequenzen (Abb. 3c) [4].

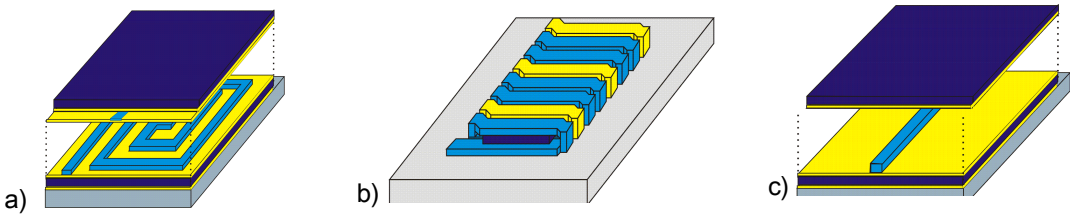


Abb.3.: Verschiedene gängige Mikrotrafo-und Induktor Designs, a) planare Spiralspule mit magn. Sandwich, b) Solenoid mit magn. Kern, c) Streifenleiter mit magn. Mantel.

Alle diese Ansätze zeichneten sich durch relativ geringe Güte und sehr geringe Induktivitäten aus. Dies war im Wesentlichen auf eine ineffiziente Führung des magnetischen Flusses zurückführen [1, 12, 15,16, 19]. Es wurden bei den früheren Konzepten die magnetischen Feldlinien nicht komplett im magnetischen Material geführt (Design Abb.3a und 3b), die Feldlinien traten zum Teil senkrecht in die Schichten ein und verursachen Wirbelströme (Design Abb.3a und 3c). Häufig wurde die notwendige Bedingung, das anregende Hochfrequenzfeld nicht entlang der magnetisch leichten Achse zu führen, (siehe z.B. [5]) nur unzureichend realisiert. (Design Abb.3a).
Die damals publizierten experimentellen Werte die mit obigen Induktoren erreicht wurden, hatten diese Limitierungen verdeutlicht (siehe auch Tab.1), so wurde beispielsweise von Gardner et al. [3] nur eine Induktivitätssteigerung um etwa 30% - 56% an Spiralspulen mit magnetischer „ground plane“ gemessen. Bisher wird daher keiner der oben genannten Ansätze kommerziell verfolgt.

Typ	**Material**	***L***	Q_{max}	L/L_0	L/A (µH/mm^2)	f_{max} (GHz)
Magnet auf Spirale	CoNbZr [2]	7.38 nH	6.27 @ 2 GHz	1.11	0.1	3
Sandwich Spirale	CoZrTa [3], [6]	23 nH	4.66 @ 1 GHz	1.40	0.45	1.5
Sandwich Streifenleiter	CoNbZr [4]	100 nH/cm	2 @ 0.25 GHz	8	0.08	0.1
Solenoid	NiFe [11]	2.5 nH	≈ 2 @ 3 GHz	10	0.15	7.5

Tab. 1 Ergebnisse für Induktoren auf der Basis ferromagnetischer Kerne. Angegeben sind Induktivität L, Güte Q, Induktivitätssteigerung durch den magnet. Kern im Vgl. zur Luftspule L/L_0, Induktivität pro Einheitsfläche L/A und die maximale Arbeitsfrequenz f_{max} (z.T. entnommen aus [1]).

Literaturhinweise

[1] B. Rejaei, M. Vroubel, Y. Zhunag, J.N. Burghartz, Assessment of Ferromagnetic Integrated Inductors for Si-Technology, 4th topical meeting on silicon monolithic integrated circuits in RF systems, April 2003, pp. 100-103

[2] M. Yamaguchi, M. Baba, K.-I. Arai, Sandwich-Type Ferromagnetic RF Integrated Inductor, IEEE Trans. MTT, Vol. 49, No. 12, 12. December 2001, pp. 2331-2335

[3] D. Gardner, A.M. Crawford, S. Wang, High Frequency (GHz) and Low Resistance Integrated Inducotrs Using Magnetic Material, Proceedings of the IEEE Int. Interconnect Techn. Conf., June 2001, pp. 101-103

[4] A. Gromov, V. Korenivksi, D. Haviland, Analysis of current distribution in magnetic film inductors, J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 8, 15. April 1999, pp. 5202-5204

[5] B. C. Webb, M. E. Re, C. V. Jahnes, M. A. Russak, High-frequency permeability of laminated and unlaminated, narrow, thin-film magnetic stripes, J. Appl. Phys. 69 (8), 15. April 1991, pp. 5611-5615

[6] A. M. Crawford, D. Gardner, S. X. Wang, High-Frequency microinductors with amorphous magnetic ground planes, IEEE Trans Magn., Vol. 38, No. 5, September 2002, pp. 3168-3170

[7] M. Frommberger, A. Ludwig, A. Sehrbrock, E. Quandt, High frequency magnetic properties of FeCoBSi/SiO_2 and (FeCo/CoB)/SiO_2 multilayer thin films, IEEE Trans. Magn. Vol.39, No. 5, September 2003, pp. 3166-3168

[8] M. Senda, O. Ishii, High frequency magnetic properties of CoFe/SiO_2 multilayer film with the inverse magnetostrictive effect, IEEE Trans. Magn., Vol. 30, No. 1, January 1994, pp. 155-158

