

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung



Antonio Alcarria, Iván Valcarcel, Würth Elektronik-Universität of Valencia Lehrstuhl (Cátedra WE-UV)

1. EINFÜHRUNG UND THEORETISCHE GRUNDLAGEN

Die Integration magnetischer Kopplungstechnologien in elektronische Schaltungen kann zu unerwünschten Effekten führen, die durch unkontrollierte Magnetfelder verursacht werden. Diese Felder können sowohl Funktionsstörungen als auch Probleme mit der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) verursachen.

Um reale Bedingungen in einer kontrollierten Laborumgebung nachzubilden, wurde ein spezieller Versuchsaufbau entwickelt. Viele der beobachteten Effekte lassen sich durch den Einsatz magnetisch permeabler Materialien reduzieren. Aus diesem Grund werden Verhalten und Leistungsfähigkeit solcher Materialien detailliert untersucht, wobei der Schwerpunkt auf **WE-FNCS** (Flexible Nanocrystalline Sheets) liegt.

Im ersten Teil dieser Support Note werden die relevanten theoretischen Grundlagen kurz erklärt und die wesentlichen Aspekte der magnetischen Abschirmung erläutert. Im zweiten Teil wird der Einsatz von Abschirmmaterialien in Systemen zur drahtlosen Energieübertragung untersucht.

Darüber hinaus werden die Auswirkungen von Wirbelströmen analysiert, die durch Magnetfelder in leitfähigen Platten induziert werden.

1.1 Induktive Kopplung

Die induktive Kopplung beruht darauf, dass die Sendespule mit einem Wechselstrom gespeist wird und dadurch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld erzeugt. Dieser wechselnde magnetische Fluss induziert gemäß dem Faradayschen Induktionsgesetz eine elektrische Spannung in einer Empfängerspule. Ist eine Last angeschlossen, fließt ein Strom, und elektrische Energie kann übertragen werden.

Dieses Prinzip bildet die Grundlage sowohl von Transformatoren als auch von Systemen zur drahtlosen Energieübertragung, wie sie beispielsweise in elektrischen Zahnbürsten verwendet werden. Es wird außerdem in RFID-/NFC-Systemen für Anwendungen wie Zutrittskontrolle und elektronische Bezahlösungen eingesetzt.

Der durch das induzierte Magnetfeld in der Empfängerspule verursachte Strom kann gleichgerichtet und geregelt werden, um elektronische Schaltungen zu versorgen oder Batterien zu laden. Abbildung 1 zeigt ein Beispiel für zwei eng gekoppelte Spulen gleicher Größe, deren Durchmesser deutlich größer ist als der Abstand zwischen ihnen.

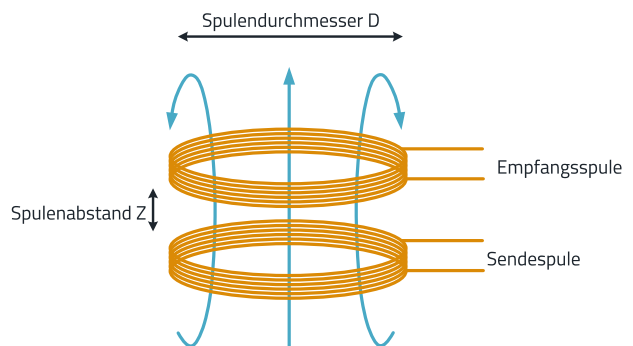


Abbildung 1: Eng gekoppelte Spulen mit Z deutlich kleiner als D .

1.2 Wirbelströme

Der Wirkungsgrad eines induktiven Systems kann durch Erhöhung des Kopplungsfaktors verbessert werden, da dadurch ein größerer Anteil des magnetischen Flusses der Sendespule mit der Empfängerspule verkettet wird. Ist der Abstand zwischen Sende- und Empfängerspule relativ groß, gilt das System als lose gekoppelt, da nur ein kleiner Teil des erzeugten magnetischen Flusses die Sekundärseite erreicht.

Unabhängig vom Kopplungsfaktor können zusätzliche Verluste auftreten, wenn sich leitfähige Materialien in der Nähe des wechselnden Magnetfelds befinden. Diese Verluste werden durch Wirbelströme verursacht, also induzierte Stromschleifen innerhalb leitfähiger Materialien. Gemäß dem Faradayschen Gesetz erzeugen die induzierten Ströme Magnetfelder, die der Änderung des magnetischen Flusses entgegenwirken.

Wie in Abbildung 2 dargestellt, fließen Wirbelströme in Ebenen senkrecht zum Magnetfeld. Ihre Stärke hängt von der Magnetfeldstärke, der eingeschlossenen Schleifenfläche, der Änderungsgeschwindigkeit des magnetischen Flusses sowie vom spezifischen elektrischen Widerstand des Materials ab.

Darüber hinaus beeinflusst die Geometrie der leitfähigen Struktur - beispielsweise Schlitze, Bohrungen oder

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

Unterbrechungen in der Metalloberfläche - die Größe und Verteilung der Wirbelströme und damit die resultierenden Verluste und Abschirmeffekte erheblich.

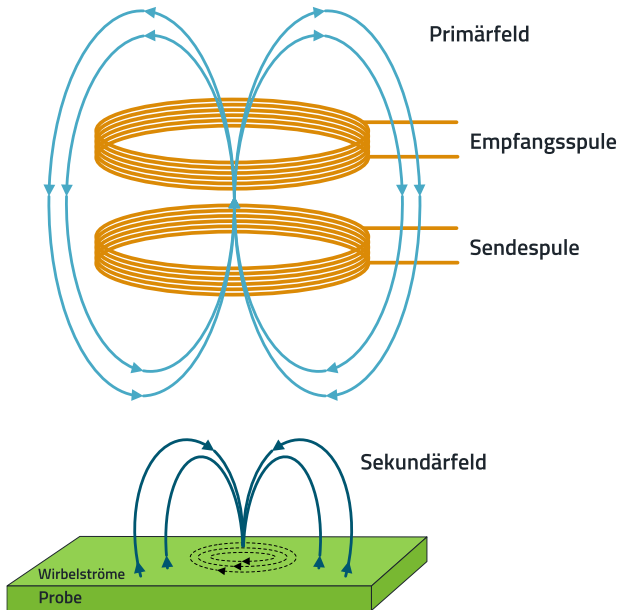


Abbildung 2: Schematische Darstellung von Wirbelströmen, die durch eine leitfähige Fläche in der Nähe der Spule verursacht werden.

