

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

VON JÖRG HANTSCHEL

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
- Zur Zeit 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.

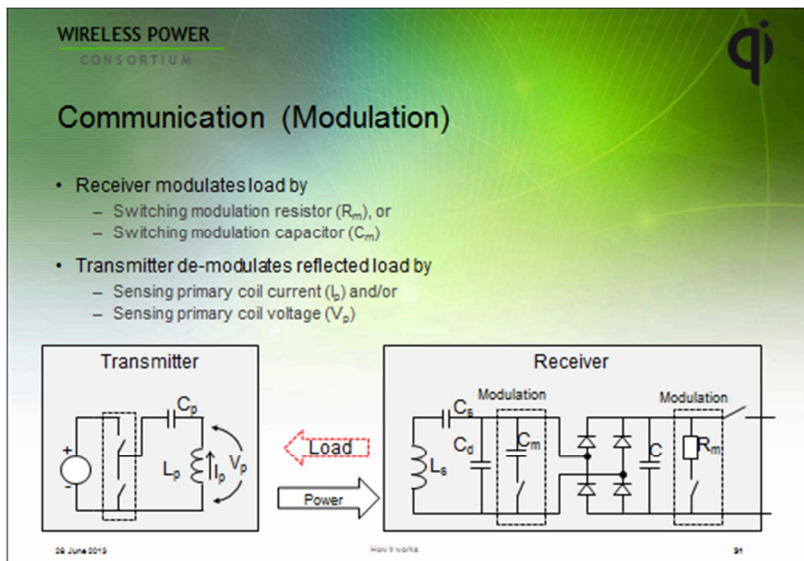


Bild 1: Prinzip nach dem Qi Standard des WPC

Quelle: Wireless Power Consortium 2012

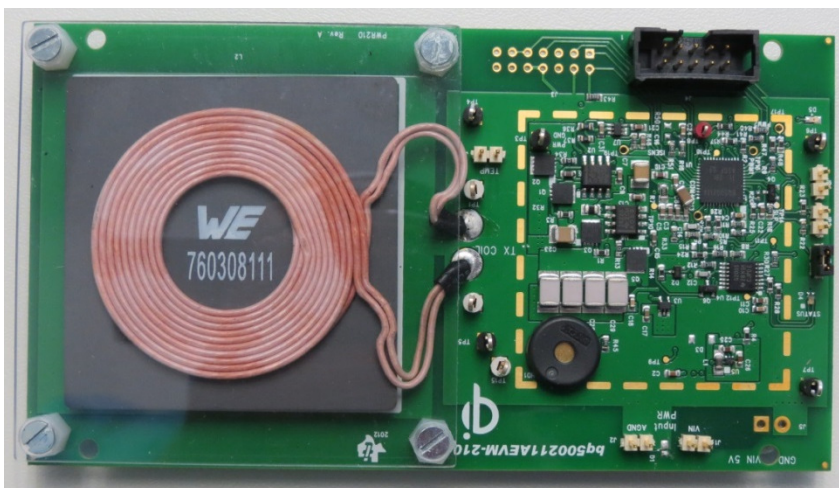


Bild 2: Transmitterboard bq50021AEVM-210 von Texas Instruments

Quelle: Foto Würth Elektronik

Für den Geräteentwickler bieten die Halbleiterhersteller entsprechende Evaluierungs Kits und Referenzdesigns an. Als Beispiel hier ein Bild des Transmitterboards bq50021AEVM-210 von Texas Instruments mit einer Senderspule von Würth Elektronik 760308111.

