

---

# Materialwissenschaftliche Aspekte der Leistungselektronik

---

## Integrierte 3D-Spulen mit Pulvermaterialkernen für miniaturisierte DC-DC-Wandler

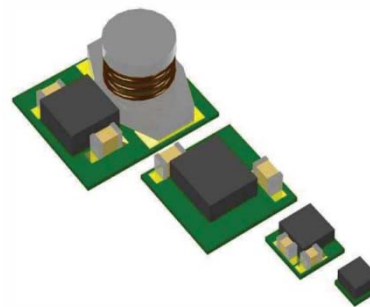
T. Lisec, 08.05.17

---

# Einleitung

---

- Smart Power - Einer der Top 4 Techniktrends weltweit.
- Einer der Hauptinhalte - Spannungsversorgung moderner elektronischer Systeme.
- Probleme:
  - Funktionelle Einheiten eines elektronischen Systems (z.B. Mobiltelefon) erfordern unterschiedliche Versorgungsspannungen.
  - Spannungsversorgung muss dynamisch an jeweilige Erfordernisse angepasst werden können, um Energie zu sparen.
- Lösung: Individuell angepasste Spannungsversorgung für jede Funktionseinheit.
- Spannungsversorgung sollte daher:
  - keinen Platz einnehmen,
  - nichts kosten,
  - keine Energie verbrauchen.
- Miniaturisierung ist zwingend erforderlich.



Fläche (mm <sup>2</sup> )	Volumen (mm <sup>3</sup> )	Frequenz (MHz)
50	150	1
30	25	5
7	3,5	20
2	1	50-100

*Evolution der Spannungsversorgung elektronischer Systeme [1].*

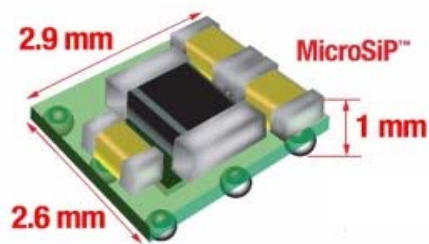
# Stand der Technik Spannungswandler

---

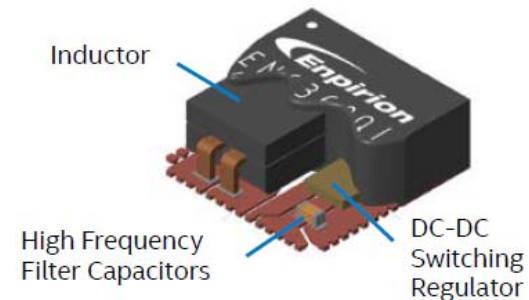
- Produkte sind als "System-in-Package" (SiP) erhältlich.
  - Bei den kleinsten Modulen ist der IC integriert im Träger, passive Elemente (Induktivitäten, Kondensatoren) befinden sich darüber auf dem Träger.
  - Kantenlänge der Module 2-12 mm je nach Funktionalität und Schaltfrequenz.



*NXE1-Serie von Murata [4],  
Schaltfrequenz 75-120 kHz,  
12.7 mm x 10.4 mm x 4.4 mm.*



*TPS81256 von TI [2],  
Schaltfrequenz 4 MHz.*



*Enpirion-Serie von Intel-Altera [3],  
EP5348UI: Schaltfrequenz 9 MHz,  
2.0 mm x 1.75 mm x 0.9 mm.*

- Weitere Verringerung der Baugröße nur durch Integration der passiven Elemente.  
→ Sogenannte "System-on-Chip" (SoC) befinden sich weltweit in Entwicklung.
- Generelles Problem: Miniaturisierung der Induktivität.

---

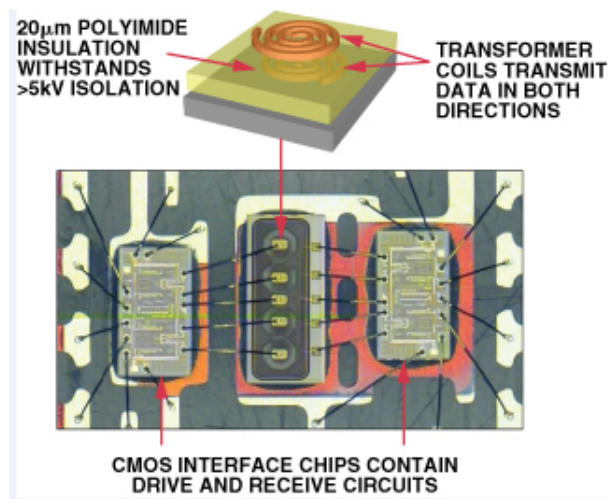
## Seite 3

All rights reserved, also regarding any disposal, exploitation, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for property rights.