1.3 Magnetische Abschirmung

Magnetische Abschirmmaterialien stellen primär einen Pfad mit geringer magnetischer Reluktanz bereit, über den der magnetische Fluss umgelenkt wird. In wechselnden Magnetfeldern treten jedoch zusätzliche Verluste durch Hysterese und Wirbelströme innerhalb des Materials auf, was zu einem teilweisen Verlust magnetischer Energie führt.

Systeme zur drahtlosen Energieübertragung erzeugen aufgrund ihrer vergleichsweise losen Kopplung häufig erhebliche elektromagnetische Emissionen. Daher sind solche Systeme für Anwendungen mit strengen Anforderungen an EMI oder EMF mitunter weniger geeignet.

In diesen Anwendungen dient das magnetische Abschirmmaterial nicht nur dazu, Streumagnetfelder zu reduzieren, sondern auch dazu, den magnetischen Fluss innerhalb des vorgesehenen Energieübertragungspfads zu konzentrieren und zu führen und gleichzeitig umliegende Schaltungen sowie benachbarte elektronische Geräte zu schützen. Die magnetische Permeabilität beschreibt die Fähigkeit eines Materials, magnetischen Fluss zu führen.

Hochpermeable Materialien wie Ferrite stellen einen Pfad mit geringer Reluktanz bereit, der die Magnetfeldlinien konzentriert und umlenkt, wodurch sie sich hervorragend für die magnetische Abschirmung und die Steuerung des magnetischen Flusses eignen.

Die Permeabilität magnetischer Materialien ist frequenzabhängig und komplexwertig. Sie setzt sich aus einer reaktiven Komponente (μ') zusammen, die die Fähigkeit des Materials zur Speicherung und Führung magnetischer Energie beschreibt, sowie aus einer Verlustkomponente (μ''), welche die magnetischen Verluste und die Energieverluste innerhalb des Materials repräsentiert.

Abbildung 3 zeigt den typischen Verlauf der komplexen Permeabilität von **WE-FNCS-Materialien** in Abhängigkeit von der Frequenz. Bei niedrigen Frequenzen dominiert die reale Permeabilitätskomponente (μ'), wodurch eine effiziente Führung des magnetischen Flusses und eine hohe Abschirmwirkung ermöglicht werden.

Mit steigender Frequenz nimmt μ' ab, während die Verlustkomponente (μ'') infolge magnetischer Relaxation und von Wirbelstromeffekten in der Materialstruktur zunehmend an Bedeutung gewinnt. Dieses frequenzabhängige Verhalten ist insbesondere für Anwendungen zur drahtlosen Energieübertragung und für EMV-Anwendungen von Bedeutung, da sowohl die Abschirmwirkung als auch die Führung des magnetischen Flusses stark vom jeweiligen Betriebsfrequenzbereich abhängen.

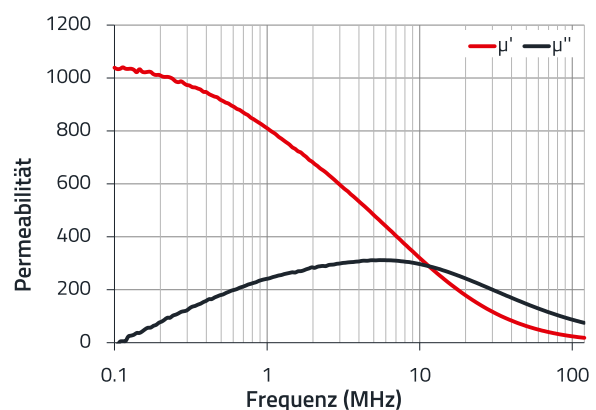


Abbildung 3: Typischer frequenzabhängiger Verlauf der komplexen Permeabilität von **WE-FNCS-Material** mit der reaktiven Permeabilitätskomponente (μ') und der magnetischen Verlustkomponente (μ'').

Abbildung 4 veranschaulicht die Magnetfeldverteilung in einem System zur drahtlosen Energieübertragung ohne magnetische Abschirmung (links) und mit magnetischer Abschirmung (rechts). Ohne magnetische Abschirmung breitet sich ein großer Teil des magnetischen Flusses in die Umgebung aus, was zu höheren Streufeldemissionen und zu einer geringeren Kopplungseffizienz zwischen Sende- und Empfängerspule führt.

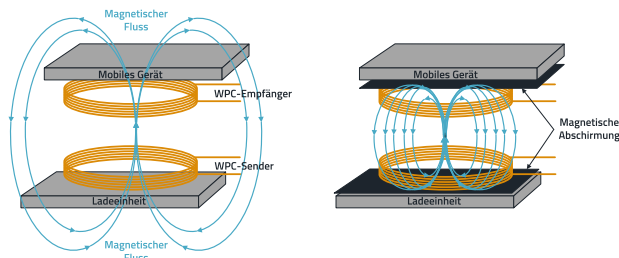


Abbildung 4: Drahtlose Energieübertragung ohne magnetische Abschirmung (links) und mit magnetischer Abschirmung (rechts).

Benachbarte leitfähige oder elektronische Strukturen können dadurch unerwünschter magnetischer Einkopplung und zusätzlichen Wirbelstromverlusten ausgesetzt sein. Durch den Einsatz eines magnetischen Abschirmmaterials wird der magnetische Fluss konzentriert und in den vorgesehenen Energieübertragungspfad zwischen den Spulen umgelenkt. Dadurch werden Streumagnetfelder reduziert, die Kopplungseffizienz verbessert und Wechselwirkungen mit umliegenden Strukturen minimiert. Materialien mit einem hohen μ'' -Anteil werden häufig zur hochfrequenten EMI-Unterdrückung eingesetzt, da sie elektromagnetische Energie wirksam absorbieren. Demgegenüber werden Materialien mit hohem μ' und geringen Verlusten für Anwendungen bevorzugt, bei denen eine effiziente Führung des magnetischen Flusses und ein hoher Energieübertragungswirkungsgrad erforderlich sind. Weitere Informationen zu magnetischen Materialien und Abschirmkonzepten finden sich in der entsprechenden Application Note [ANP016](#).

