

## SUPPORT NOTE

### SN029 | Einführung in die Magnetics-on-Silicon-Technologie

Martin Sittner



#### 1. EINLEITUNG

In der Elektronikbranche gibt es einen deutlichen Trend hin zur Miniaturisierung elektronischer Geräte. Gleichzeitig soll die Systemfunktionalität auch in Zukunft gewährleistet bzw. verbessert werden. Während die Fortschritte in der Halbleitertechnologie bereits sehr kleine Knoten und damit einen sehr hohen Integrationsgrad ermöglichen, ist dies bei passiven Komponenten noch rückschrittlicher. Vor dieser Herausforderung stehen zum jetzigen Zeitpunkt vorwiegend magnetische Bauteile. Die Gesamtgröße integrierter Lösungen wird daher in erster Linie durch das magnetische Bauteil bestimmt. Angesichts dieser Herausforderung, stellt Würth Elektronik seine Magnetics-on-Silicon-Technologie vor. Sie basiert auf dem gleichen Dünnschicht-Verfahren, das auch für die CMOS Technologie eingesetzt wird. Die Herstellung erfolgt durch einen Lithografieprozess, bei dem Plasmaabscheidung und Galvanisierungsverfahren zusammenwirken. Mit diesem Fertigungsverfahren sind beliebige magnetische Strukturen wie Spulen, gekoppelte Induktivitäten oder Transformatoren realisierbar. Darüber hinaus zeichnet sich der Fertigungsprozess durch eine hohe Flexibilität hinsichtlich Form und Chipgröße aus.

Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für eine Mikroinduktivität sowie einen Mikrotransformator mit einer verschränkten Wicklungsstruktur.

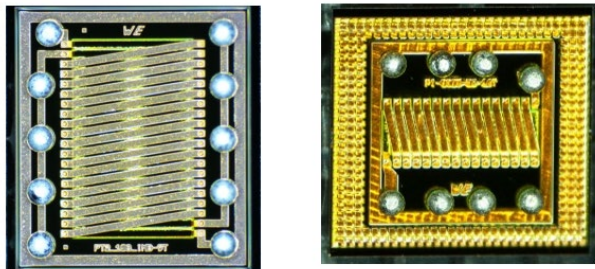


Abbildung 1: Beispielstrukturen: Mikrotransformator (links), Mikroinduktivität (rechts).

Passend zum aktuellen Miniaturisierungstrend ist die Technologie für den Hochfrequenzbetrieb ausgelegt, wodurch die Abmessungen der magnetischen Bauteile gering gehalten werden können.

#### 2. SCHICHTAUFBAU

Die Dünnschicht-Bauteile bauen auf undotiertem Silizium auf, das als Trägermaterial genutzt wird. Die obere und die untere Schicht bestehen jeweils aus galvanisiertem Kupfer mit einer Stärke von 25  $\mu\text{m}$ . Diese beiden Kupferschichten sind über Durchkontaktierungen in der gesamten Struktur miteinander verbunden. Zwischen beiden Kupferschichten ist ein 6  $\mu\text{m}$  starker, gesputterter CZT-Magnetkern (Cobalt-Zirkonium-Tantal) eingebettet. Für die erforderliche Isolierung zwischen den Schichten wird Polyimid als Isoliermaterial verwendet. Die Gesamtprofilhöhe des Bauteils beträgt lediglich 200  $\mu\text{m}$ .

Abbildung 2 stellt den beschriebenen Schichtaufbau schematisch dar.

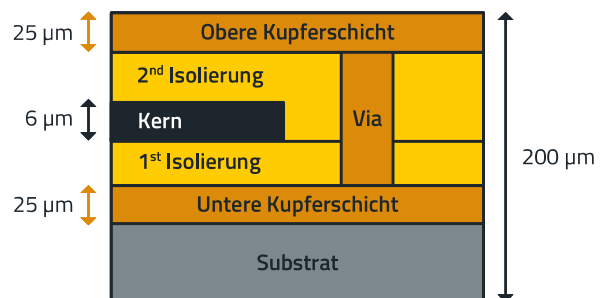


Abbildung 2: Schichtaufbau.