© Fraunhofer ISIT 2016

# Stand der Technik integrierte Spulen

- Planare Spulen sind auf Halbleitersubstraten leicht zu erzeugen.
  - Standard sind Luftspulen → Induktivität/Fläche per se sehr klein.
  - Leitbahnquerschnitt gering → Widerstand hoch → Windungszahl beschränkt.
- Luftspulen finden Anwendung im Bereich hoher Frequenzen und geringer Leistungen.

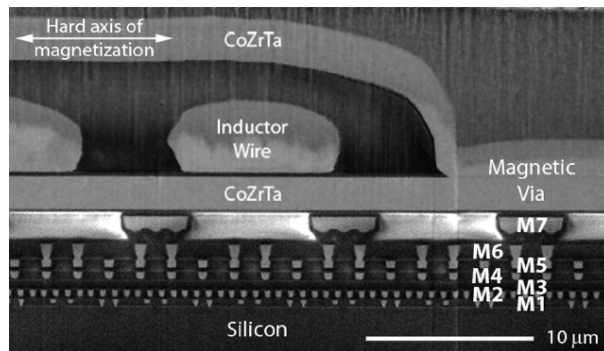


*iCoupler-Technologie von Analog Devices [5].*

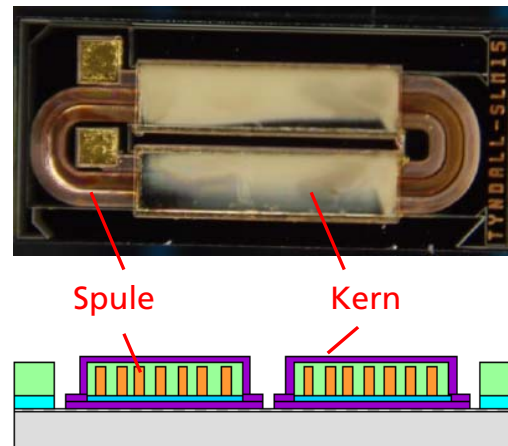
- Für DC-DC-Wandler sind Spulen mit Kern unumgänglich, um die erforderlichen hohen Induktivitätswerte zu erreichen.
- Probleme der Halbleitertechnologie:
  - Mittels der Standardverfahren lassen sich nur vergleichsweise dünne, metallische Schichten gut abscheiden.
  - Hohe Verluste durch Wirbelströme in metallischen Schichten.
  - Abscheidung von Ferrit-Schichten sehr aufwendig.

## Stand der Technik integrierte Spulen mit Kern

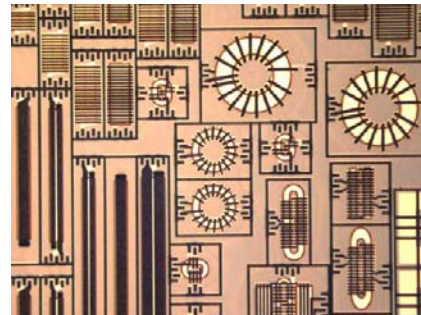
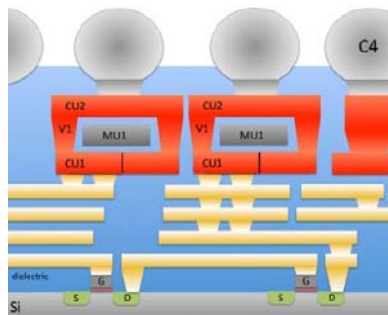
- Trotz Wirbelstromproblem basiert eine überwiegende Anzahl der integrierten Lösungen auf Spulen mit metallischem Kern.



*Integrierte Spule von Intel. Der Kern besteht aus mehreren dünnen, voneinander isolierten CoZrTa-Lagen [6].*



*Integrierte Spule von Tyndall. Der Kern besteht aus galvanischem NiFe. Ein DC-DC-Konverter mit bis zu 80% Effizienz im Bereich 20-40 MHz wurde demonstriert. 40% der Verluste werden durch Wirbelströme verursacht [7].*

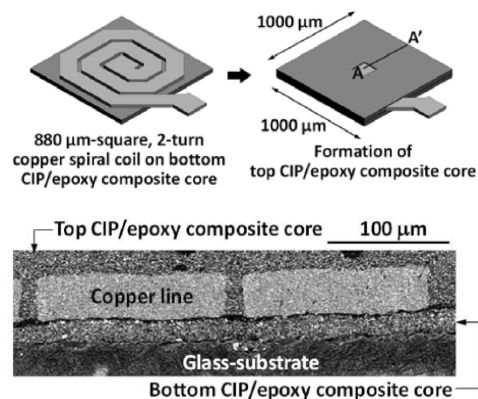


- Erste Produkte sind vermutlich von Ferric zu erwarten. Einführung wurde für 2018 annonciert.