1.4 Abschirmmaterialien für PCB-Fehlersuche

Magnetische und elektromagnetische Abschirmmaterialien werden nicht nur als permanente Komponenten in elektronischen Systemen eingesetzt, sondern auch als wertvolle Hilfsmittel beim EMV-Debugging und bei der PCB-Fehlersuche. In komplexen elektronischen Baugruppen lassen sich unerwünschte Kopplungsmechanismen, die durch elektrische Felder, magnetische Felder oder hochfrequente Strompfade verursacht werden, häufig nicht direkt identifizieren.

In solchen Fällen kann eine temporäre Abschirmung dabei helfen, die Störquelle zu lokalisieren und mögliche Gegenmaßnahmen zu bewerten. Flexible Abschirmmaterialien sind während der Entwicklung besonders nützlich, da sie sich ohne Änderungen an der Leiterplatte selbst einfach über empfindlichen Schaltungsbereichen, Kabeln, Schaltknoten oder magnetischen Bauelementen platzieren lassen.

In Schaltnetzteilen und Systemen zur drahtlosen Energieübertragung werden Abschirmmaterialien beispielsweise häufig in der Nähe von Induktivitäten, Transformatoren oder stromstarken Schaltstromschleifen eingesetzt, um abgestrahlte Emissionen zu reduzieren und unerwünschte Einkopplungen in benachbarte Schaltungen zu minimieren. Ebenso kann eine temporäre Abschirmung genutzt werden, um zu untersuchen, ob EMV-Probleme durch magnetische Feldkopplung, elektrische Feldkopplung oder Gleichtaktstrompfade verursacht werden.

Die Wirksamkeit der Abschirmung hängt stark von den Materialeigenschaften ab, insbesondere von Permeabilität, Leitfähigkeit, Dicke und Frequenzverhalten. Darüber hinaus sind die Platzierung und die mechanische Integration des Abschirmmaterials kritisch, da eine unvollständige Abdeckung, unbeabsichtigte Stromschleifen oder ein zu geringer Abstand zu magnetischen Komponenten das elektromagnetische Verhalten des Systems selbst verändern können.

Daher können Abschirmmaterialien nicht nur als EMV-Gegenmaßnahmen dienen, sondern während des Entwicklungsprozesses auch als praktische Diagnosewerkzeuge zur Identifizierung dominanter Kopplungsmechanismen und zur Optimierung von PCB-Layouts eingesetzt werden (Abbildung 5).

Die linke Seite in Abbildung 5 zeigt eine Schaltinduktivität ohne Abschirmmaterial, bei der magnetischer Streufluss in benachbarte empfindliche Schaltungsteile einkoppelt und Störungen oder EMV-Probleme verursachen kann. Die rechte Seite zeigt den Einsatz eines magnetischen Abschirmmaterials (z. B. [WE-FNCS](#)), das den magnetischen Fluss umlenkt und konzentriert und dadurch unerwünschte Einkopplungen in benachbarte Schaltungen reduziert.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

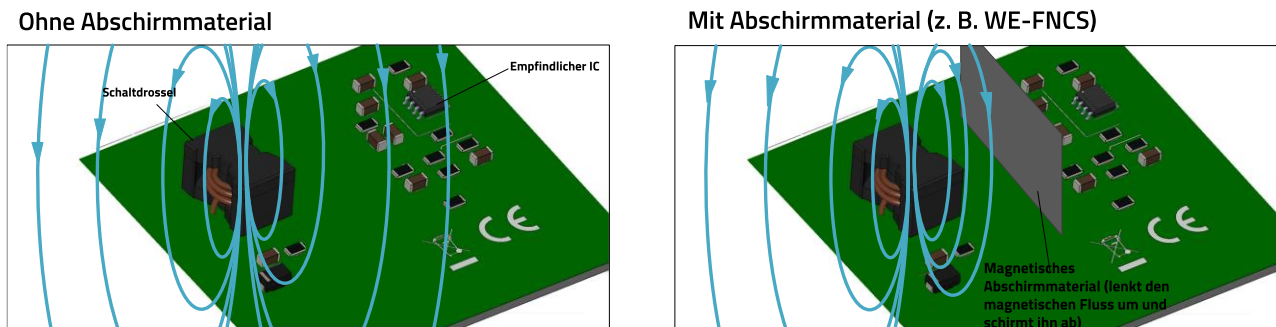


Abbildung 5: Beispiel für den Einsatz magnetischen Abschirmmaterials bei der PCB-Fehlersuche und beim EMV-Debugging.

2. EXPERIMENTELLER ANSATZ

In diesem Abschnitt werden die Labormessungen beschrieben, mit denen die Schirmfolien **WE-FNCS** im Vergleich zu anderen magnetischen Materialien charakterisiert wurden. Der experimentelle Ansatz basiert darauf, die Materialproben einem wechselnden Magnetfeld auszusetzen, das zwischen zwei induktiv gekoppelten Spulen erzeugt wird.

Der Aufbau besteht aus zwei Kupferspulen. Eine Spule fungiert als Sender (Emitter), während die zweite Spule als Empfänger dient. Die Sendespule ist mit dem 50- Ω -Ausgang eines Signalgenerators verbunden, der ein sinusförmiges Signal liefert. Die Empfangsspule ist an ein Oszilloskop mit 50- Ω -Eingangsabschluss angeschlossen, um die induzierte Spannung zu messen.

Weitere Informationen zu den Spulenparametern, den Anregungsbedingungen und anderen relevanten Messdetails sind in Tabelle 1 (4.A.1) angegeben.

Mit dem oben beschriebenen Aufbau werden zwei Arten von Messungen durchgeführt.