Durch die Verwendung eines speziellen CZT-Magnetkernmaterials wird die BH- oder Hystereseschleife optimiert, um sie mit Hochfrequenzanwendungen kompatibel zu machen. Aufgrund der schmalen BH-Schleife können die Kernverluste bei hohen Frequenzen gering gehalten werden, sodass diese Technologie auch bei Frequenzen im zweistelligen Megahertz-Bereich in Leistungsanwendungen eingesetzt werden kann. Darüber hinaus bietet der amorphe CZT-Kern eine hohe Sättigungsflussdichte, wie sie für solche Anwendungen erforderlich ist. Für Signalanwendungen wie die Isolierung der Signalstrecke eines digitalen Isolators mit geringem Strombedarf kann die Technologie auch bei den üblichen hohen Frequenzen im Bereich von mehreren hundert Megahertz eingesetzt werden.

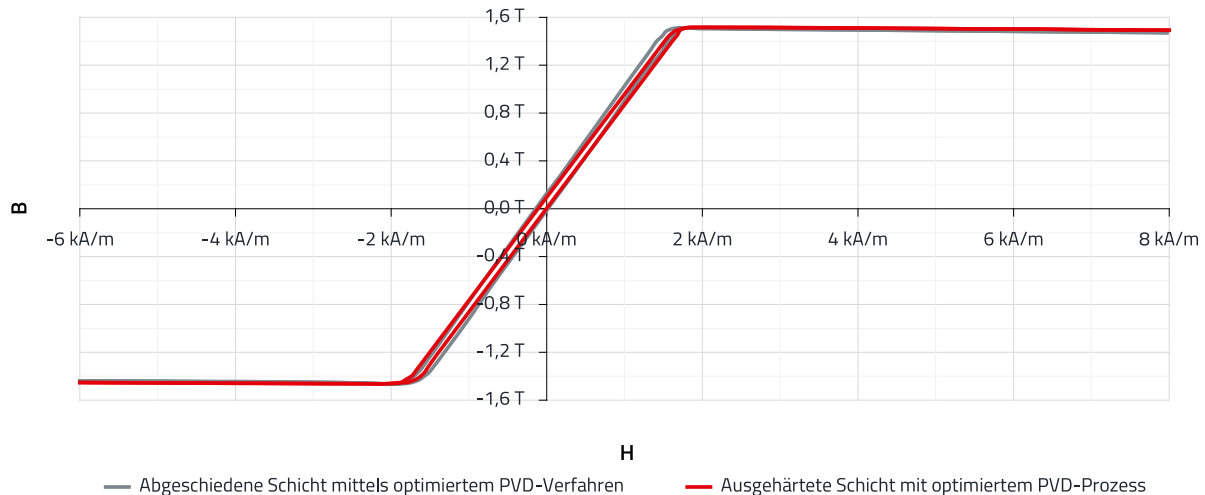


Abbildung 3: BH-Kurve des CZT-Magnetkernmaterials.

Um Wirbelstromverluste weiter zu minimieren, ist der Kern als laminierte Struktur mit dünnen Oxidschichten als Dielektrikum zwischen den CZT-Schichten aufgebaut. Das Kernmaterial wurde durch ein Vibrating Sample Magnetometer (VSM) charakterisiert. Es erreicht die magnetische Sättigung bei etwa 1,3 bis 1,4 T. Die gegebene BH-Kurve zeigt das harte Sättigungsverhalten (abrupter Abfall) des Magnetkerns (Abbildung 3).