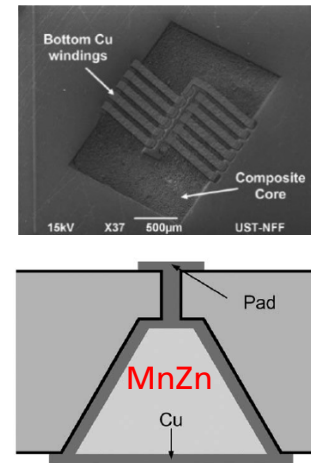
*Solenoid-Spulen von Ferric, integriert in BEOL-Prozess von TSMC [8].*

## Stand der Technik integrierte Spulen mit Kern

- Alternativ zur dünnen Schichten werden Kerne unter Verwendung von polymergebundenem Pulver hergestellt, z. B. durch Molding, Casting, Screen Printing u.Ä.
  - Das magnetische Material kann nahezu frei gewählt werden.
  - Erheblich geringere Wirbelstromverluste in metallischen Kernen, da die einzelnen Partikel elektrisch voneinander isoliert sind.



*Planarspule, umhüllt von einem Carbonyleisen-Epoxy-Kern. Die Induktivität ist ca. 3 mal höher im Vergleich zu einer Luftspule gleicher Größe [9].*

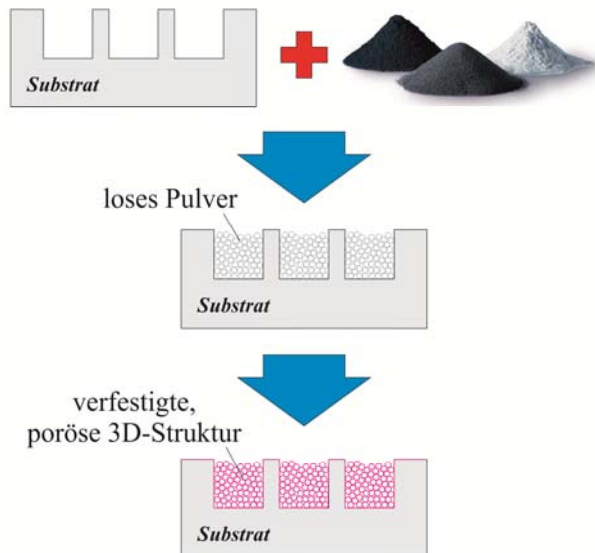


*3D-Solenoid-Spule mit MnZn-Ferrit-BCB-Kern, eingebettet in ein Si-Substrat [10].*

- Probleme:
  - Nachbearbeitung der Substrate stark eingeschränkt aufgrund der geringen thermischen und chemischen Beständigkeit des organischen Matrixmaterials.
  - Strukturen kleiner 100 µm lassen sich kaum noch erzeugen.

# Neue ISIT-Technologie

- Ein am ISIT entwickeltes neues Verfahren erlaubt es, loses Pulver mittels Atomlagen-Abscheidung bei Temperaturen  $\leq 300^\circ\text{C}$  zu porösen 3D-Strukturen zu verfestigen.
  - Keine organischen Materialien involviert - Weiterbearbeitung bei Temperaturen bis  $400^\circ\text{C}$  unter Verwendung von Standardprozessen der IC-Technologie möglich.
  - Es können Strukturbreiten weit unterhalb  $100\ \mu\text{m}$  realisiert werden.



- Ausgangsmaterialien:
  - Trägersubstrat mit Kavitäten.
  - Loses Pulver (Partikel).
- Einbringen der losen Partikel in die Kavitäten auf dem Substrat.
- Agglomeration der Partikel zu dreidimensionalen, porösen Körpern mittels Atomlagenabscheidung.

## Seite 7

All rights reserved, also regarding any disposal, exploitation, reproduction, editing, distribution, as well as in the event of applications for property rights.