Die Erste untersucht die Dämpfung der magnetischen Kopplung, um den Einfluss des Materials auf das Magnetfeld zwischen den Spulen zu bewerten. Die zweite betrachtet Wirbelstromeffekte und deren Einfluss auf den Wirkungsgrad der induktiven drahtlosen Energieübertragung.

2.1 Einfluss bei niedrigen und mittleren Frequenzen

Zur Bewertung des Einflusses magnetischer Materialien auf eine induktive Strecke wird die Änderung der magnetischen Kopplung zwischen Sende- und Empfängerspule gemessen. Dies geschieht, indem die Materialprobe in der Mitte zwischen den beiden Spulen platziert und ihr Einfluss auf die induzierte Spannung und die übertragene Leistung unter definierten Betriebsbedingungen erfasst wird.

Das eingebrachte Material verändert die Verteilung des magnetischen Flusses zwischen den Spulen, indem es das Magnetfeld umlenkt, konzentriert oder teilweise dämpft. Abhängig von den Materialeigenschaften - insbesondere Permeabilität und magnetischen Verlusten - kann die Kopplung zwischen den Spulen variieren.

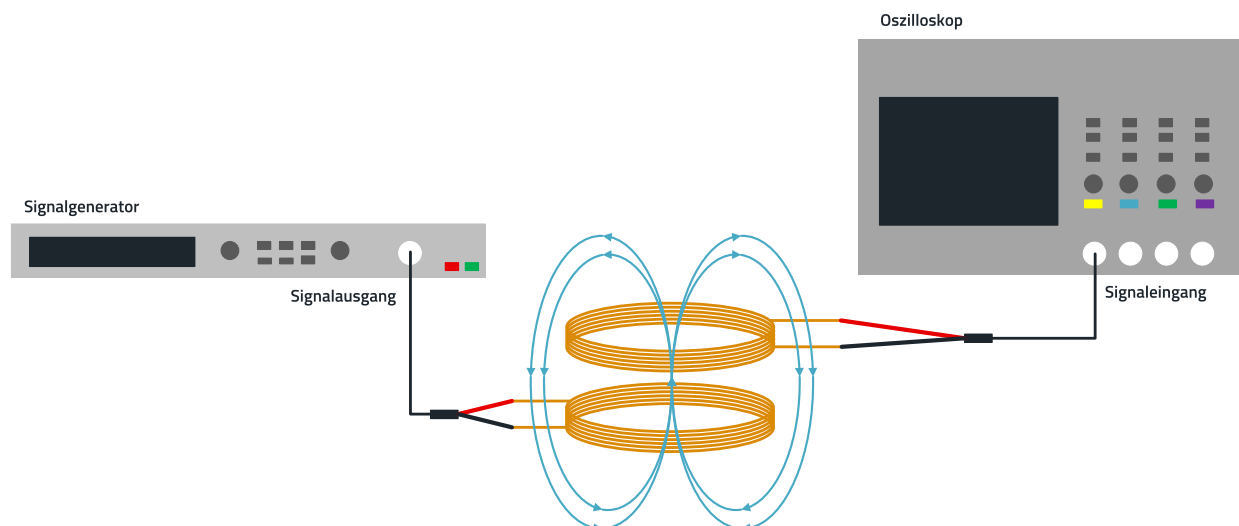


Abbildung 6: Aufbau zur Messung der magnetischen Kopplung und Induktion zwischen zwei Spulen.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

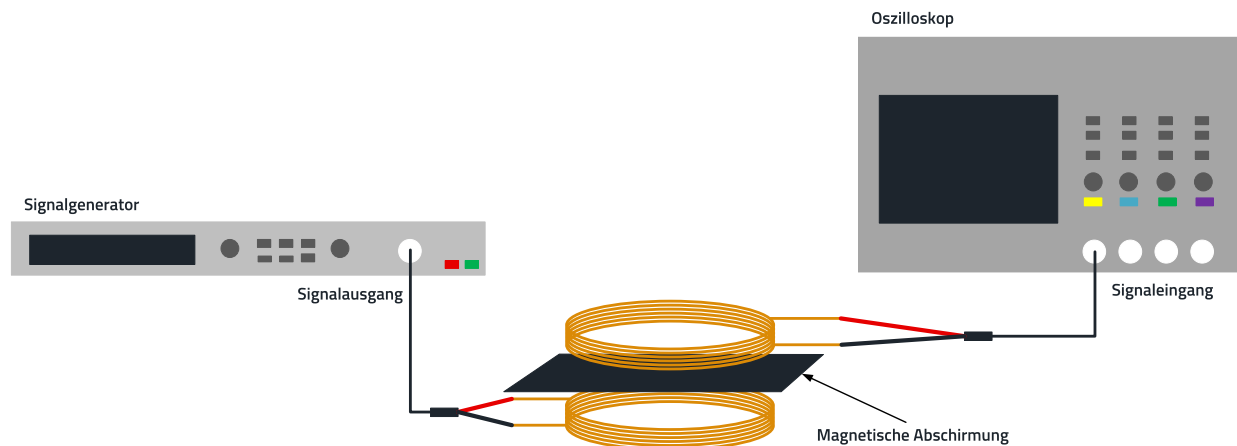


Abbildung 7: Messaufbau mit magnetischem Abschirmmaterial zwischen Sende- und Empfängerspule zur Bewertung seines Einflusses auf magnetische Kopplung.

Der entsprechende Messaufbau ist in Abbildung 7 dargestellt. In dieser Konfiguration wird das magnetische Abschirmmaterial direkt zwischen Sender- und Empfängerspule positioniert, um seinen Einfluss auf die magnetische Kopplung zu bewerten.

2.2 Messergebnis: Abschirmwirkung im Frequenzbereich von 200 kHz bis 1 MHz

Abbildung 8 zeigt die mit dem in 2.1 beschriebenen Aufbau erzielten Messergebnisse. Zunächst wurde die Referenzmessung ohne magnetisches Material zwischen den Spulen durchgeführt (schwarze Kurve). Anschließend wurden verschiedene magnetische Abschirmmaterialien zwischen Sende- und Empfängerspule eingebracht und die induzierte Spannung gemessen.