### 3. TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN

Aufgrund der geringen Chipgröße der Bauteile liegt der Induktivitätsbereich vorwiegend im Nanohenry-Bereich. Grundsätzlich muss zwischen den wichtigsten Parametern wie Induktivität, Widerstand, Sättigungsstrom und Chipfläche ein Kompromiss gefunden werden. Würth Elektronik bietet kundenspezifische Anpassungen, um das für die jeweilige Anwendung am besten geeignete magnetische Design zu realisieren. Die folgende Aufzählung zeigt einen Überblick der derzeitigen möglichen Spezifikationen. Sie zeigt nicht die tatsächlichen technischen Limitierungen, sondern gibt wieder, was bereits realisiert wurde:

Spezifikationen für Mikrotransformatoren:

- L: 5 - 500 nH
- Q-Faktor > 12 bei 10 - 50 MHz
- $L/R_{DC} > 200 \text{ nH}/\Omega$
- Isolationsspannung bis 3 kV
- Kopplungsfaktor bis 0,95

Spezifikationen für Mikroinduktivität:

- L: 5 - 500 nH
- L/A bis 300 nH/mm<sup>2</sup>
- Q-Faktor 15...20 bei 10 - 50 MHz
- $L/R_{DC} > 400 \text{ nH}/\Omega$
- Sättigungsstrom 0,2 A ~ 2 A
- L-Toleranz:  $\pm 10 \%$

### 4. INTEGRATIONSOPTIONEN

Die Technologie bietet eine Vielzahl flexibler Integrationsmöglichkeiten. Chips können als WLCSP (Wafer Level Chip Scale Package) bestellt werden, einschließlich Lötkegeln mit einem Durchmesser von 250  $\mu\text{m}$ . Diese Option bietet die Möglichkeit der Package-in-Package-Integration und ist der einfachste Weg, Prototypen zu fertigen, da sie – wie in Abbildung 4 dargestellt – eine problemlose Leiterplattenbestückung ermöglicht.

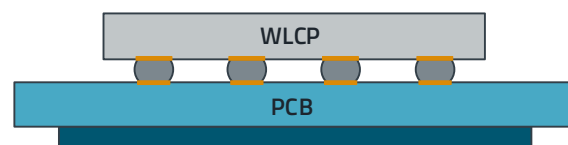


Abbildung 4: WLCSP auf Leiterplatte mit Lötkegeln von ca. 250  $\mu\text{m}$  für einfache Prototypenerstellung.

Chips können als Bare Dies mit Kupferpads für die Drahtbondintegration bestellt werden. Bei Verwendung von Golddrahtverbindungen kann zusätzlich zu den Kupferpads eine Nickel-Gold-Beschichtung aufgebracht werden.

Darüber hinaus ermöglicht die Technologie eine direkte Einbettung des Die auf Kundenseite. Die Chips können entweder direkt in den IC des Kunden eingebettet werden, oder Würth Elektronik kann die Chip-IP bereitstellen. Dies erfordert allerdings, dass die Fertigungsprozesse miteinander kompatibel sind. Bei Bedarf kann der Chip statt in einen IC auch direkt in eine Platine eingebettet werden. Zudem ermöglichen die flexiblen Integrationsmöglichkeiten auch einen Chiplet-Ansatz. Die verfügbaren Back-End-Optionen und Versandmöglichkeiten sind nachstehend noch einmal zusammenfassend aufgeführt:

Back-End-Verfahren:

- Cu-Pads + RDL
- NiAg-Beschichtung
- Lötkegeln
- Drahtbonden
- Platinenintegration

Mögliche Versandbedingungen:

- Unverdünnter oder rückseitig geschliffener Wafer
- IC-Integration
- Gurtverpackung

## 5. ZIELANWENDUNGEN

Mögliche Zielanwendungen sind sowohl Power- als auch Signal Applikationen. Integrierte DC/DC-Wandler mit und ohne Isolierung eignen sich für den Einsatz in Leistungsanwendungen. Empirische Erfahrungen zeigen, dass das Optimum bezogen auf den höchsten Q-Faktor bei einer Betriebsfrequenz zwischen 20 MHz und 30 MHz liegt. Exemplarisch stellt Abbildung 5 einen Leistungstransformator mit zwei Ausgängen dar, der für einen integrierten isolierten DC/DC-Wandler in einem monolithischen GaN-Gate-Treiber-IC vorgesehen ist.