© Fraunhofer ISIT 2016

# Arbeiten innerhalb FhG

- In einem Fraunhofer-internen Projekt des ISIT mit dem IZM wurde das neue technologische Verfahren auf weichmagnetische Materialien angewandt.
- Aus Fe- und NiFe-Pulver wurden ringförmige Teststrukturen mit einem porösen magnetischen Körper in eine Wanne aus Si hergestellt.
- Teststrukturen wurden am IZM auf ihre magnetischen Eigenschaften untersucht.

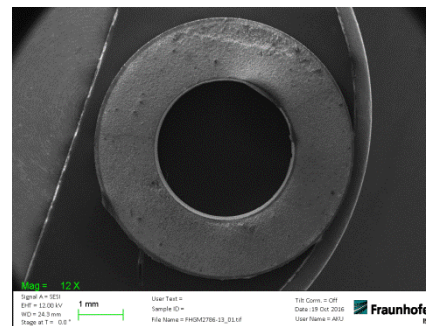
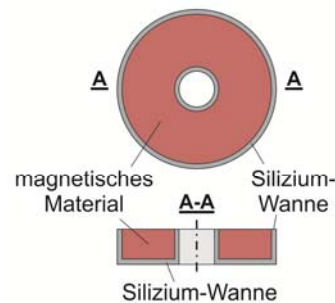
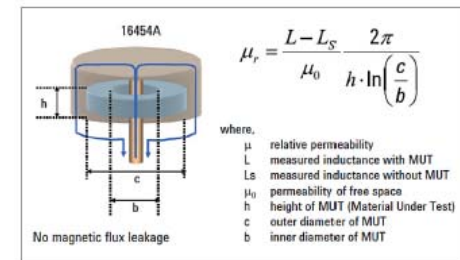
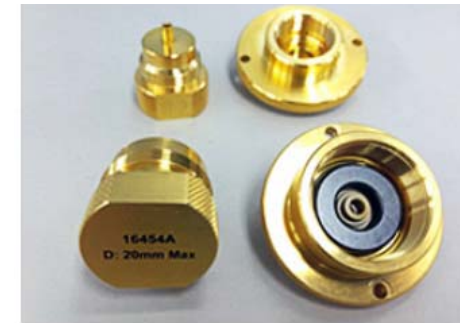


Foto von Teststrukturen aus 1 µm Carbonyl-Eisen-Partikeln, Querschnitts-Zeichnung sowie REM-Aufnahme einer fertiggestellten Teststruktur von oben. Der Außendurchmesser beträgt 6 mm.

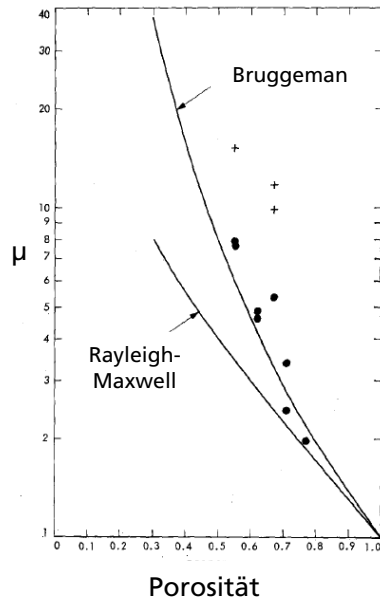


Fotos des Messgeräts und der Probenaufnahme sowie Beschreibung des Prinzips.



# Arbeiten innerhalb FhG

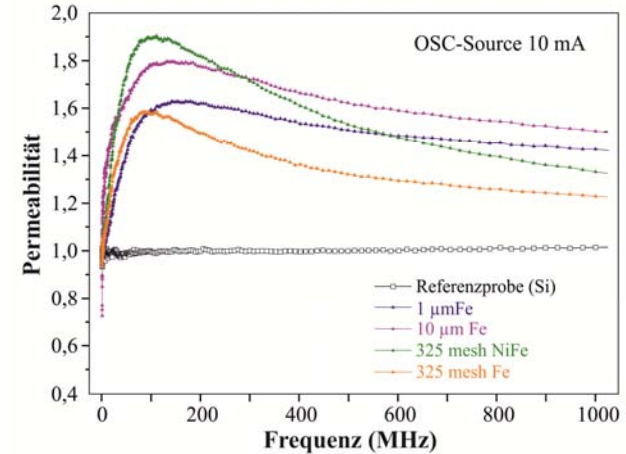
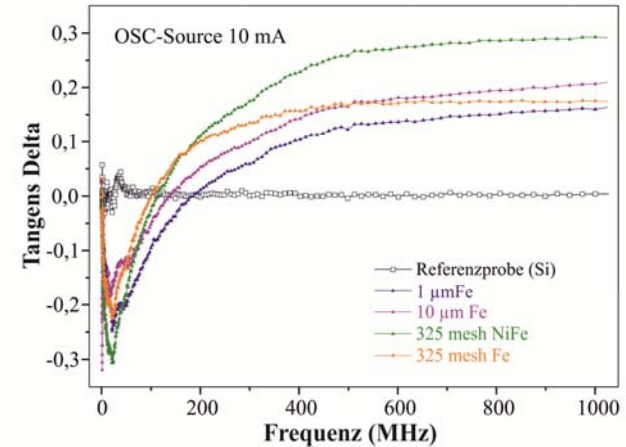
- Je kleiner die Partikel desto langsamer fällt die Permeabilität mit der Frequenz ab und desto geringer sind die Verluste ( $\tan \delta$ ).
- Permeabilität sinkt mit steigender Porosität,
- Im unteren MHz-Bereich sind die Messungen durch Proben- oder Meßaufbau verfälscht.



