

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

ANP014B VON JÖRG HANTSCHHEL

1. Einleitung

Warum gewinnt gerade jetzt die kabellose Energieübertragung so an Bedeutung, obwohl das technische Prinzip schon über 120 Jahre alt ist? Das Nutzerverhalten von Smartphone und Tabletbesitzern hat sich in den letzten 2 Jahren dramatisch verändert. Always online durch soziale Netzwerke, Push Email, Spiele, große Displays, schnelle Prozessoren und HD Graphik führen dazu, dass der Nutzer mit einer Batterieladung seines Gerätes kaum über den Tag kommt. Kabellose Ladeangebote an öffentlichen Plätzen bieten hier eine sehr kundenfreundliche Lösung für dieses Problem. Während eines Restaurantbesuches kann z.B. das Smartphone bequem geladen werden, indem es einfach auf den entsprechenden Platz auf dem Tisch gelegt wird. Voraussetzung ist natürlich, dass das Gerät die passende kabellose Ladetechnik integriert hat. Weitere nötige Erfolgsfaktoren sind einfache und bequeme Bedienung für den Nutzer sowie eine Ladeperformance (Ladezeit, Effizienz,..), die vergleichbar mit der herkömmlichen drahtgebundenen Technologie ist.

Hat sich die Technik, getrieben von den Konsumer Produkten, etabliert, so werden viele verschiedene Anwendungen in weiten Bereichen der Industrie folgen. In der Medizintechnik wo durch sehr aggressive Desinfektionsmittel Ladkontakte angegriffen werden, können Geräte vollständig verkapselt werden, wenn kabellose Ladetechnik eingebaut wird. Auch im Industriebereich bei schmutzigen, staubigen oder explosionsgefährdeten Umgebungen bietet kabellose Energieversorgung die Lösung für viele Probleme, die heute in Geräten mit Ladkontakten auftreten.

2. Drei dominierende Standards

Der Erfolg dieser Lösungen hängt natürlich vom Einhalten eines Standards auf der Sender und Empfängerseite ab. Nur wenn gewährleistet ist, dass das Gerät herstellerunabhängig an jeder dem Standard entsprechenden Ladestation problemlos geladen werden kann, wird sich das System im Markt durchsetzen. Welche Standardansätze gibt es und welche Technik steckt dahinter?

2.1. Close coupled Qi Standard - Wireless Power Consortium (WPC)



- Energieübertragung mit induktiver Kopplung über kurze Distanz (mm Bereich)
- Sender (Tx) und Empfänger (Rx) -spulen sind induktive gekoppelte Spulen.
- Das Magnetfeld ist konzentriert in dem schmalen Bereich zwischen Sende- und Empfängerspule
- Jeder Sender kann nur einen Empfänger bedienen
- Verschiedene Leistungsklassen (5W, 15W, höhere in Planung bis 2,5kW)
- Frequenzbereich 100 – 205 kHz
- Spulenformen: gewickelt auf Ferrit oder gedruckt auf Leiterplatte
- Zurzeit etablierteste Lösung im Markt. Über 230 zugelassene Geräte mit ca. 16 Mio. Stück weltweit.

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung

Die Spulen als zentrale Bauelemente

2.2. Loosely coupled (magnetic resonance) - Alliance for Wireless Power (A4WP)



- Ladeprinzip Magnetische Resonanz: Dabei stellt ein Sendeschwingkreis bei einer Resonanzfrequenz die Energie zur Verfügung. Entsprechend auf die Resonanzfrequenz abgestimmte Empfänger können die Energie übernehmen.
- Größerer Abstand in z-Richtung (50mm) und keine genaue Positionierung des Empfängers nötig
- Ein Sender kann mehrere Empfänger gleichzeitig versorgen.
- Leistungsklasse geplant für Smartphones und Tablets, z.Z. bis 22W
- Frequenzbereiche: Energie 6,78 MHz (ISM Band), Daten 2,4 GHz (LP Bluetooth)
- Standard noch nicht verabschiedet. Noch keine kommerziellen Produkte im Markt
- Keine Kompatibilität mit a. oder c.