[9] A. Ludwig, M. Löhndorf, M. Tewes, E. Quandt, Magnetoelastic thin films for high-frequency applications, IEEE Trans. Magn. Vol. 37, No. 4, July 2001, pp. 2690-2692

[10] M. Frommberger, J. McCord, E. Quandt, High frequency properties of FeCoBSi thin films with crossed anisotropy, IEEE Trans. Magn., 2004, in print

[11] Y. Zhuang, M. Vroubel, B. Rejaei, J.N. Burghartz, Ferromagnetic RF Inductors and Transformers for Standard CMOS/BiCMOS, IEEE Int. Electron Dev. Meeting (IEDM), San Francisco, 2002

[12] Kurata, Shirakawa, Nakazima, Murakami “Study of thin film micro transformer with high operating frequency and coupling" 1993, IEEE Tr. On Magn. Vol. 29

[13] Sakamoto, Natsusaka, Murakami, “Performance of a miniaturized planar transformer having an excellent voltage regulation, 1996, IEEE Tr. On Magn. Vol. 32, No. 5

[14] Sakamoto, Masaru, Natsusaka, Murakami, "Considerations on the Performance characteristics of a planar magnetic path-type microtransformer" 1997 IEE in Japan, Vol. 121, No. 1

[15] Mino, Yachi, Yanagisawa,Tago, Sakakibara, “A new planar microtransformer for use in micro-switching converters", 1992, IEEE Tr. On Magn.Vol. 28

[16] Sullivan, Sanders, “Measured performance of a high power density microfabricated transformer in a DC-DC converter”, 1996, 27th annual IEEE power electronics specalists conference

[17] I. Jedlicska, R. Weiss, and R. Weigel. Improving GMR current sensor measurements through hysteresis modeling. In PESC 08 - 39th IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, Proceedings, pages 4781–4785, 2008.

[18] I. Jedlicska, R. Weiss, and R. Weigel. "Linearising the Output Characteristic of GMR Current Sensors through Hysteresis Modeling" In 2008 IEEE Transaction on Industrial Electronics - , 2009

1.5 Arbeits- und Aufgabenteilung

Die Arbeits- und Aufgabenteilung der Projektpartner ist in Abb. 4 graphisch dargestellt.

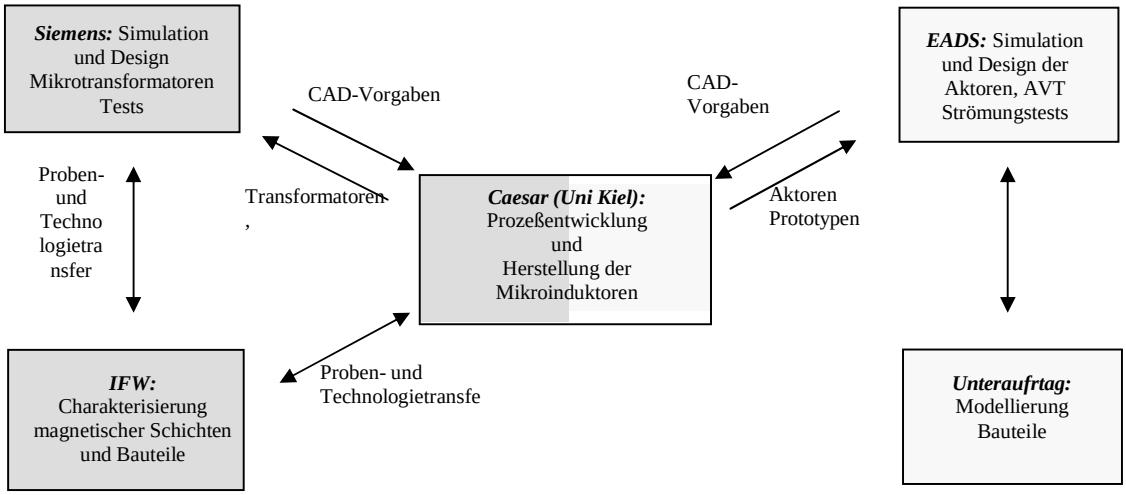


Abb.4.: Graphische Darstellung der Arbeits- und Aufgabenteilung der Projektpartner

2. Projektergebnisse

2.1 Wesentliche technische Ergebnisse

Die Untersuchungen der magnetischen und elektrischen Eigenschaften der zu Beginn der Projektlaufzeit favorisierten induktiven Bauelemente mit integrierten FeCoBSi-Ringkernen, zeigte einen starken Einfluss lokaler mechanischer Spannung auf die effektive Anisotropie, was sich nachteilig auf das Ummagnetisierungsverhalten der Ringkernstrukturen auswirkte. Eine erste Testspule ist in Abb. 5a und deren Querschnitt in Abb. 5b dargestellt.