Änderung der Permeabilität in Abhängigkeit von der Porosität. Die Punkte entsprechen Messwerten für verschiedene Ferrite [11].

Partikel	Porosität
1 $\mu\text{m}$ Fe	64%
10 $\mu\text{m}$ Fe	56%
44 $\mu\text{m}$ NiFe	59%
44 $\mu\text{m}$ Fe	70%

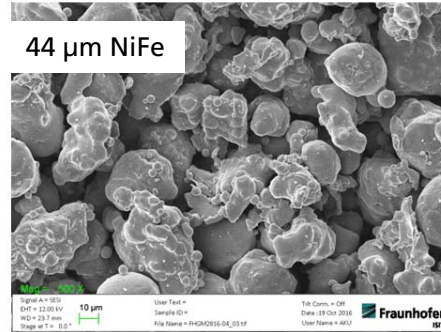
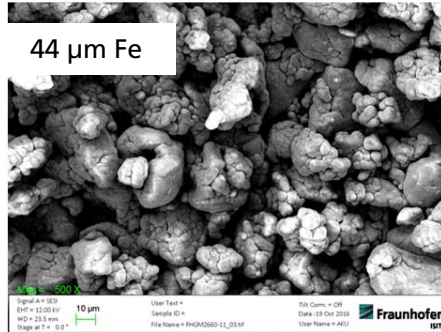
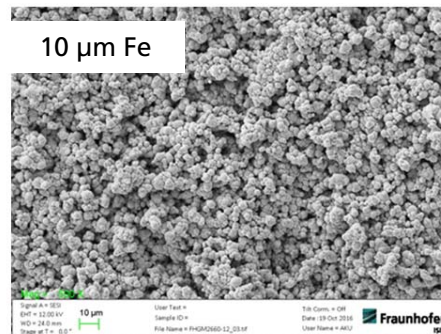
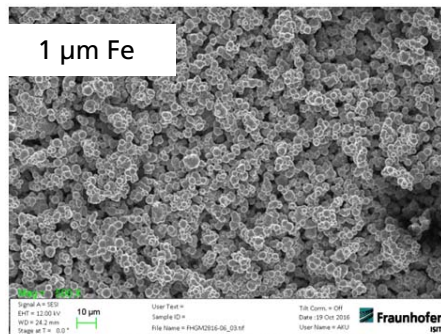
Porosität, ermittelt anhand von Gewichtsmessungen.



Permeabilität und  $\tan \delta$  für unterschiedliche Proben.

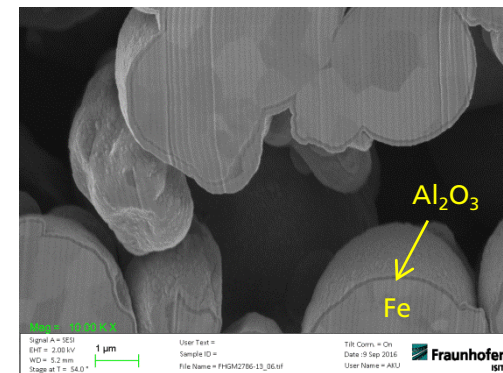
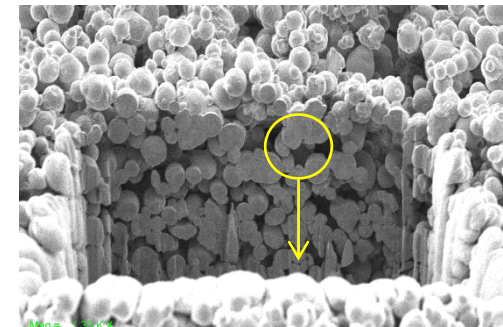
# Arbeiten innerhalb FhG

- Besonders hohe Porosität der Struktur aus 44  $\mu\text{m}$  Fe kommt durch die komplexe, verästelte Form der Partikel zustande, die aus vielen kleinen Körnchen bestehen.
- Geringe Unterschiede in der Permeabilität von 1  $\mu\text{m}$  und 10  $\mu\text{m}$  Fe erklären sich durch die Partikelgröße, die sich kaum unterscheidet.