2.3. Power Matters Alliance (PMA)



- Technisch ähnliche Lösung wie a. Einige Ladegeräte und Ladeadapter (Hüllen) für gängige Smartphones im Markt.
- Die PMA Lösung nutzt ein anderes Protokoll und ein anderes Übertragungsfrequenzband (Details nur für Mitglieder) als die Qi Lösung des WPC.
- Keine direkte Kompatibilität mit a. oder b.

Es gibt von einigen Halbleiterherstellern (IDT, TI) Ansätze mit einem Kombi Chipsatz Sendelösungen anzubieten, die sowohl den Qi Standard des WPC als auch die PMA Lösung in einem Gerät abbilden können.

Die Standards heute sind getrieben vom Konsumermarkt und beschränken sich z.Z. auf Lösungen bis 20W. Nur das WPC hat Lösungen bis 2,4kW für die kabellose Küche angekündigt. Wenn dieser Standard (angedachte Klassen 200W, 800W, 2,4kW) festgelegt ist, können die Lösungen natürlich auch für Anwendungen außerhalb von Küchengeräten verwendet werden.

Daneben gibt es heute eine Vielzahl von kundenspezifischen Lösungen mit unterschiedlichen Leistungen im Markt. Energieversorgung von industriellen Geräten und das Laden von größeren Batterien sind die hauptsächlichen Anwendungsgebiete. Dabei handelt es sich meist um induktive Lösungen mit kleinen und mittleren Stückzahlen, die untereinander nicht kompatibel sind und eigene Zulassungen erfordern.

Auf die Ansätze für kabelloses Laden in Elektrofahrzeugen soll hier nicht eingegangen werden.

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

3. Das Qi-System

Wie ist das Gesamtsystem der induktiven Lösung nach dem Qi Standard des WPC aufgebaut?

Bei der Qi Lösung des WPC stellt der Sender in der Low Power Klasse an der Sendespule 5W zur Verfügung. Über ein Power Management Protokoll kommunizieren Sender und Empfänger miteinander (Bild 1). Dies geschieht über die Spulen bei der Betriebsfrequenz von 100 - 205 kHz. Der Empfänger fordert die benötigte

Energie beim Sender an und der Sender stellt sie zur Verfügung. Die Energieübertragung wird über das Power Management ständig überwacht und angepasst. Benötigt der Empfänger keine weitere Energie geht das System in einen Stand-by Modus.

Für den Geräteentwickler bieten die Halbleiterhersteller entsprechende Evaluierungskits und Referenzdesigns an. Als Beispiel hier ein Bild des Transmitterboards bq500211AEVM-210 von Texas Instruments mit einer Senderspule von Würth Elektronik ([760 308 111](http://www.wuerth-elektronik.de)).