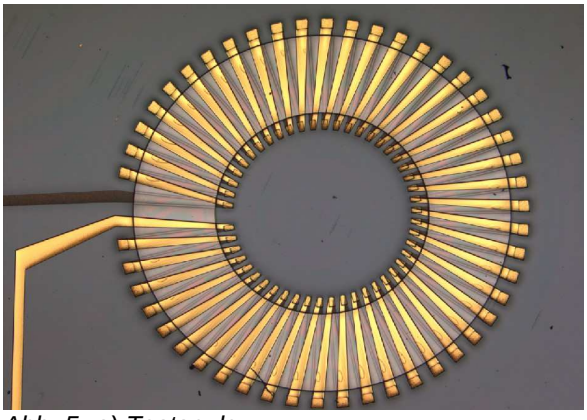
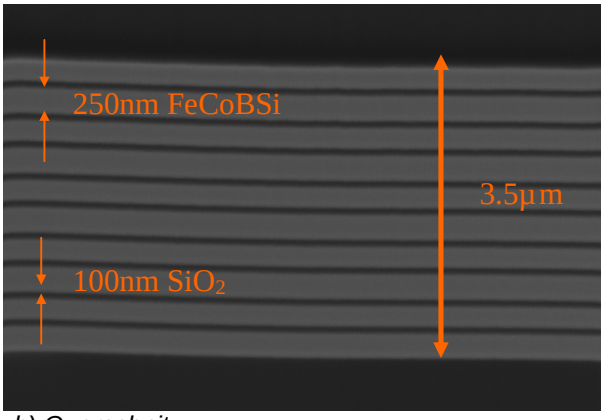


Abb. 5 a) Testspule



b) Querschnit

Insbesondere wurde eine starke Reduktion der Permeabilität festgestellt. Bei ersten Versuchen konnten deshalb nur Induktivitäten bis 250nH erreicht werden. Die unter Ausnutzung aller Designspielräume erreichbare Induktivität würde über Rechenmodelle auf maximal 1µH abgeschätzt. Damit die Projektziele und insbesondere Meilenstein M2 erreicht werden konnten, wurde nach alternativen Materialsystemen für die Ringkerne gesucht. Aufgrund der bereits gesammelten Erkenntnisse wurde die Verwendung von Permalloyschichten ($Ni_{81}Fe_{19}$) als mögliche Alternative untersucht, da dieses Material eine sehr kleine Sättigungsmagnetostriktion aufweist und damit eine geringe Empfindlichkeit der magnetischen Eigenschaften gegenüber mechanischen Spannungen. Die geringe magnetische Anisotropie sowie der geringere spez. Widerstand von $Ni_{81}Fe_{19}$ gegenüber den bisher verwendeten amorphen Legierungen sollte sich für die angestrebte niederfrequente Anwendung bis etwa 10MHz nicht als Nachteil erweisen. Als einzig signifikanter Nachteil ist die relativ geringe Sättigungsmagnetisierung von ca. J_s = 1 T zu nennen.
Um optimale Ergebnisse zu erhalten wurde in enger Zusammenarbeit zwischen Caesar, dem IFW und Siemens ein ferromagnetischer Schichtstapel entwickelt. Dazu wurde die optimale Dicke der magnetischen Einzelschichten aus $Ni_{81}Fe_{19}$ und die optimale Dicke der SiO_2 –Schicht zur Reduktion der Wirbelstromverluste ermittelt.
Wie aus Abb.6 und Abb. 7 hervorgeht, ergibt sich unterhalb einer kritischen Schichtdicke von t_{NiFe} = 250nm weichmagnetisches Verhalten, dass durch hohe Remanenz und niedrige Koerzitivfeldstärke gekennzeichnet ist. Oberhalb dieser kritischen Schichtdicke wird ein starker Abfall von Jr/Js beobachtet, der von einem gleichzeitigen Anstieg von Hc begleitet ist. Die Ursache dieses Verhaltens wird bei der Analyse der Form der Hystereseschleifen deutlich.
Beispiele von Magnetisierungskurven für verschiedene Schichtdicken sind in Abb. 7 dargestellt. Für niedrige Schichtdicken (Abb. 7(a) und (b)) zeigen die Magnetisierungskurven ein deutlich weichmagnetisches Verhalten mit Permeabilitäten μ im Bereich von 3000. Für die größeren Schichtdicken, d.h. oberhalb der kritischen Schichtdicke, ergibt sich nahezu isotropes magnetisches Verhalten. Die gezeigten Hysteresekurven sind charakteristisch für das Auftreten einer senkrechten magnetischen Anisotropie („out-of-plane anisotropy“) und der daraus resultierenden Bildung von magnetischen *Streifendomänen*. Die Existenz von Streifendomänen bewirkt ein starke Verminderung der Permeabilität. Um die nötige, größere Gesamtschichtdicke zu erzielen, mussten zusätzlich die Schichten gestapelt werden. Zur Trennung der $Ni_{81}Fe_{19}$ bieten sich amorphe Isolationsschichten (wie SiO_2) an, welche die Wachstumsbedingungen der jeweiligen Permalloyschichten und dadurch mögliche strukturelle Einflüsse hinsichtlich des Auftretens der senkrechten Anisotropie zurücksetzen. Zusätzlich werden dadurch auch mögliche Wirbelstromverluste vermieden, wie sie in Einzelschichten vergleichbarer Gesamtdicke auftreten können.