Abbildung 5: Transformator mit zwei Ausgängen für die GaN-Gate-Ansteuerung.

Aufgrund der sehr hohen Schaltgeschwindigkeit von GaNs stellen die parasitären Effekte des Gesamtdesigns eine besondere Herausforderung dar. Daher muss der Integrationsgrad so hoch wie möglich sein.

Darüber hinaus werden in gängigen isolierten Leistungsanwendungen integrierte Impulstransformatoren verwendet. Der aktuelle technologische Trend zur KI stellt auch in Sachen Induktivität und Stromdichte deutlich höhere Anforderungen an magnetische Bauteile. Mit ständig steigenden Schaltfrequenzen von 60 MHz und mehr wird der erforderliche Induktivitätswert für PMICs, die in diesem Anwendungsbereich eingesetzt werden, sehr klein ( $L < 10 \text{ nH}$ ). Dies ermöglicht den Einsatz von Silizium-basierten Leistungsinduktivitäten mit niedrigem Induktivitätswert und geringem Widerstand, jedoch hohem Sättigungsstrom, der eine Stromdichte von  $J > 4 \text{ A/mm}^2$  erreicht.

Neben der isolierten Spannungswandlung für die interne Stromversorgung stellt die interne isolierte Signalübertragung innerhalb digitaler Isolatoren ein hervorragendes Beispiel für eine Signalanwendung dieser Technologie dar. Digitale Isolatoren wie der [WPME-CDIP 18024x15401x](#) von Würth Elektronik können extrem hohe Datenraten von beispielsweise 100 Mbit/s übertragen. Durch den Aufbau einer induktiven anstelle einer kapazitiven Isolationsbarriere ist es möglich, die interne Spannungswandlung und die Signalübertragung gleichzeitig zu realisieren.

Abbildung 6 zeigt ein Beispiel für einen Transformator mit Mittelanzapfung im Verhältnis 1:1 für die gleichzeitige Signal- und Energieübertragung.

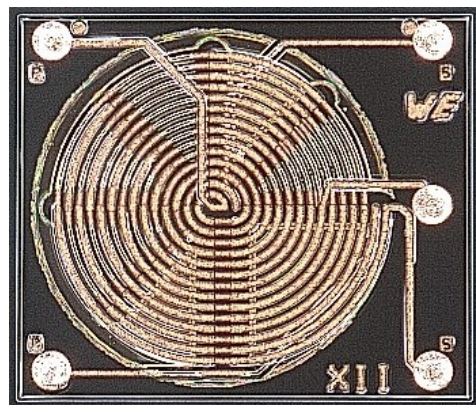


Abbildung 6: Transformator mit Mittelanzapfung für Signal- und Energieübertragung.

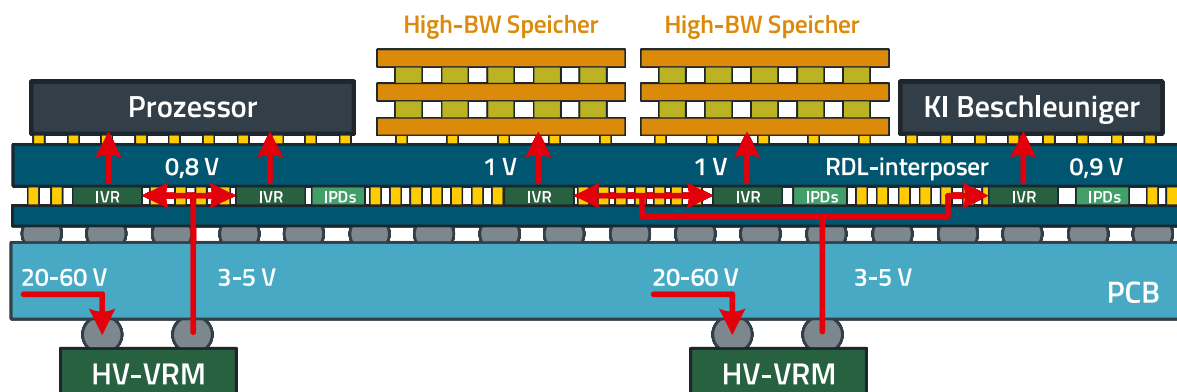
#### 6. ZUVERLÄSSIGKEIT

Die Technologie ist vollständig qualifiziert nach den höchsten Anforderungen der AEC-Q200-Norm in einem Temperaturbereich von -55°C bis + 50°C.