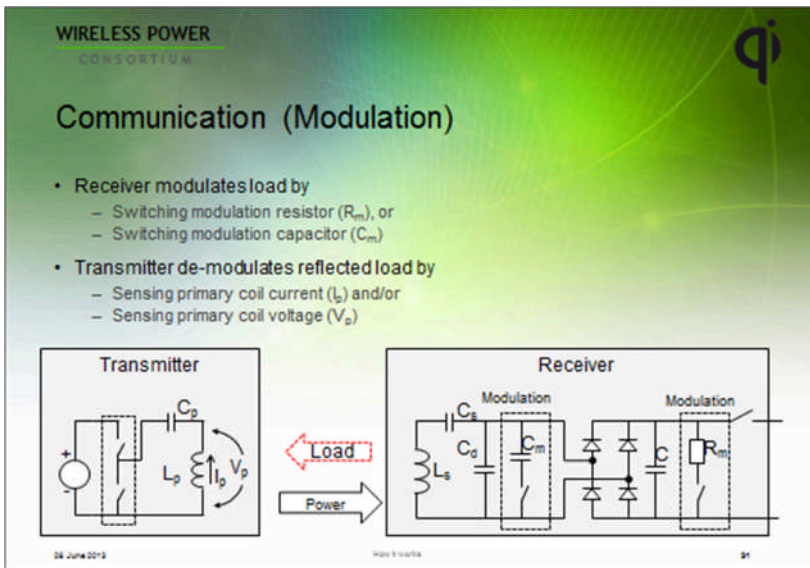


Bild 1: Prinzip nach dem Qi Standard des WPC

Quelle: Wireless Power Consortium 2012

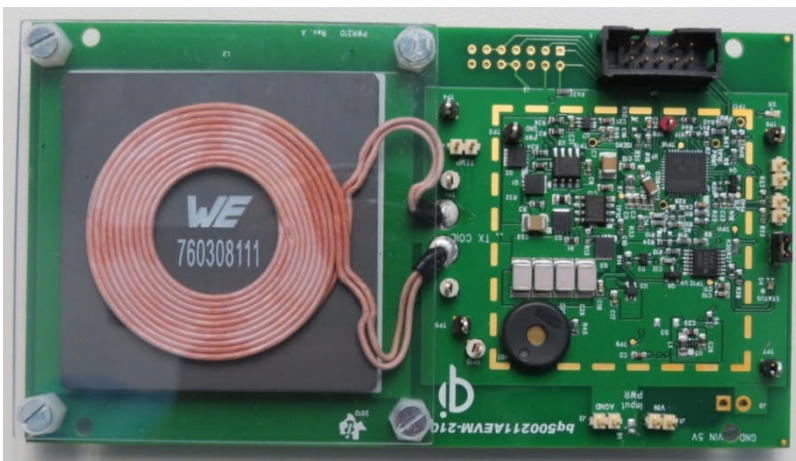


Bild 2: Transmitterboard bq500211AEVM-210 von Texas Instruments

Quelle: Foto Würth Elektronik

Den Sender- und Empfänger-spulen kommt in den induktiven Lösungen eine zentrale Bedeutung zu, da sie über eine möglichst verlustfreie, optimale Energieübertragung entscheiden. Die Auswahl der Spulen und die Art der Positionierung von Sende- und Empfangsspulen haben einen großen Einfluss auf die Effizienz der Energieübertragung.

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

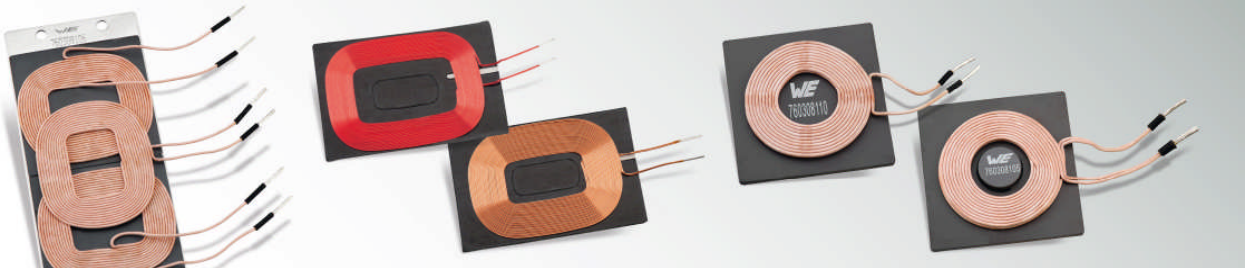


Bild 3: Auswahl von Sende- und Empfangsspulen nach dem Qi Standard des WPC
Quelle: Würth Elektronik

4. Einflussfaktoren für die Spulen

Eine Reihe von Einflussfaktoren entscheiden über eine möglichst verlustfreie Energieübertragung.

4.1. Platzierung der Spulen

Sind die Sende- und Empfangsspulen nicht korrekt zueinander platziert, so kommt es zu Verlusten. Man unterscheidet laterale, verkantete und vertikale Fehlausrichtung (Bild 4).