Zu den untersuchten Materialien gehören eine 0,1 mm dicke MuMETAL™ Folie (schwarze gestrichelte Kurve) sowie dünne Flexible-Absorber-Sheet-(WE-FAS) Lamine (0,1 mm) aus den Materialfamilien 3441 und 324xxx (hellgraue Kurven). Schließlich wurden drei WE-FNCS-Materialien mit identischer Dicke, aber unterschiedlichen Permeabilitätswerten bewertet:

- 353001: Dicke 0,09 mm und relative Permeabilität 1000 (durchgezogene rote Kurve);
- 353011: Dicke 0,09 mm und relative Permeabilität 2000 (gestrichelte rote Kurve);
- 353021: Dicke 0,09 mm und relative Permeabilität 10.000 (gepunktete rote Kurve).

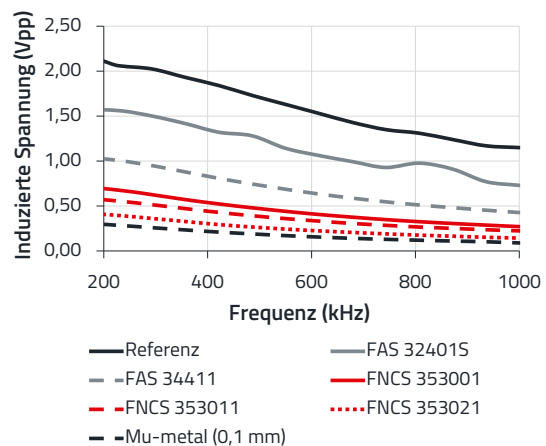


Abbildung 8: Bei niedrigen Frequenzen gemessene induzierte Spannung für verschiedene magnetische Abschirmmaterialien.

Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, nimmt die induzierte Spannung des Referenzaufbaus mit steigender Frequenz ab. Dieses Verhalten wird hauptsächlich durch parasitäre Effekte im Messaufbau verursacht, darunter Streukapazitäten, die frequenzabhängige Spulenimpedanz, nicht-ideales Kopplungsverhalten und zunehmende Verluste im magnetischen Feldpfad.

Die Messungen zeigen ferner, dass bei Materialien vergleichbarer Dicke die induzierte Spannung mit zunehmender magnetischer Permeabilität abnimmt. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da Materialien mit höherer Permeabilität einen Pfad mit geringerer Reluktanz für den magnetischen Fluss bereitstellen und somit einen größeren Anteil des Magnetfelds von der Empfängerspule weg umlenken.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

Innerhalb des untersuchten Frequenzbereichs zeigen die **WE-FNCS**-Materialien im Vergleich zu den **WE-FAS**-Absorber Folien eine deutlich stärkere Dämpfung. Unter den getesteten Materialien bietet lediglich die MuMETAL™-Folie eine geringfügig höhere Dämpfung als die **WE-FNCS**-Variante mit der höchsten Permeabilität.

Eine alternative Darstellung der Messergebnisse ist in Abbildung 9 gezeigt, in der die Verringerung der induzierte Spannung relativ zur Referenzmessung aufgetragen ist. Die Verringerung wurde aus der Differenz zwischen der ohne Abschirmmaterial gemessenen induzierten Spannung (V_{ref}) und der mit zwischen den Spulen eingebrachtem Material gemessenen Spannung (V_{shield}) berechnet.

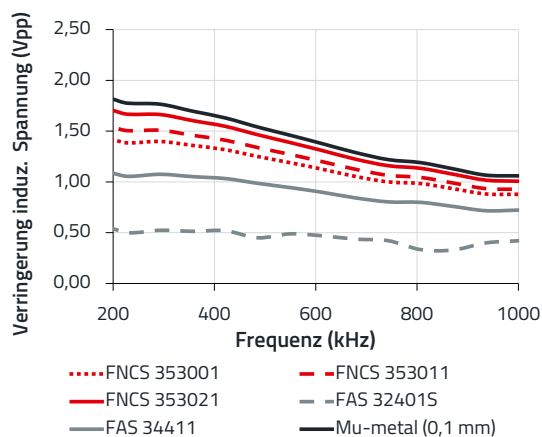


Abbildung 9: Gemessene Verringerung der induzierte Spannung ($V_{ref} - V_{shield}$) für verschiedene magnetische Abschirmmaterialien in Abhängigkeit von der Frequenz.

3. ANWENDUNG FÜR INDUKTIVE DRAHTLOSE ENERGIEÜBERTRAGUNG

Auf induktiver Kopplung basierende Systeme zur drahtlosen Energieübertragung (WPT) werden in der Konsumelektronik und in industriellen Anwendungen breit eingesetzt. Typische Anwendungen sind elektrische Zahnbürsten, Wearables, Smartphones, medizinische Geräte und kontaktlose Ladesysteme. In diesen Anwendungen wird elektrische Energie über ein zeitlich veränderliches Magnetfeld übertragen, das zwischen einer Sende- und einer Empfängerspule erzeugt wird.

Die meisten induktiven Systeme zur drahtlosen Energieübertragung arbeiten im Frequenzbereich von einigen zehn Kilohertz bis zu wenigen Megahertz. In praktischen Systemen wird die Betriebsfrequenz in der Regel als Kompromiss zwischen Spulengröße, Übertragungswirkungsgrad, Schaltverlusten, elektromagnetischen Emissionen und Systemkosten gewählt.

Eine Erhöhung der Betriebsfrequenz ermöglicht kleinere magnetische Komponenten und Spulen, führt jedoch auch zu höherem AC-Widerstand, größeren Wirbelstromverlusten, dielektrischen Verlusten und zusätzlichen EMV-Herausforderungen. Der Wirkungsgrad der induktiven Energieübertragung hängt stark von der magnetischen Kopplung zwischen den Spulen ab. In praktischen Anwendungen können jedoch leitfähige Strukturen in der Nähe des Magnetfelds - beispielsweise Metallgehäuse, Batterien, Abschirmplatten oder mechanische Trägerstrukturen - den Wirkungsgrad deutlich verringern.