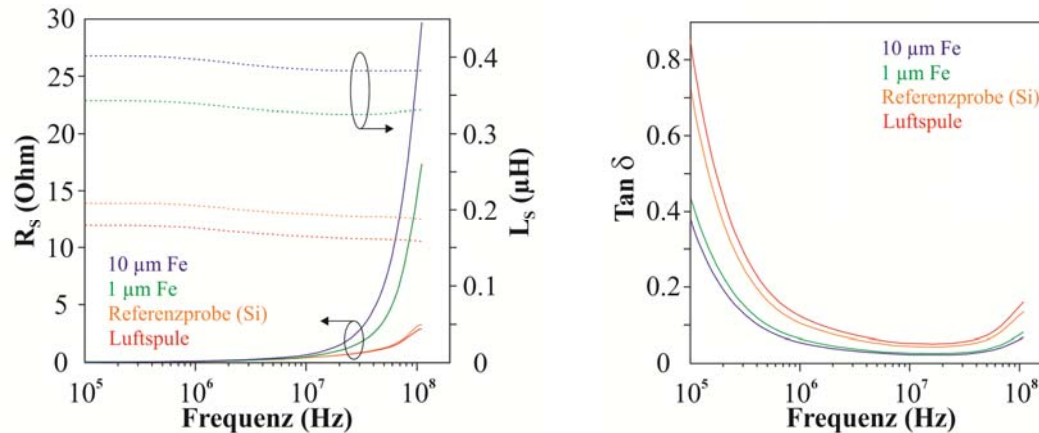
REM-Aufnahmen poröser Strukturen aus unterschiedlichen Partikeln, alle aufgenommen mit 500-facher Vergrößerung.

FIB-Querschnitt durch eine poröse Struktur, hergestellt aus 1  $\mu\text{m}$  Fe.

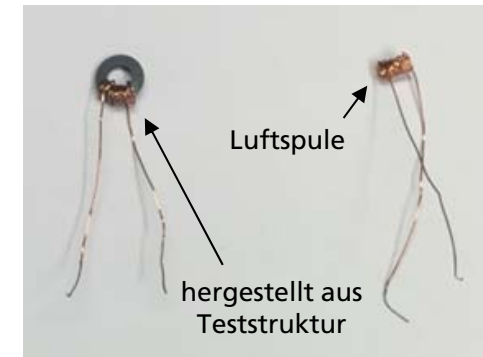


## Arbeiten innerhalb FhG

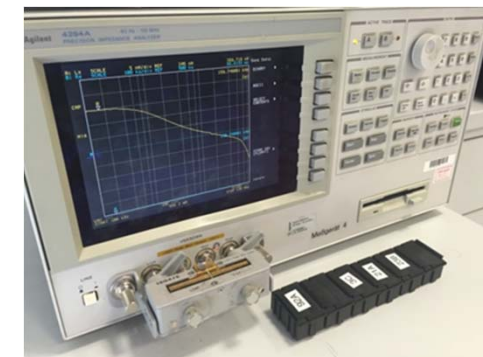
- Durch Bewickeln der Teststrukturen mit Cu-Draht (0,10 mm und 0,19 mm  $\varnothing$ ) wurden Spulen hergestellt.
- Ergebnisse bei 2 mA<sub>AC</sub> und 20 mA<sub>AC</sub> sind identisch.
- Verluste bei 100 mA<sub>AC</sub>: 30 mW bei 10 MHz (ca. 3  $\Omega$ ) bzw. 300 mW bei 100 MHz (ca. 30  $\Omega$ ).
- Optimaler Arbeitsbereich zwischen 10 und 30 MHz unabhängig vom Draht-Durchmesser.