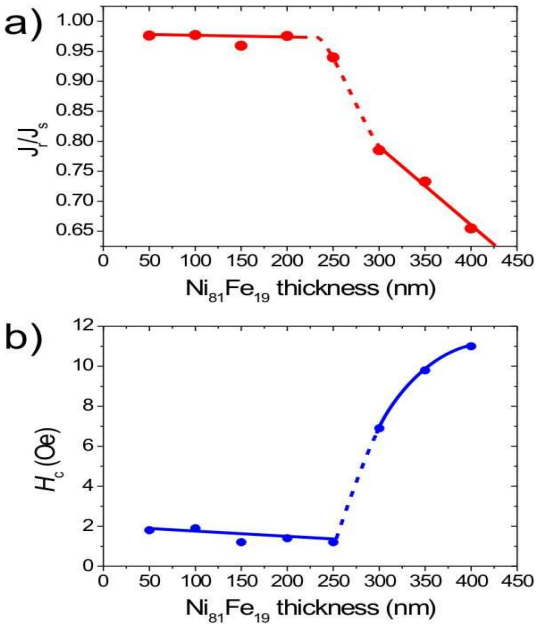


Abb. 6 (a) Verlauf der normierten Remanenz Jr/Js und (b) der Koerzitivfeldstärke Hc mit der Ni81Fe19 Schichtdicke.

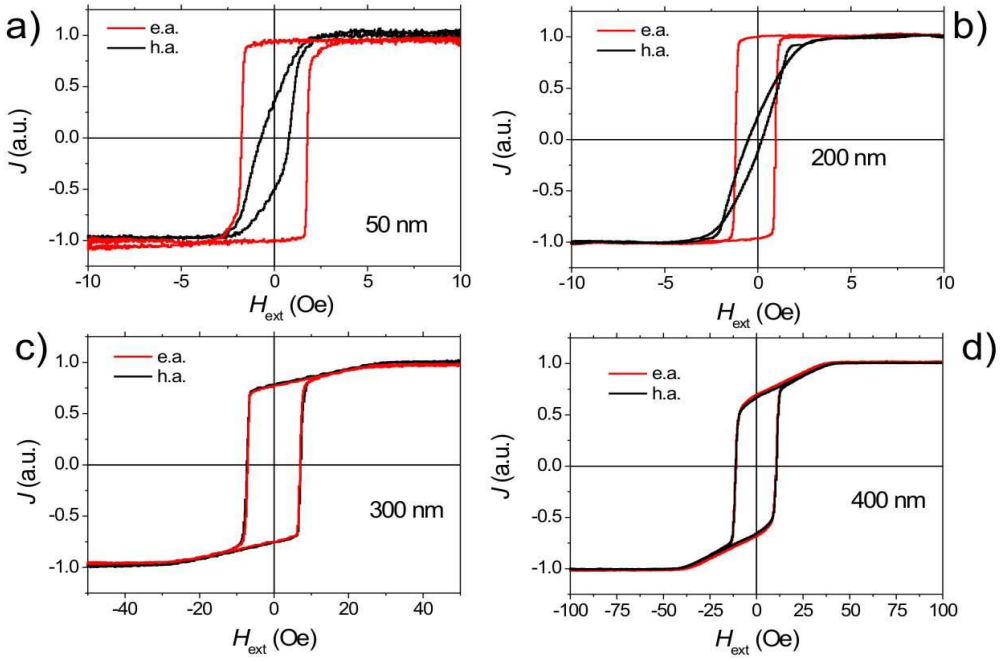


Abb. 7: Magnetisierungskurven, gemessen entlang der nominell leichten (e.a.) und schweren (h.a.) Richtung der Magnetisierung für verschiedene $Ni_{81}Fe_{19}$ Schichtdicken.

Wie aus dem in Abb. 8 dargestellten Ergebnis der Untersuchung der Auswirkungen der Zwischenschichtdicke auf die Permeabilität wird erst mit einer Zwischenschichtdicke von t_{SiO}=20 nm die volle Permeabilität erreicht. Aus dem direkten Vergleich mit der „Biasfeld“ Messung ergibt sich eine Permeabilität von μ ≈ 2000 im gesamten Bereich für Schichtdicken größer als t_{SiO}=10 nm.

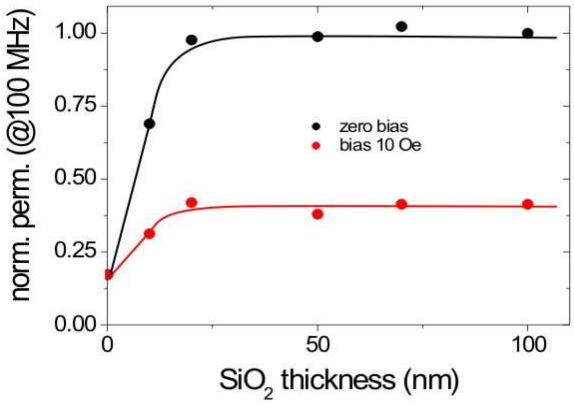


Abb. 8: SiO2-Zwischenschichtdickenabhängigkeit der normierten relativen Permeabilität für Ni81Fe19/SiO2/Ni81Fe19 (200nm/0-150 nm/200nm) Strukturen. Gegenübergestellt sind Messungen ohne („zero bias“) und mit einem „Biasfeld“ von 10 Oe (vgl. Abb. 3).

Die weichmagnetischen Eigenschaften des Magnetkerns konnten auch durch magnetische Domänenuntersuchungen bestätigt werden (Abb. 9). Ohne angelegtes äußeres Magnetfeld befindet sich die oberste magnetische Lage in einem Eindomänenzustand. Auch zeigt die oberste magnetische Schicht die angestrebte definierte einachsige magnetische Anisotropie.