Wechselnde Magnetfelder induzieren in diesen leitfähigen Strukturen Wirbelströme, was zu zusätzlicher Verlustleistung und zu einer Verformung der magnetischen Flussverteilung führt. Dadurch koppelt weniger magnetischer Fluss in die Empfängerspule ein und die übertragene Leistung sinkt. Um diese Effekte zu reduzieren, werden magnetische Abschirmmaterialien häufig hinter oder um die Spulen angeordnet. In drahtlosen Ladesystemen werden solche Materialien typischerweise nicht zur klassischen Abschirmung eingesetzt, sondern zur Führung des magnetischen Flusses.

Ziel ist es, das Magnetfeld in den vorgesehenen Kopplungspfad umzulenken und zu konzentrieren und gleichzeitig Streumagnetfelder zu reduzieren sowie die Erzeugung von Wirbelströmen in benachbarten leitfähigen Strukturen zu minimieren. Hochpermeable Materialien sind hierfür besonders geeignet, da sie einen Pfad mit geringer Reluktanz für den magnetischen Fluss bereitstellen. Dadurch können sie die Kopplung verbessern, magnetische Streufelder reduzieren und die Unempfindlichkeit gegenüber nahen metallischen Objekten erhöhen.

3.1 Experimenteller Aufbau für drahtlose Energieübertragung

Zur Untersuchung des Einflusses magnetischer Abschirmmaterialien auf die induktive drahtlose Energieübertragung wurde ein Laboraufbau entwickelt, der eine praxisnahe Ladeanwendung repräsentiert. Der Aufbau bildet ein typisches drahtloses Ladesystem nach, wie es beispielsweise in Consumer-Electronics-Anwendungen niedriger Leistung verwendet wird.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

Abbildung 10 zeigt den Referenzaufbau mit zwei induktiv gekoppelten Spulen, die oberhalb einer leitfähigen Metallplatte angeordnet sind. Die Metalloberfläche repräsentiert benachbarte leitfähige Strukturen, wie sie in realen Produkten häufig vorkommen, beispielsweise metallische Gehäuse, Batterien, Montagerahmen oder Abschirmelemente. Aufgrund des wechselnden Magnetfelds werden in der Metalloberfläche Wirbelströme induziert, was zu magnetischen Verlusten und zu einer Verformung der magnetischen Flussverteilung führt.

In Abbildung 11 wird zwischen der Sendespule und der leitfähigen Metalloberfläche ein magnetisches Abschirmmaterial eingebracht.

Das Abschirmmaterial lenkt den magnetischen Fluss um und reduziert die Wechselwirkung der Wirbelströme mit der Metallplatte. Dadurch können die magnetische Kopplung zwischen den Spulen verbessert und die übertragene Leistung gesteigert werden.

Die Sendespule wurde mit einem sinusförmigen Anregungssignal gespeist, während die induzierte Spannung an der Empfängerspule über einen abgeschlossenen Oszilloskopeingang gemessen wurde. Die Messungen wurden über einen Frequenzbereich durchgeführt, der für typische induktive Systeme zur drahtlosen Energieübertragung repräsentativ ist.

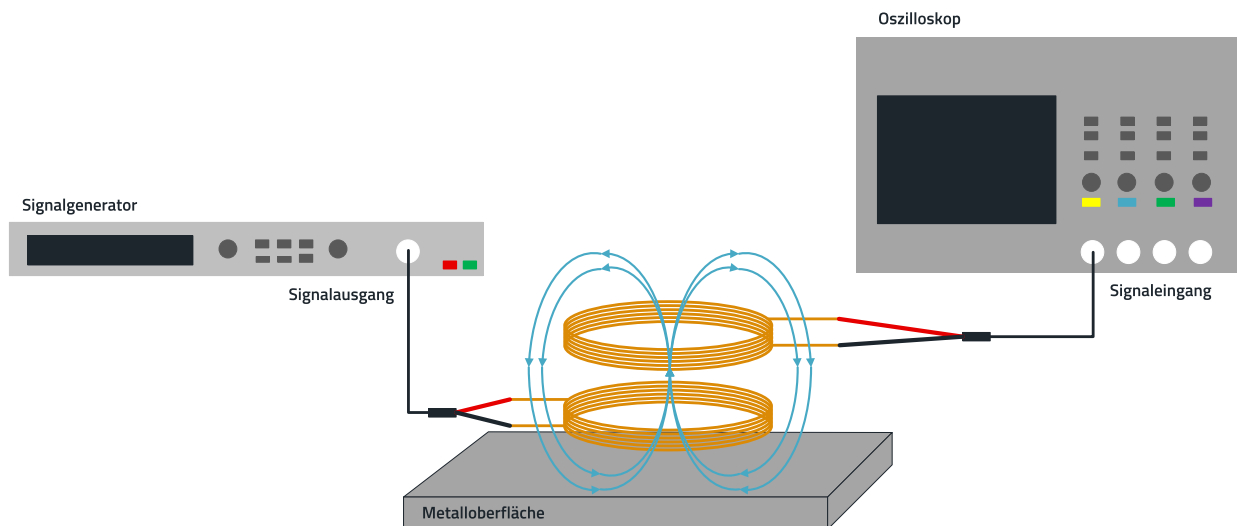


Abbildung 10: Messaufbau für die drahtlose Energieübertragung mit einer leitfähigen Metallfläche unterhalb der Sendespule und ohne magnetisches Abschirmmaterial.