Die Qualifizierungstests wurden intern durchgeführt. Eine vollständige Zusammenfassung, einschließlich Angaben zu Stichprobengröße sowie Testbeschreibungen und -bedingungen, kann auf Anfrage zugesandt werden.

#### 7. ZUSAMMENFASSUNG

Die innovative Magnetics-on-Silicon-Technologie von Würth Elektronik wird durch die Erhöhung des Integrationsgrades von magnetischen Komponenten die Entwicklung von ICs der nächsten Generation vorantreiben. Solche ICs der nächsten Generation, beispielsweise vollständig monolithische ICs, einschließlich Prozessoren, Speicher mit hoher Bandbreite und On-Chip-Beschleuniger für KI, sind in Abbildung 7 dargestellt. Bei der Hochgeschwindigkeitskommunikation stellen die Anforderungen an das Energiemanagement hinsichtlich dynamischer Lastsprünge eine große Herausforderung dar. Daher sollte die Spannungswandlung möglichst nahe am jeweiligen Lastpunkt erfolgen, um die parasitären Effekte auf dem Chip zu minimieren. Zudem muss, da jede Last ihren eigenen Strombedarf sowie eine eigene Kernspannung aufweist, die Spannungswandlung für jede einzelne Last exakt abgestimmt werden. Dies kann durch Hinzufügen kundenspezifischer integrierter passiver Bauelemente (IPDs) wie beispielsweise einer von Würth Elektronik angebotenen magnetische Komponenten auf Siliziumbasis realisiert werden.



KI: Künstliche Intelligenz

BW: Bandbreite

IVR: Integrierter Spannungsregler

IPDs: Integrierte passive Bauelemente

PCB: Platine

HV-VRM: Spannungsregler für hohe Spannungen

RDL-Interposer: Redistribution-Layer-Interposer

Abbildung 7: Beispiel für einen monolithischen Prozessor-IC (Quelle: IEE-Symposium 2024).

### WICHTIGER HINWEIS

Der Anwendungshinweis basiert auf unserem aktuellen Wissens- und Erfahrungsstand, dient als allgemeine Information und ist keine Zusicherung der Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG zur Eignung des Produktes für Kundenanwendungen. Der Anwendungshinweis kann ohne Bekanntgabe verändert werden. Dieses Dokument und Teile hiervon dürfen nicht ohne schriftliche Genehmigung vervielfältigt oder kopiert werden. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG und seine Partner- und Tochtergesellschaften (nachfolgend gemeinsam als „WE“ genannt) sind für eine anwendungsbezogene Unterstützung jeglicher Art nicht haftbar. Kunden sind berechtigt, die Unterstützung und Produktempfehlungen von WE für eigene Anwendungen und Entwürfe zu nutzen. Die Verantwortung für die Anwendbarkeit und die Verwendung von WE-Produkten in einem bestimmten Entwurf trägt in jedem Fall ausschließlich der Kunde. Aufgrund dieser Tatsache ist es Aufgabe des Kunden, erforderlichenfalls Untersuchungen anzustellen und zu entscheiden, ob das Gerät mit den in der Produktspezifikation beschriebenen spezifischen Produktmerkmalen für die jeweilige Kundenanwendung zulässig und geeignet ist oder nicht.