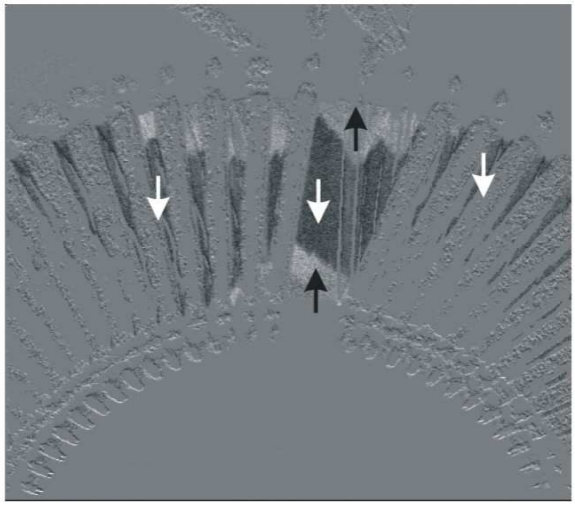


Abb. 9 Magnetische Domänenstruktur in der obersten Lage eines fertig prozessierten Toroids. Ein schwaches Biasfeld ist in Richtung der „dunklen Domänen“ angelegt.

Dies ist ein weiteres Indiz dafür, dass keine Degradation der Schichteigenschaften mit zunehmender Schichtdicke stattfindet. Insbesondere der Eindomänenzustand ist ein Hinweis über eine funktionierende Laminierung mit schwacher Zwischenschichtkopplung. Ein Einfluss der Spulenstruktur auf das Domänen- oder Magnetisierungsverhalten wurde nicht gefunden.
Parallel zu den magnetooptischen Untersuchungen auf Schichtebene wurden in enger Kooperation zwischen Siemens dem Ceasar bzw. später Universität Kiel und dem IFW in drei Layoutzyklen Mikrotransformatoren und Mikrospulen ausgelegten und an den fertig Prozessierten umfassende Untersuchungen durchgeführt. Dabei standen die Ermittlung der applikationsrelevanten Parameter wie Zielinduktivitäten zwischen 5µH und 50µH @ 10MHz, sowie Güten größer 20 und möglichst ideale Kopplung in den Transformatoren im Vordergrund. Dazu wurden die unterschiedlichen Spulen bzw. Transformatoren mit Network/Spektrum Analyzer 4195A von HP, der Quad Tech 7600 LCR-Messbrücke und dem ZVRE-Vector Network Analyzer von Rohde & Schwarz vermessen. Mit den gewonnen Daten wurde eine statistische Auswertung der prozessierten Wafer vorgenommen. Es wurden darüber hinaus zu Vergleichs- und Verifikationzwecken Messungen an kommerziell erhältlichen kleinen Transformatoren und Spulen (Durchmesser 5mm-20mm) mit unterschiedlichen Kernmaterialien (Ferritkernen, Kernen aus nanokristallinen bzw. amorphen ferromagnetischen metallischen Legierungen (Vitrovac Vitroperm)) durchgeführt.
Es wurden Modelle zur Rückrechnung von Bauelementewerten aus Messergebnissen und zur Simulation des Verhaltens verbessert. Durch die Messungen und die nachfolgende Modellierung konnte gezeigt werden, dass die Erhöhung der Schichtdicke der Isolationsschichten zwischen Kern und Bewicklung die Kapazität zwischen Windung und Kern etwa um Faktor 4 reduziert und damit neben anderen Einflüssen zu einer deutlichen Erweiterung des Betriebsfrequenzbereiches der Microspulen beiträgt (Vergleich Abb. 10 und Abb. 11). Die angestrebte Lage des Gütemaximums bei 10MHz bis 20MHz konnte gut erreicht werden. Die Messungen zeigen aber auch, dass die Isolation zwischen Kern und Bewicklung und innerhalb der Bewicklung noch immer großes Verbesserungspotential aufweist. Eine Reduktion der lokalen Kurzschlüsse zwischen Bewicklung und Kern sowie eine Reduktion des ohmschen Widerstandes der Bewicklung ist notwendig, um auch die geforderten hohe Güten bei 10MHz zu erreichen (siehe Abb. 12). Die maximal erreichten Güten lagen bei 2,5 bis 3 und sind damit noch um etwa einen Faktor 8 zu gering. Die Induktivitätswerte, die erreicht wurden, waren mit 7,5µH verglichen mit dem dem Stand der Technik gut. Bewegten sich aber aus Projektsicht im unteren Zielbereich. Durch die stark limitierte Schichtdicke (auf max. 7,5µm) konnten auch diese Werte nur durch eine hohe Windungsdichte und damit große Serienwiderstände erreicht werden. Vor allem der Umzug der Technologie von Bonn nach Kiel schränkten die weitere Optimierung der Bauelemente ein.