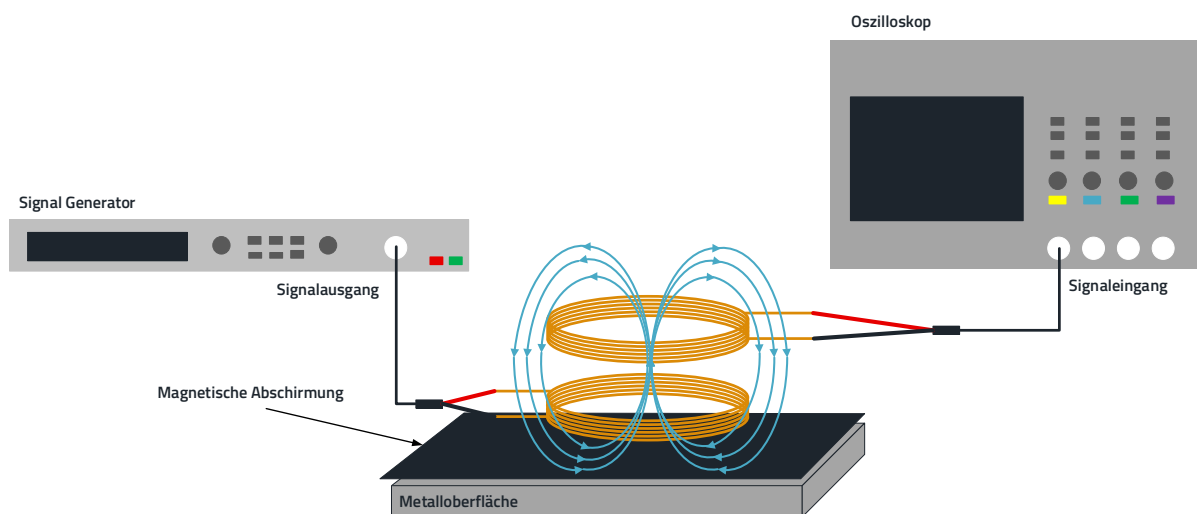


Abbildung 11: Messaufbau für die drahtlose Energieübertragung mit magnetischem Abschirmmaterial zwischen der Sendespule und der leitfähigen Metalloberfläche.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

3.2 Messergebnis: Induktive drahtlose Energieübertragung im Frequenzbereich von 200 kHz bis 1 MHz

Für die Messungen zur drahtlosen Energieübertragung wurden zunächst zwei Referenzkonfigurationen bewertet. Die erste Referenzmessung wurde ohne leitfähige Metallfläche unterhalb der Sendespule durchgeführt und repräsentiert damit die innerhalb des gegebenen Aufbaus maximal erreichbare magnetische Kopplung und Übertragungseffizienz (schwarz gestrichelte Kurve). Die zweite Referenzmessung erfolgte mit einer unterhalb der Sendespule platzierten leitfähigen Metallfläche (schwarze durchgezogene Kurve).

Wie erwartet reduziert das Vorhandensein der Metallfläche die induzierte Spannung deutlich. Dieses Verhalten wird in erster Linie durch Wirbelstromverluste in der leitfähigen Platte sowie durch eine Verformung und teilweise Auslöschung des magnetischen Flusses verursacht.

Die induzierten Wirbelströme erzeugen gemäß dem Lenzschen Gesetz entgegenwirkende Magnetfelder und verringern dadurch die effektive magnetische Kopplung zwischen den Spulen. Nach den Referenzmessungen wurden verschiedene magnetische Abschirmmaterialien zwischen der Sendespule und der Metallfläche eingebracht, um ihre Fähigkeit zur Wiederherstellung der magnetischen Kopplung und zur Verbesserung der Energieübertragungseffizienz zu bewerten.

Abbildung 12 zeigt die Messergebnisse für die drei untersuchten [WE-FNCS-Materialien](#):

- 353001: Dicke 0,09 mm, relative Permeabilität $\mu_r \approx 1000$;
- 353011: Dicke 0,09 mm, relative Permeabilität $\mu_r \approx 2000$;
- 353021: Dicke 0,09 mm, relative Permeabilität $\mu_r \approx 10.000$.

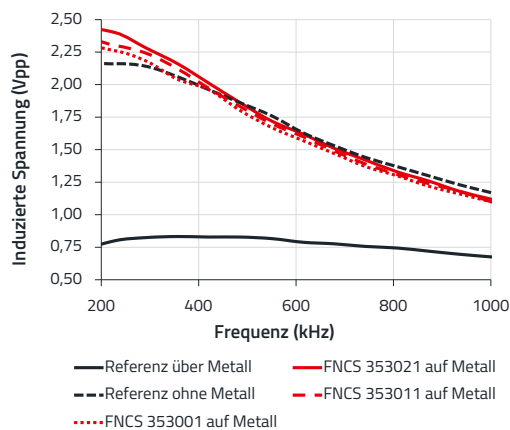


Abbildung 12: Induzierte Spannung im Aufbau zur drahtlosen Energieübertragung für verschiedene [WE-FNCS-Materialien](#) und Referenzkonfigurationen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die magnetischen Abschirmmaterialien die induzierte Spannung gegenüber der ungeschirmten Metallreferenz deutlich verbessern. Darüber hinaus nimmt diese Verbesserung mit steigender Materialpermeabilität zu. Das Material mit der höchsten Permeabilität, [WE-FNCS 353021](#), erzielt die stärkste Wiederherstellung der magnetischen Kopplung und nähert sich der Leistung der Referenzmessung ohne Metallplatte an.

Dieses Verhalten bestätigt, dass hochpermeable Materialien den magnetischen Fluss wirksam von der leitfähigen Metalloberfläche weg und zurück in den vorgesehenen Kopplungspfad zwischen Sende- und Empfangsspule umlenken.

Abbildung 13 vergleicht [WE-FNCS 353021](#) mit einem 0,1 mm dicken Flexible Sintered Ferrite Sheet ([WE-FSFS 374004](#)) sowie einer 0,1 mm dicken MuMETAL™-Folie. Die Messungen zeigen, dass alle untersuchten Materialien die Übertragungseffizienz im Vergleich zur ungeschirmten Metallkonfiguration verbessern.

Hinsichtlich ihrer Wirksamkeit über die Frequenz lassen sich jedoch deutliche Unterschiede beobachten. Das [WE-FNCS-Material](#) liefert über den größten Teil des untersuchten Frequenzbereichs die höchste induzierte Spannung, was unter diesen Bedingungen auf eine besonders effiziente Führung des magnetischen Flusses hinweist. Die MuMETAL™ -Folie verbessert die Übertragungseffizienz ebenfalls deutlich, wobei ihre Leistung bei höheren Frequenzen stärker abnimmt. Das [WE-FSFS-Material](#) zeigt ein zwischen den untersuchten Materialien liegendes Verhalten.