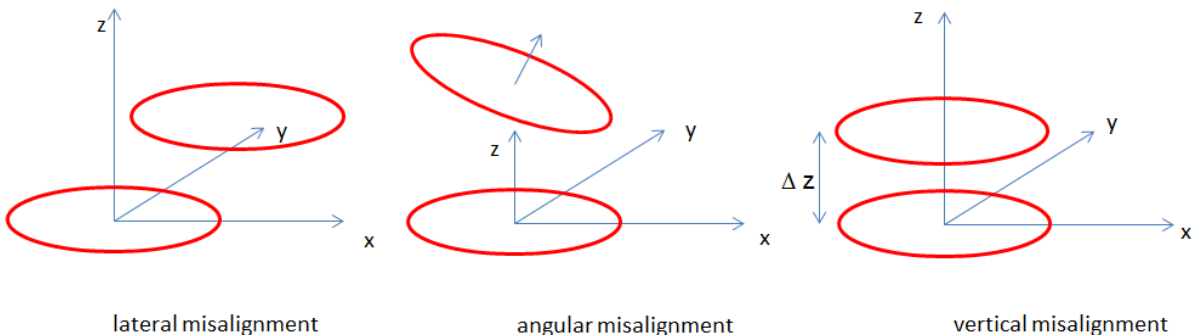


Bild 4: Arten der Fehlausrichtung von Sende – und Empfangsspulen
Quelle: Eigene Darstellung nach RRC power solutions

Die gute Kopplung und verlustminimierte Energieübertragung hängt von der maximalen wirksamen Fläche der Empfängerspule im Magnetfeld der Sendespule und vom geringen Abstand in z-Richtung ab. Ist die Empfängerspule ohne Verkantung mit der Sendespule zentriert und der Abstand in z Richtung möglichst gering, so entstehen minimale Verluste durch die Kopplung. Ideal ist ein Kopplungsfaktor von 1.

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

4.2. Die Kopplung

Um Fehlausrichtungen zu kompensieren sind hohe Gütewerte der Spulen und Effizienz der Kopplung von großem Vorteil.

Der Koppelfaktor zwischen Sende- und Empfangsspulen folgt

$$k = \sqrt{k_1 \cdot k_2} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}$$

L_1 und L_2 sind die Selbstinduktivitäten der Spulen, M ist die Gegeninduktivität zwischen den beiden Spulen.

Die Güte der Spulen ist abhängig vom Verlustwiderstand R_L und dem Blindwiderstand X_L .

$$Q_L = \frac{X_L}{R_L} = \frac{\omega_0 L}{R_L}$$

Luftspulen mit einer Ferritplatte weisen typischerweise Gütewerte zwischen 100 bis 300 auf.

Der Widerstand in den Spulen wird neben dem ohmschen Widerstand des Drahtes von verschiedenen Faktoren beeinflusst.

4.3. Skin Effekt

Der Skin-Effekt (Stromverdrängung) tritt in elektrischen Leitern auf, die von höherfrequentem Wechselstrom durchflossen werden. Die Stromdichte ist dabei im Inneren des Leiters niedriger als an der Oberfläche.

Die Eindringtiefe δ kann mit folgender Formel gut beschrieben werden:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$

- ρ Spezifischer Widerstand
- ω Kreisfrequenz
- μ gescherte effektive Permeabilität (Bsp.: 100)

Die Eindringtiefe wird gemessen vom Außendurchmesser hin zum Leiterzentrum und beträgt bei 50Hz ca. 10,4mm, bei 10kHz 0,73mm und bei 100kHz 0,23mm. Dadurch verringert sich die Fläche durch die der Strom tatsächlich fließt und folge dessen erhöht sich der Widerstand.

Durch den Einsatz von HF Litze in den Sende- und Empfangsspulen kann der negative Einfluss des Skin Effekts deutlich verringert werden.

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

4.4. Proximity Effekt

Ein weiterer Faktor, der die Verluste in den Spulen beeinflusst, ist der Proximity Effekt.

Dabei kommt es zu Stromeinschnürungen bzw. Stromverdrängung in dicht beieinander liegenden Leitern aufgrund des magnetischen Streuflusses. Litzdrahtgestaltung, Wickeltechnologie und Ausführung der Isolation des Spulendrahtes können die unerwünschten Wirbelströme in den Spulen reduzieren.

4.5. Verlustfaktor

Die kabellose Energieübertragung wird durch den Verlustfaktor im System begrenzt.

Der Verlustfaktor λ ergibt sich aus

$$\lambda = \frac{P_{\text{loss}}}{P_{\text{out}}}$$

und drückt das Verhältnis des Gesamtverlustes zur übertragenen Energiemenge aus.