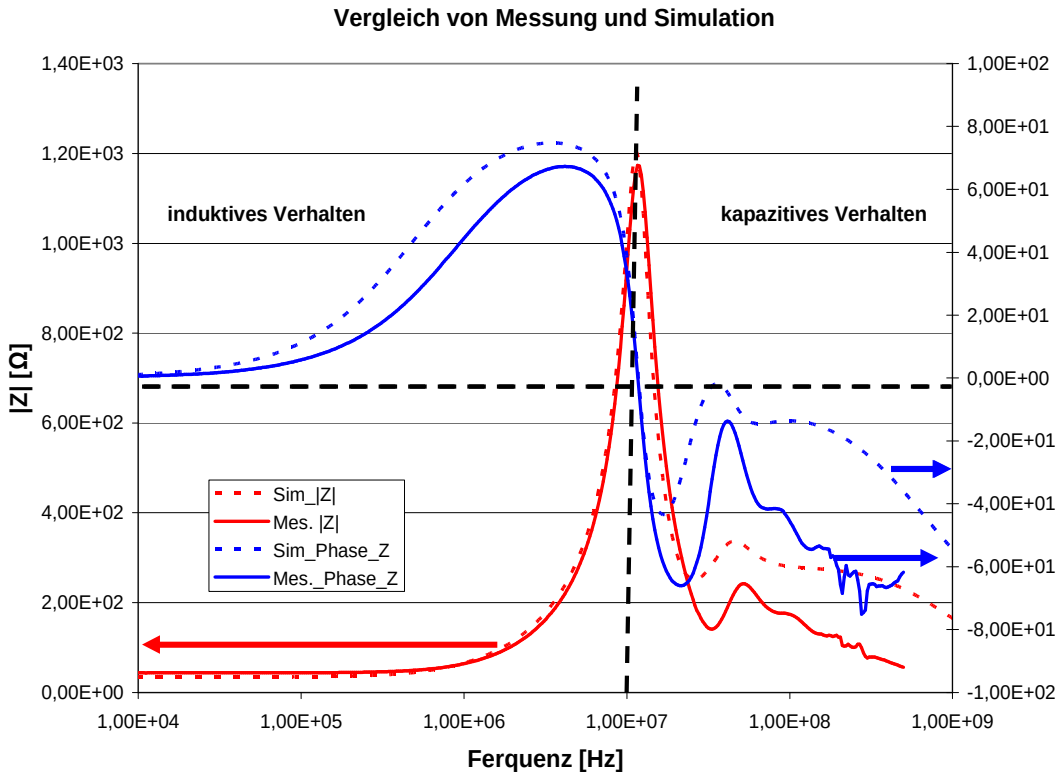


Abb. 10 Messung und Simulation einer Mikrospule mit NiFe Kern.

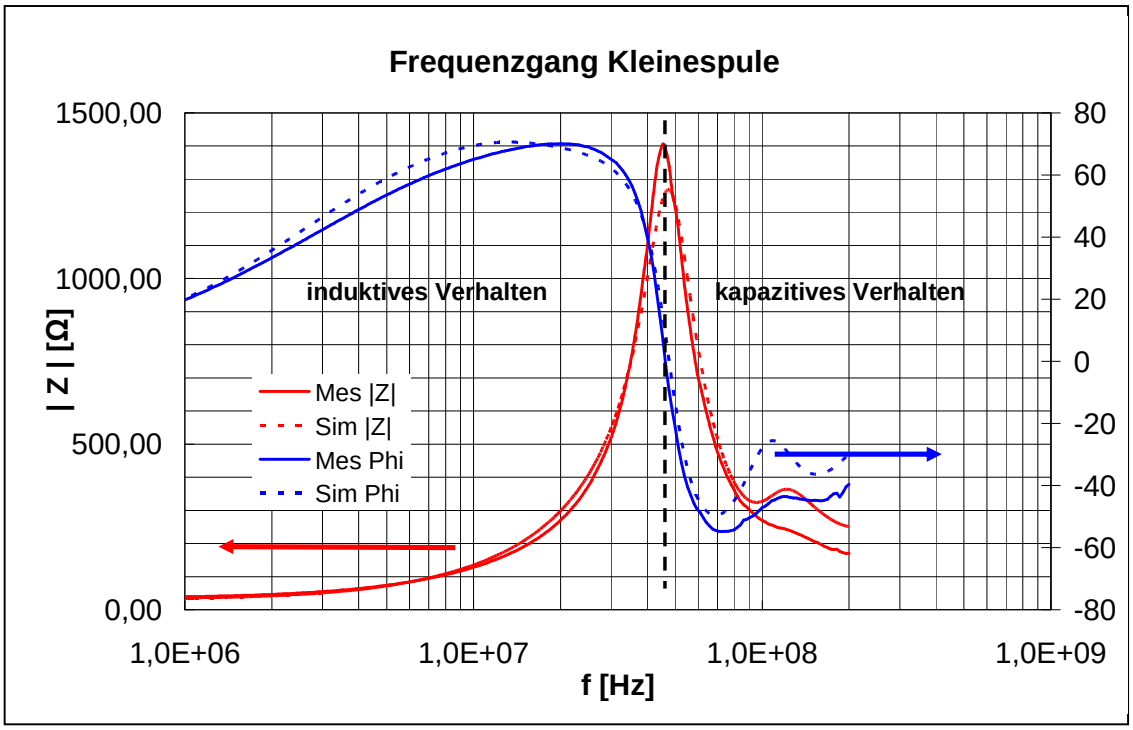


Abb. 11 Messung und Simulation einer Mikrospule mit NiFe Kern und dicker Isolationsschicht