Die technischen Daten sind im aktuellen Datenblatt zum Produkt angegeben. Aus diesem Grund muss der Kunde die Datenblätter verwenden und wird ausdrücklich auf die Tatsache hingewiesen, dass er dafür Sorge zu tragen hat, die Datenblätter auf Aktualität zu prüfen. Die aktuellen Datenblätter können von [www.we-online.com](http://www.we-online.com) heruntergeladen werden. Der Kunde muss produktspezifische Anmerkungen und Warnhinweise strikt beachten. WE behält sich das Recht vor, an seinen Produkten und Dienstleistungen Korrekturen, Modifikationen, Erweiterungen, Verbesserungen und sonstige Änderungen vorzunehmen. Lizenzen oder sonstige Rechte, gleich welcher Art, insbesondere an Patenten, Gebrauchsmustern, Marken, Urheber- oder sonstigen gewerblichen Schutzrechten werden

hierdurch weder eingeräumt noch ergibt sich hieraus eine entsprechende Pflicht, derartige Rechte einzuräumen. Durch Veröffentlichung von Informationen zu Produkten oder Dienstleistungen Dritter gewährt WE weder eine Lizenz zur Verwendung solcher Produkte oder Dienstleistungen noch eine Garantie oder Billigung derselben.

Die Verwendung von WE-Produkten in sicherheitskritischen oder solchen Anwendungen, bei denen aufgrund eines Produktausfalls sich schwere Personenschäden oder Todesfälle ergeben können, sind unzulässig. Des Weiteren sind WE-Produkte für den Einsatz in Bereichen wie Militärtechnik, Luft- und Raumfahrt, Nuklearsteuerung, Marine, Verkehrswesen (Steuerung von Kfz, Zügen oder Schiffen), Verkehrssignalanlagen, Katastrophenschutz, Medizintechnik, öffentlichen Informationsnetzwerken usw. weder ausgelegt noch vorgesehen. Der Kunde muss WE über die Absicht eines solchen Einsatzes vor Beginn der Planungsphase (Design-In-Phase) informieren. Bei Kundenanwendungen, die ein Höchstmaß an Sicherheit erfordern und die bei Fehlfunktionen oder Ausfall eines elektronischen Bauteils Leib und Leben gefährden können, muss der Kunde sicherstellen, dass er über das erforderliche Fachwissen zu sicherheitstechnischen und rechtlichen Auswirkungen seiner Anwendungen verfügt. Der Kunde bestätigt und erklärt sich damit einverstanden, dass er ungeachtet aller anwendungsbezogenen Informationen und Unterstützung, die ihm durch WE gewährt wird, die Gesamtverantwortung für alle rechtlichen, gesetzlichen und sicherheitsbezogenen Anforderungen im Zusammenhang mit seinen Produkten und der Verwendung von WE-Produkten in solchen sicherheitskritischen Anwendungen trägt.

Der Kunde hält WE schad- und klaglos bei allen Schadensansprüchen, die durch derartige sicherheitskritische Kundenanwendungen entstanden sind.

### NÜTZLICHE LINKS



Application Notes

[www.we-online.com/apnotes](http://www.we-online.com/apnotes)



**REDEXPERT** Design Platform

[www.we-online.com/redexpert](http://www.we-online.com/redexpert)



Toolbox

[www.we-online.com/toolbox](http://www.we-online.com/toolbox)



Produkt Katalog

[www.we-online.com/products](http://www.we-online.com/products)

### KONTAKT INFORMATION



[apnotes@we-online.com](mailto:apnotes@we-online.com)

Tel. +49 7942 945 - 0



Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1 74638 Waldenburg Germany

[www.we-online.com](http://www.we-online.com)

## **SUPPORT NOTE**

### SN029 | Einführung in die Magnetics-on-Silicon-Technologie

#### **REVISIONSHISTORIE**

| Dokument Version | Veröffentlichungsdatum | Änderungen                             |
|------------------|------------------------|----------------------------------------|
| SN029a           | 2025/09/20             | Ursprüngliche Version der Support Note |

**Hinweis:** Die aktuelle Version des Dokuments und das Veröffentlichungsdatum sind in der Fußzeile jeder Seite dieses Dokuments angegeben.