Ziel ist ganz klar den Verlustfaktor zu minimieren. Ist das System aus Sende- und Empfangsspulen optimiert, kann ein minimaler Verlustfaktor, beeinflusst von Güte und Kopplungsfaktor des Systems, erreicht werden.

$$\lambda_{\min} = \frac{2}{(kQ)^2} \left(1 + \sqrt{1 + (kQ)^2} \right)$$

Die Gleichung zeigt, dass das Produkt aus Güte und Kopplungsfaktor als Systemgüte (figure of merit = FOM) heran-gezogen werden kann. Eine Verschlechterung des Verlust-faktors z.B. durch einen schlechten Koppelfaktor kann durch eine Erhöhung der Güte der Spulen kompensiert werden. (Bild 5)

Minimal Loss factor for varying coupling and quality factor

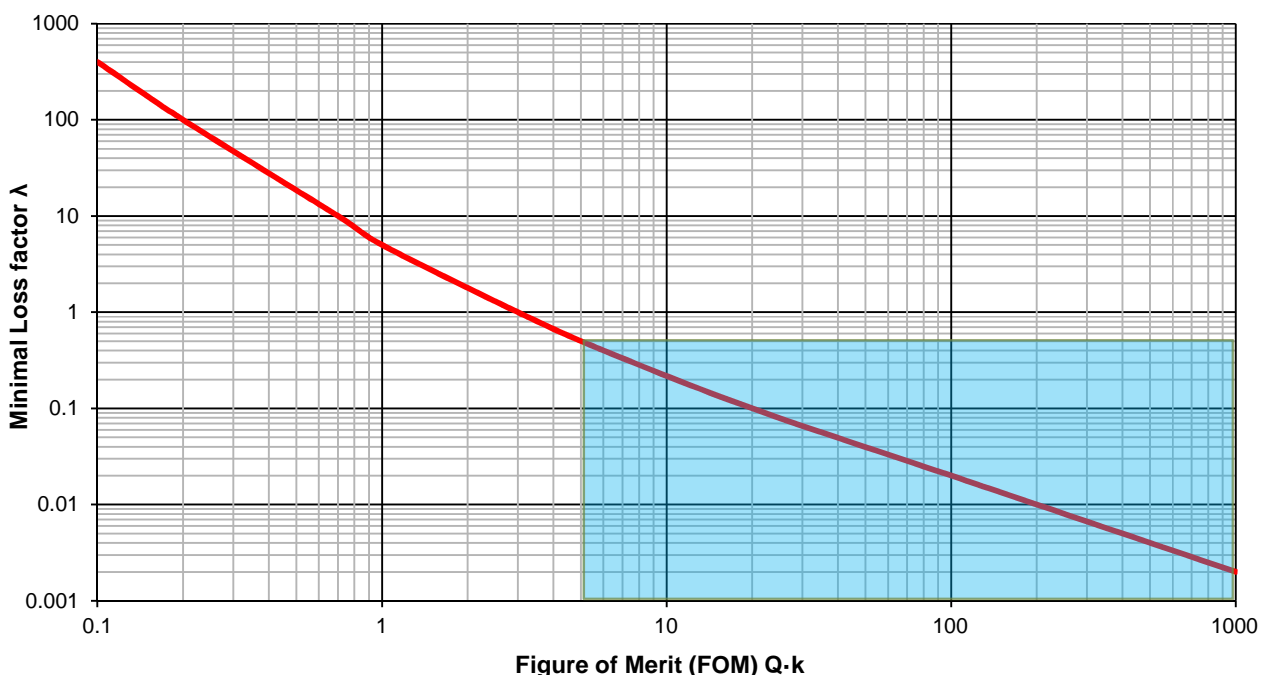


Bild 5: Zusammenhang zwischen Verlustfaktor und Figure of Merrit

Quelle: Wireless Power Consortium 2012 <http://www.wirelesspowerconsortium.com/technology>

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

4.6. Feldverlauf

Ein weiteres wichtiges Element das die Spulen maßgeblich beeinflussen, ist der magnetische Feldverlauf. Neben dem Einfluss auf die Kopplung ist hier die ungewünschte Abstrahlung in die Umgebung entscheidend.

Bild 6 zeigt die magnetische Feldstärke und magnetische Flussdichte von Sende- und Empfangsspule in optimaler Kopplung.