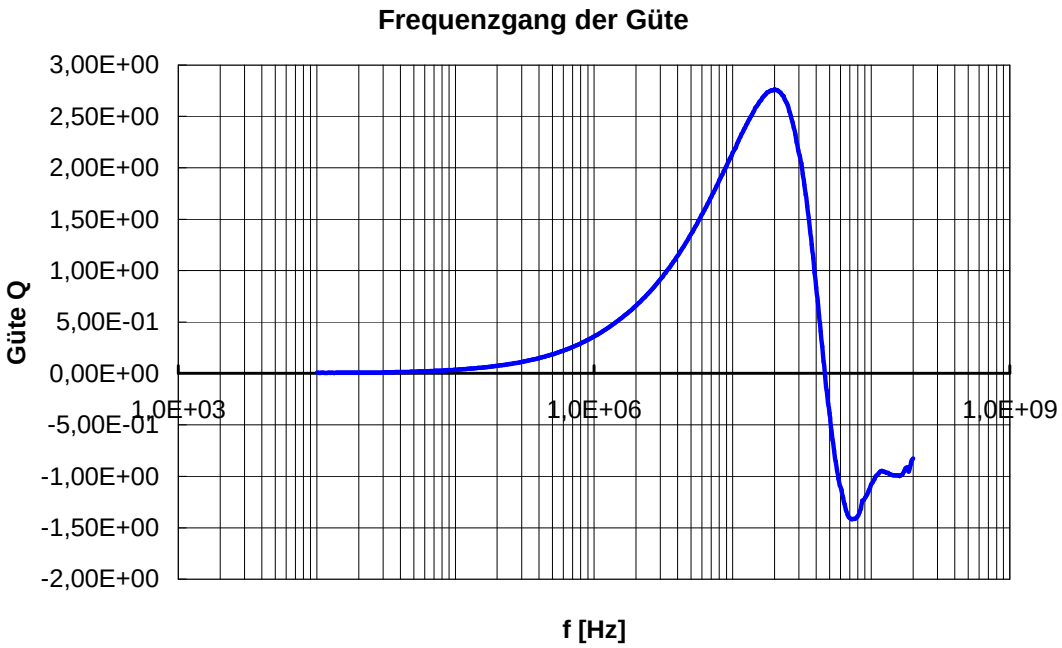


Abb. 12 Messung der Güte der Mikrospule aus Abb. 2 mit NiFe Kern und dicker Isolationsschicht

Neben den elektrischen Untersuchungen wurden auch das trotz der technischen Handicaps mögliche Anwendungspotential in unterschiedlichen Anwendungen untersucht. Exemplarisch sei hierzu der OLED-Demonstrator erwähnt.