*Induktivität, Widerstand und  $\tan \delta$  für Spulen mit bzw. ohne magnetischen Kern im Bereich 100kHz-100 MHz (jeweils 15 Windungen bzw. 0.19 mm Cu-Draht).*



*Aufnahme der am IZM hergestellten Spulen (oben) sowie Foto des Messaufbaus (unten).*



## Arbeiten innerhalb FhG

---

- Die Meßergebnisse lassen vermuten, daß:
  - die magnetischen Verluste mit der Frequenz kaum zunehmen und im Vergleich zu den Wicklungsverlusten vernachlässigt werden können,
  - der optimale Arbeitsbereich vor allem von der Wicklungsausführung bestimmt wird,
  - bis  $200 \text{ mA}_{AC}$  kein nennenswerter Verlustzuwachs im  $R_s$  zu erwarten ist und bis mindestens 2 A keine Sättigung für DC eintritt,
  - die Gleichstrommagnetisierung kaum Einfluss auf die Induktivität hat und eine Vormagnetisierung bis zu 1 A problemlos möglich wäre.
- Ausgehend von den Ergebnissen lassen sich für die Leistungsübertragung eines DC-DC-Wandlers folgende Grenzen annehmen:
  - im nichtkontinuierlichen Betrieb bei 10 MHz bis zu 10 Watt,
  - im kontinuierlichen Betrieb bei 100 MHz bis zu 5 Watt.
- Es wurde ein Schaltungspatent für einen neuartige, ultraschnelle und rippelfreie Konverter-Topologie eingereicht, die ohne Glättungskondensatoren auskommt.
  - Bei 10 MHz mit Induktivitäten größer 400 nH erfolgreich simuliert.

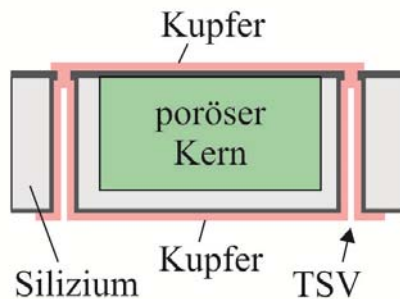
## Integrierte 3D-Spule mit Kern

- Integrierte Spule muss mit konventionellen Komponenten konkurrieren können.
- Zu den kleinsten konventionellen Spulen gehört die PFL1005-Serie von Coilcraft.
  - Komposit-Kern,
  - 18-1000 nH auf nur 0,73 mm<sup>2</sup> Fläche,
  - Preis 0,36 ct. (ab 2000 Stück).



core	composite
inductance	180 nH
SRF	1250 MHz
R <sub>DC</sub>	0,21 Ω
I <sub>sat</sub>	880 mA
size (mm)	1,14×0,64×0,71

Coilcraft PFL1005-181MRU [12].



- 3D-Spule mit porösem Kern unter Nutzung einer TSV-Technologie:
  - 50-150 μm Via-Durchmesser, 100-250 μm Pitch,
  - Dicke der Cu-Leitbahnen 20 μm,
  - Dicke des weichmagnetischen Kerns 300-600 μm.

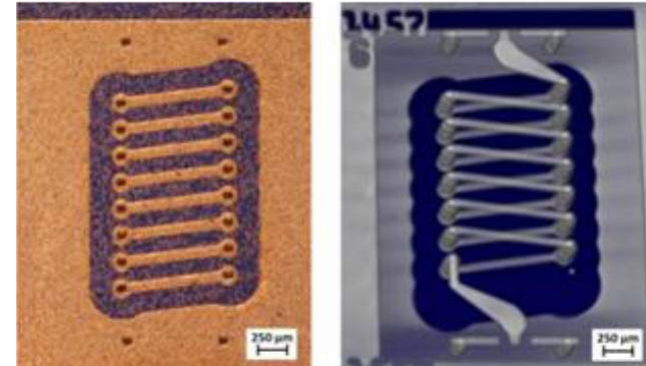
- Herstellungskosten für 200mm-Wafer im Entwicklungsstadium geschätzt 2500 Euro  
→ 10 ct./mm<sup>2</sup> (5 mm Randausschluss, 90 % Ausbeute).
- Angenommen, die Waferkosten sinken in großen Stückzahlen auf 800-1000 Euro  
→ 3-4 ct./mm<sup>2</sup>

## Integrierte 3D-Spule mit Kern

---

- 3D-Spulen von Silex ohne Kern erreichen bei 8 Windungen ca. 12 nH bei einer Fläche von ca. 2 mm<sup>2</sup>.