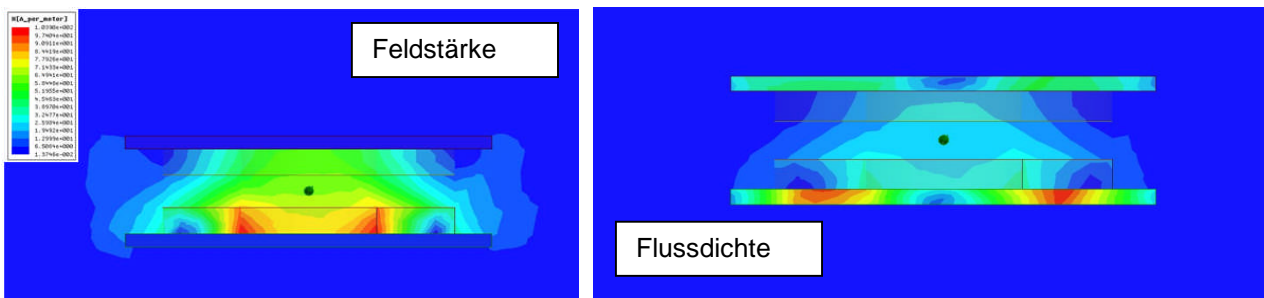


Bild 6: Simulation der magnetischen Feldstärke und Flussdichte in induktiv gekoppelten Spulen auf Ferrit
Quelle: Würth Elektronik

Es wird deutlich, dass das magnetische Feld durch die Ferritschirmung gezielt auf den Raum zwischen den Spulen begrenzt wird und eine Beeinflussung der Umgebung quasi nicht stattfindet. Die Simulation der Flussdichte macht die Wirkung der Ferritplatte sichtbar. Hier konzentriert sich der magnetische Fluss.

Bild 7 zeigt die magnetische Feldstärke und Flussdichte bei einer lateralen Fehlausrichtung (28%) von Sende- und Empfangsspule.

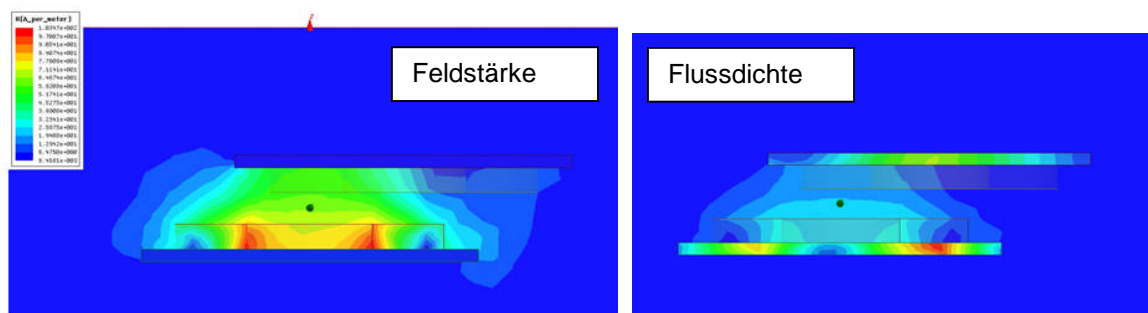


Bild 7: Quelle: Würth Elektronik

Magnetisches Feld und magnetischer Fluss sind bei dieser Fehlausrichtung hauptsächlich auf das Gesamtsystem der beiden Spulen beschränkt. Es findet keine Vergrößerung des Feldes in z-Richtung statt. Daraus lässt sich ableiten, dass das magnetische Feld in der induktiven Kopplung durch die Verwendung geeigneter Ferritabschirmung auf den Bereich zwischen den Spulen beschränkt wird. Zusätzliche Abschirmmaßnahmen sind nicht von Nöten.

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

Außerdem verhindert der Qi Standard zu große Verluste durch Fehlausrichtung der Spulen. Sinkt die Effizienz der Verbindung unter 70% beendet das Power Management die Energieübertragung. Erst wenn die Ausrichtung der Spulen eine Übertragung mit einer Effizienz >70% ermöglicht, wird die Energieübertragung gestartet.