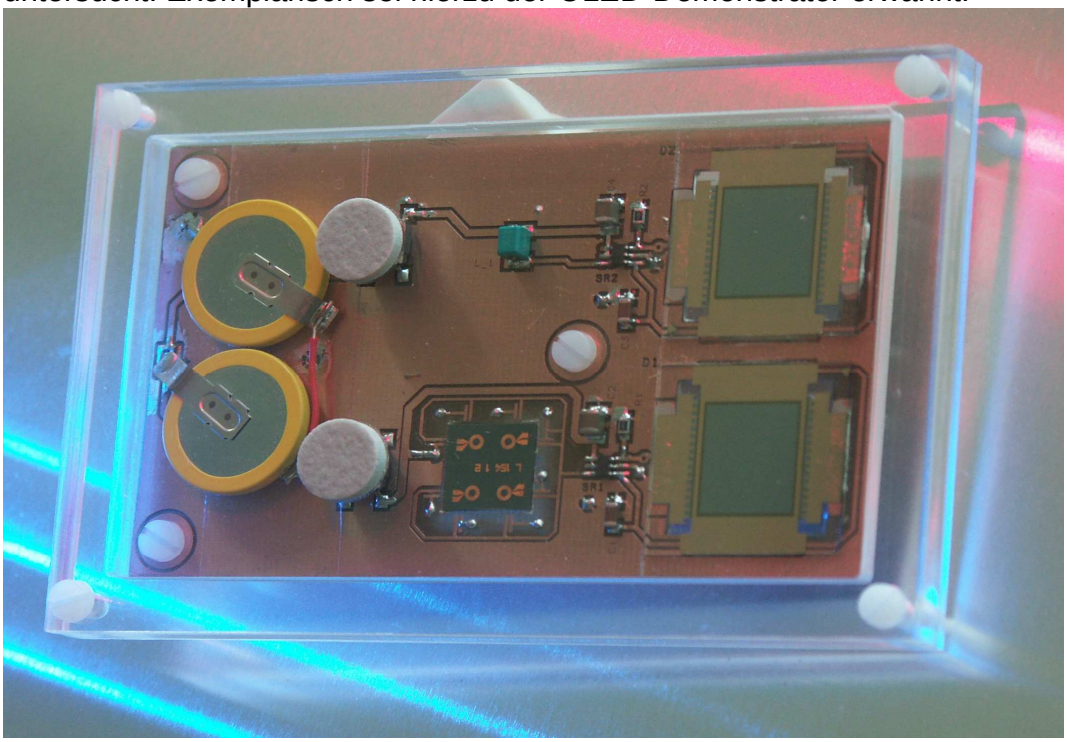


Abb. 13 Mikrospulen OLED-Demonstrator

Aufgrund des besonders augenscheinlichen Vorteils der geringen Bauhöhe der Mikrospulen wurde ein Demonstrator entwickelt, der diesen Vorteil besonders in den Vordergrund rückt (siehe Abb. 13). Durch die Kombination einer in ihrer Bauform sehr flachen organischen Leuchtdiode (OLED) mit einer sehr flachen Microspule anstelle der sehr voluminösen diskreten Spule für den LED-Treiber kann eine in der Anwendung sehr interessante sehr flache Gesamtbauform erreicht werden. Dadurch können die gestalterischen Möglichkeiten, welche die sehr flachen OLED´s bieten, ideal genutzt werden. Der direkten Umsetzung in Produkten steht hier leider die geringe Güte und der damit verbunde reduzierte Wirkungsgrad des LED-Treibers im Wege.

2.2 Verwertungsmöglichkeiten

Die als LED-Treiber zum Einsatz kommenden DC/DC Konverter in Buck/Boost Konfiguration benötigen häufig nur noch eine oder mehrere Induktivitäten als einziges externes Bauelement. Diese Induktivität könnte mit der in diesem Projekt entwickelten Technologie direkt auf den Treiberchip integriert werden und damit das letzte externe Bauelement eingespart werden. Durch die kleinere und vor allem flachere Bauform könnte ein nicht unwesentlicher Wettbewerbsvorteil z.B. für Siemens Osram erzielt werden. Die flache Bauform der Mikroinduktivitäten könnte sich vor allem zum Treiben von OLED-Beleuchtungs-einheiten (organische Leuchtdioden), wie sie derzeit von Philips und Osram entwickelt werden, eigenen. Kommerziell verfügbare Induktivitäten weisen bei den notwendigen Nennwerten eine vergleichsweise hohe Bauform auf. Um den gestalterischen Möglichkeiten der sehr flachen OLEDS Rechnung zu tragen sollten die Induktivitäten maximal die gleiche Dicke wie die OLEDS aufweisen. Eine Stromregelung könnte mit einem integrierten GMR-Stromsensor erfolgen [17, 18]. Hier liegt ein klarer Vorteil der in diesem Projekt untersuchten Mikroinduktivitäten. Einer direkten Umsetzung stehen jedoch die nur unvollständig erreichten Spezifikationen im Wege. Vor allem die hohen Serienwiderstände und die damit verbundene geringe Güte führt mit den derzeit vorhanden Spulen zu nicht vertretbar hoher Verlustleistung.
Eine Verwertung im Kommunikationsbereich trüben die von Analog Devices und Infineon während der Projektlaufzeit vorgelegten Ergebnisse ein. Die auf Basis einer induktiven Kopplung ohne Magnetkern erzielten Ergebnisse bei der Datenübertragung machen die teurere Alternative unattraktiv.
Der direkten Anwendung in der Medizin steht neben der geringen Güte auch die nicht erreichte galvanische Trennung im Wege.

2.3 F&E Ergebnisse von dritter Seite bzw. Marktumfeld

Das in Abb. 14 dargestellte Produktdatenblatt der Firma Analog Devices, welches während der Projektlaufzeit veröffentlicht wurde, steht exemplarisch für eine Reihe von Entwicklungen auf diesem Gebiet. Entsprechende Produkte schränken die Applikationsmöglichkeiten für die im Rahmen des Projektes erzielten Ergebnisse im Bereich der Datenkommunikation ein.

ANALOG DEVICES

Dual-Channel Isolators with Integrated DC/DC Converter, 50 mW

Preliminary Technical Data

ADuM5240/ADuM5241/ADuM5242

FEATURES

- Integrated isolated DC/DC converter
- Regulated 5V/10 mA output
- Dual dc-to-10 Mbps (NRZ) signal isolation channels
- Narrow body SOIC 8-lead package
- High temperature operation: 105°C
- Precise timing characteristics:
  - 3 ns maximum pulse-width distortion
  - 3 ns maximum channel-to-channel matching
  - 70 ns maximum propagation delay
- High common-mode transient immunity: > 25 kV/µs
- Safety and regulatory approvals (pending)
  - UL recognition
    - 2500 V rms for 1 minute per UL 1577
  - CSA component acceptance notice #5A
  - VDE certificate of conformity
    - DIN EN 60747-5-2 (VDE 0884 Part 2): 2003-01
    - DIN EN 60950 (VDE 0805): 2001-12; DIN EN 60950: 2000
    - V_{IORM} = 560 V peak

GENERAL DESCRIPTION

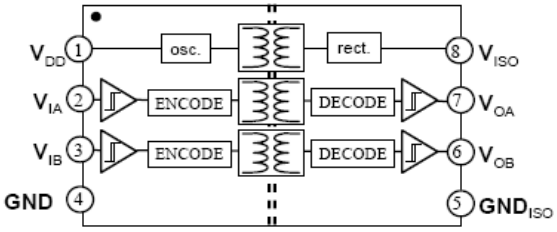


Figure 1. ADuM5240 Functional Block Diagram

Abb. 14 Produktdatenblatt der Firma Analog Devices aus dem Jahr 2008