*Draufsicht auf eine 3D-Spule mit 8 Windungen (links) sowie 3D-Röntgen-CT einer Struktur mit 6 Windungen (rechts), beide von Silex. [13].*



- Angenommen, die Miniaturspulen von Coilcraft kosten in sehr großen Stückzahlen nur noch 8 ct./Stück.
- Integrierte Spule bleibt vergleichbar, wenn die Chipfläche 2 mm<sup>2</sup> nicht übersteigt.
- Die Induktivität einer Spule, ähnlich zu der von Silex, wäre dann:
  - ca. 24 nH mit porösem Kern so wie jetzt ( $\mu_r = 2$ ),
  - ca. 120 nH bei einer Steigerung der Permeabilität des porösen Kerns um den Faktor 5 ( $\mu_r = 10$ ).
- Rein kostentechnisch betrachtet könnten integrierte Spulen für eine praktische Anwendung in DC-DC-Wandlern attraktiv werden, sobald deren Schaltfrequenz einige 10 MHz erreicht.

## Integrierte 3D-Spule mit Kern

---

- Weitere Vorteile der integrierten 3D-Spule:
  - Maximale Stromdichte in planaren Leitbahnen auf Silizium ist sehr viel größer, als in einem herkömmlichen Cu-Draht. Gemäß ITRS-Roadmap  $2 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$  bei  $105^\circ\text{C}$ . → Theoretisch einige 10 A möglich in  $10 \mu\text{m}$  dicken Cu-Leitbahnen
  - Platzersparnis durch die Möglichkeit der Integration der Spule direkt auf dem DC-DC-Wandler-IC oder einem Interposer-Chip.
- Wesentlicher Nachteil der integrierten 3D-Spule:  $R_{\text{DC}}$  ist vergleichsweise hoch, Werte unter  $0,5 \Omega$  sind schon eine Herausforderung.
- Generell ist zu vermuten, dass bei gleichem Kernmaterial und vergleichbaren Kernabmessungen mit integrierten Spulen eine ähnliche Performance erreicht wird wie mit herkömmlichen Bauteilen (z.B. aus der Coilcraft-Serie PFL1005).

## Fazit

---

- Eine kostengünstige Herstellung integrierter 3D-Spulen auf Siliziumsubstraten ist möglich.
- Kann die Permeabilität des porösen Kernmaterials erheblich gesteigert werden, könnten integrierte Spulen als Einzelbauteile im Bereich  $< 250$  nH konkurrenzfähig werden zu herkömmlichen Miniaturspulen für Massenanwendungen wie DC-DC-Wandler.
- Die Durchsetzung integrierter 3D-Spulen auf dem Markt ist vermutlich nur eine Frage der Zeit.



## Literatur

---

- [1] C. O'Mathuna, "PwrSiP power supply in package power system in package", *Proc. 3D-PEIM 2016*, Raleigh, NC, USA
- [2] <http://www.electronics-sourcing.com/2012/07/18/ti-introduces-ultra-small-boost-power-module-for-smartphones-and-tablets/>
- [3] [https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en\\_US/pdfs/literature/br/enpirion-brochure.pdf](https://www.altera.com/content/dam/altera-www/global/en_US/pdfs/literature/br/enpirion-brochure.pdf)
- [4] <http://www.murata.com/en-us/about/newsroom/news/product/power/2014/1110>
- [5] <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/digital-isolation-solutions-to-design-problems.html>
- [6] D. S. Gardner, "Review of on-chip inductor structures with magnetic films", *Transactions on Magnetics*, Vol. 45, No. 10, 2009
- [7] N. Wang, "High frequency DC-DC converter with co-packaged planar inductor and power IC", *Proc. ECTC 2103*, Las Vegas, NV, USA
- [8] N. Sturcken, "Integrated power conversion with thin-film magnetic core inductors", *Presentation APEC 2014*, 3D Power packaging industry session, Beijing, China
- [9] Y. Sugawa, "Carbonyl-iron/epoxy composite magnetic core for planar power inductor used in package-level power grid", *Transactions on Magnetics*, Vol. 49, No. 7, 2013
- [10] X. Fang, "A novel silicon-embedded toroidal power inductor with magnetic core", *Electron Dev. Let.*, Vol. 34, No. 2, 2013
- [11] J. A. Baldwin, "Properties of a Ferromagnetic Powder in a Nonmagnetic Matrix", *J. Appl. Phys.*, Vol. 39, 1968
- [12] <http://www.coilcraft.com/pdfs/pfl1005.pdf>
- [13] J. Liljeholm, "3D MEMS wafer level packaging exemplified by RF characterized TSVs and reliability with failure analysis", *Proc. IWLPAC 2014*, San Jose, CA, USA