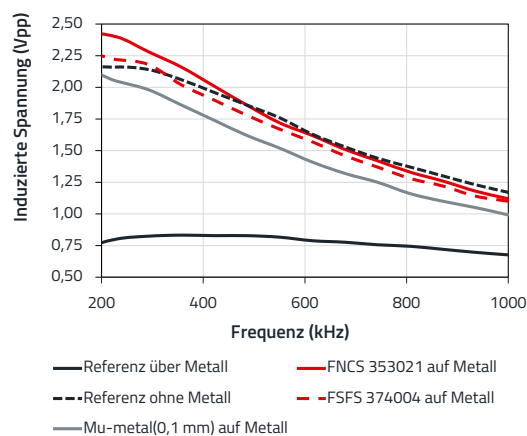


Abbildung 13: Vergleich der induzierten Spannung für [WE-FNCS 353021](#), Flexibles Sinterferritblech ([WE-FSFS 374004](#)) und MuMETAL™ in der Einrichtung zur drahtlosen Energieübertragung.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

4. FAZIT

Die in dieser Support Note vorgestellten experimentellen Untersuchungen zeigen den erheblichen Einfluss magnetischer Abschirmmaterialien auf die Magnetfeldverteilung, das Verhalten der induktiven Kopplung und den Wirkungsgrad der drahtlosen Energieübertragung.

Bei den Niederfrequenzmessungen der magnetischen Kopplung zeigen die untersuchten **WE-FNCS-Materialien** im Vergleich zu den untersuchten **WE-FAS-Materialfamilien** (32401S und 34411) eine deutlich stärkere Dämpfung der magnetischen Kopplung. Dieses Verhalten ist in erster Linie auf die deutlich höhere magnetische Permeabilität des nanokristallinen Materials zurückzuführen, die eine wirksamere Führung und Umverteilung des magnetischen Flusses ermöglicht.

Die Messungen zeigen ferner eine klare Korrelation zwischen Permeabilität und Abschirmleistung. **WE-FNCS-Varianten** mit höherer Permeabilität lenken einen größeren Anteil des magnetischen Flusses von der Empfängerspule weg und reduzieren dadurch die induzierte Spannung wirksamer. Zusätzlich beeinflusst die Materialdicke die erreichbare Abschirmleistung, da dickere magnetische Schichten einen größeren effektiven magnetischen Pfad bereitstellen und die Flussaufnahmefähigkeit unter den untersuchten Bedingungen erhöhen.

Unter den getesteten Materialien erreichte lediglich die 0,1 mm dicke MuMETAL™ -Folie in den Niederfrequenz-Abschirmmessungen eine geringfügig stärkere Dämpfung. **WE-FNCS** bietet jedoch mehrere praktische Vorteile, darunter ein geringeres Gewicht, eine bessere mechanische Flexibilität, eine einfachere Handhabung und Integration sowie je nach Anwendung potenziell geringere Systemkosten. Diese Eigenschaften machen **WE-FNCS** besonders attraktiv für kompakte elektronische Systeme und für die industrielle Integration.

In den Messungen zur drahtlosen Energieübertragung verbesserten die untersuchten **WE-FNCS-Materialien** die induzierte Spannung und damit die effektive magnetische Kopplung in Gegenwart benachbarter leitfähiger Metallstrukturen durchgängig. Die Messungen zeigen eindeutig, dass leitfähige Oberflächen in der Nähe der Sendespule den Übertragungswirkungsgrad aufgrund der Entstehung von Wirbelströmen und der Verformung des Magnetfelds stark reduzieren. Durch das Einbringen einer hochpermeablen magnetischen Schicht zwischen Spule und leitfähiger Struktur kann ein erheblicher Anteil des magnetischen Flusses in den vorgesehenen Kopplungspfad zurückgelenkt werden. Im Vergleich zu den untersuchten Flexible-Sintered-Ferrite-Sheet-(FSFS)- und MuMETAL™ Materialien zeigte **WE-FNCS** über den untersuchten Frequenzbereich hinweg eine sehr starke Performance und erzielte unter den gegebenen Messbedingungen die höchste Wiederherstellung der induzierten Spannung. Die Ergebnisse bestätigen, dass hochpermeable nanokristalline Materialien für die Verbesserung induktiver Systeme zur drahtlosen Energieübertragung in der Nähe leitfähiger Strukturen sehr effektiv sind.

Insgesamt zeigen die Messungen, dass **WE-FNCS** eine effiziente Führung des magnetischen Flusses, eine hohe Abschirmwirkung und günstige mechanische Eigenschaften miteinander vereint. Damit stellt das Material eine sehr geeignete Lösung für Anwendungen in den Bereichen magnetische Abschirmung, EMV-Optimierung, Steuerung induktiver Kopplung und drahtlose Energieübertragung dar.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

A. ANHANG

A.1 Tabellen

Parameter	Wert
Windungszahl der Empfängsspule	24
Durchmesser der Empfängsspule	5 cm
Windungszahl der Sendespule	15
Durchmesser der Sendespule	5 cm
Abstand zwischen den Spulen (Z-Achse)	2 mm
Eigenresonanzfrequenz	5 MHz
Probengröße	60 x 60 mm

Tabelle 1: Spulenparameter und Abmessungen der Probe.

	Typ	Amplitude (V_{pp})	Strom (mA)	Frequenz
Eingespeistes Signal	Sinusförmig	4	100	Von 200 kHz bis 1 MHz

Tabelle 2: Parameter des eingespeisten Signals.

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

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 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 Todesfällen 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/appnotes



REDEXPERT Design Platform

www.we-online.com/redexpert



Toolbox

www.we-online.com/toolbox



Produkt Katalog

www.we-online.com/products

KONTAKT INFORMATION



appnotes@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

SUPPORT NOTE

SN032 | Flexible nanokristalline Folien für Magnetische Schirmung und zur Verbesserung des Wirkungsgrads von drahtloser Energieübertragung

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
SN032a	2026/06/08	Ursprüngliche Version der Support Note

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