Im Qi Standard des WPC sind die Geometrien und Materialien der Sendespulen genau spezifiziert. Dies hat den großen Vorteil, dass durch die Verwendung von dem Standard entsprechenden Komponenten (Sende Spulen, Power Management Chipsatz) die Interoperabilität des Gesamtsystems gewährleistet werden kann. Bei der Qi Zertifizierung der Geräte wird die Interoperabilität mit bereits zertifizierten Geräten von unabhängigen Testlaboren geprüft und bestätigt.

Es sind zurzeit 22 unterschiedliche Designs für die Sendespulen im Qi Standard festgelegt, die sich in zwei Klassen aufteilen. Einerseits Ferritplatten mit gewickelten Drahtspulen, andererseits Leiterplatten mit gedruckten Wicklungen oder Hybridlösungen. Innerhalb der Klassen sind Unterscheidungskriterien Anzahl der Spulen (Single, Array), Größe, Form, Spannungsklasse und Art der Kontrolle (Spannung, Duty Cycle, Frequenz). Außerdem gibt es Designs mit einem zentralen Dauermagneten in der Spule. Dieser ist dafür gedacht, sehr leichte Empfänger automatisch auf der Sendespule zu zentrieren. Klarer Nachteil der Lösung ist, dass der Dauermagnet im Magnetfeld der Spule die Güte durch entstehende Wirbelströme stark negativ beeinflusst.

4.7. Verbesserung bzw. Optimierung der Standardspulen

Durch die Verwendung hochwertiger Materialien, Ausführung der Litzdrahtisolierung und Wickeltechnologie können die parasitären Widerstände in den Spulen minimiert und die Güte erhöht werden. Solche Spulen geben dem Gesamtsystem in Anwendungen aus Industrie oder Medizintechnik erhöhte Reserven in der Performance.

Das Sende- und Empfangsspulen Spektrum von Würth Elektronik erfüllen mit niedrigem RDC und hoher Güte diese Anforderungen.

5. Zusammenfassung

Die erfolgreiche kabellose Energieübertragung muss durch einen Standard beschrieben sein. Im Standard ergeben sich viele Möglichkeiten auf der Spulenseite die Energieübertragung positiv zu beeinflussen. Die Auswahl optimierter Spulen, ein sorgfältiges Systemdesign und eine sehr gute Nutzerführung bei der Platzierung des Gerätes auf der Sendestation können einen Wettbewerbsvorteil für den Gerätehersteller ausmachen.

Auf der Seite der Standardisierungs-Gremien wird an Optimierungen gearbeitet, die einen Verbesserung der Performance in den nächsten Generationen erwarten lassen.

Die Sende- und Empfangsspulen bleiben trotzdem zentrale Bauelemente in der kabellosen Energieübertragung, und sind maßgeblich für die gesamte Systemeffizienz.

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

6. Literatur

Alliance for Wireless Power: <http://www.a4wp.org/technology.html>

Elektroniknet.de: Peter Wambsganß und Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour , Stromversorgung aus dem HF- Feld
<http://www.elektroniknet.de/power/power-management/artikel/1644/1/>

Power Matters Alliance: <http://www.powermatters.org/>

RRC power solutions: Workshop: Grundlagen der induktiven Energieübertragung, Qi Standard und Systemdesign, 2012

Texas Instruments Evaluation Kit: http://www.ti.com/ww/en/analog/wireless_power_solutions/tools.htm

Wireless Power Consortium: www.wirelesspowerconsortium.com/technology

Würth Elektronik: Trilogie der Induktiven Bauelemente, 2008

Würth Elektronik: Datenblatt 760308111, 760308201, 760308106

Würth Elektronik: Wireless Power Coils: <http://katalog.we-online.de/de/pbs/WE-WPCC>

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

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:

<http://www.we-online.de/app-notes>

REDEXPERT Design Tool:

<http://www.we-online.de/redexpert>

Toolbox:

<http://www.we-online.de/toolbox>

Produkt Katalog:

<http://katalog.we-online.de/>

KONTAKTINFORMATIONEN

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG

Max-Eyth-Str. 1, 74638 Waldenburg, Germany

Tel.: +49 (0) 7942 / 945 – 0

Email: appnotes@we-online.de

Web: <http://www.we-online.de>