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

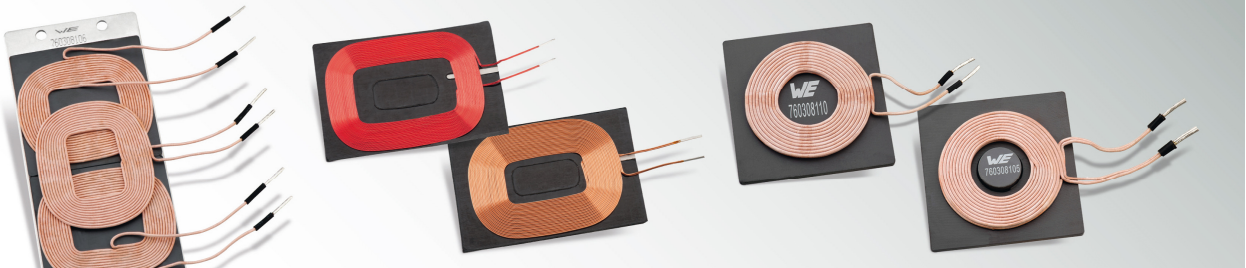


Bild 3: Auswahl von Sende- und Empfangsspulen nach dem Qi Standard des WPC

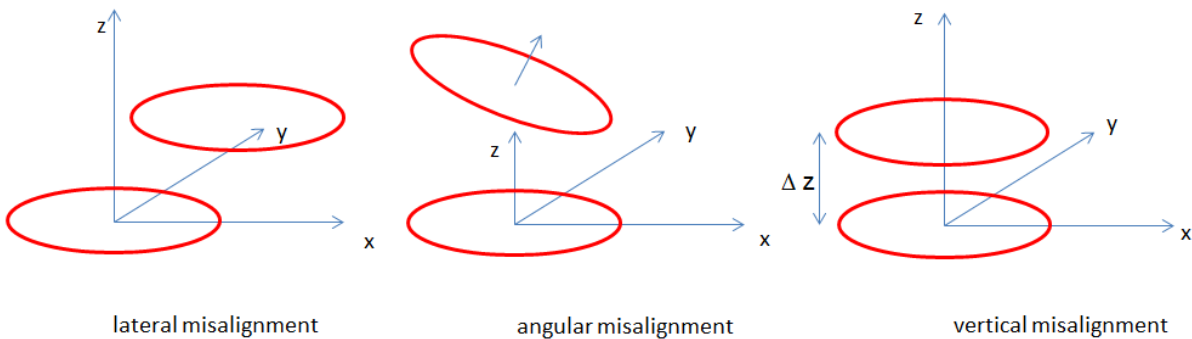
Quelle: Würth Elektronik

Eine Reihe von Einflussfaktoren entscheiden über eine möglichst verlustfreie Energieübertragung.

3.1. 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).



lateral misalignment

angular misalignment

vertical misalignment

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

3.2. 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.

3.3. 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

3.4. 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.

3.5. Verlustfaktor

Die kabellose Energieübertragung wird durch den Verlustfaktor im System begrenzt.

Der Verlustfaktor λ ergibt sich aus

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

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.

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

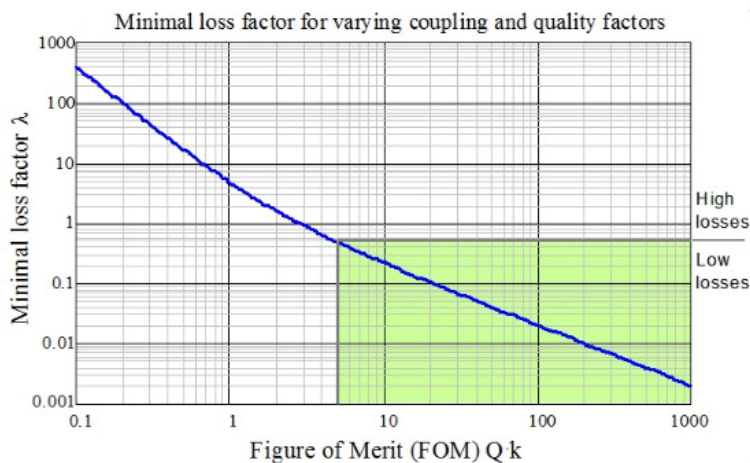


Figure 3: Lowest system loss factor as a function of the FOM (Figure of Merit) Qk

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

Bild 5: Zusammenhang zwischen Verlustfaktor und Figure of Merit

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

APPLICATION NOTE



Kabellose Energieübertragung Die Spulen als zentrale Bauelemente

3.6. 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.

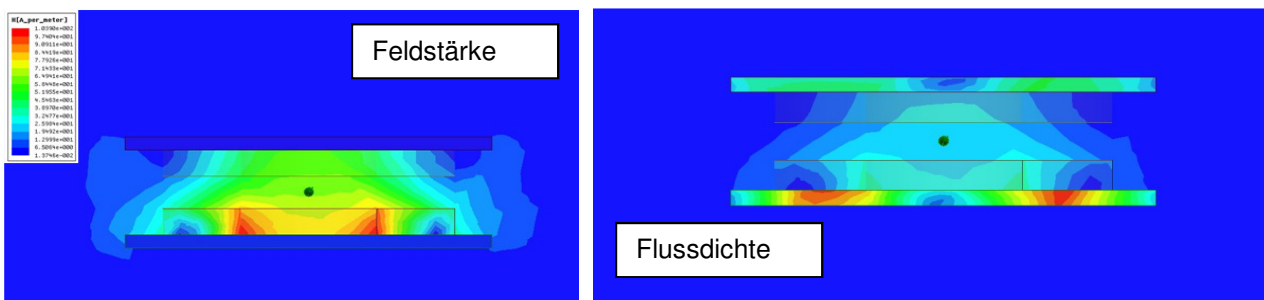


Bild 6: Simulation der magnetischen Feldstärke und Flussdichte in induktiv gekoppelten Spulen auf Ferrit

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.

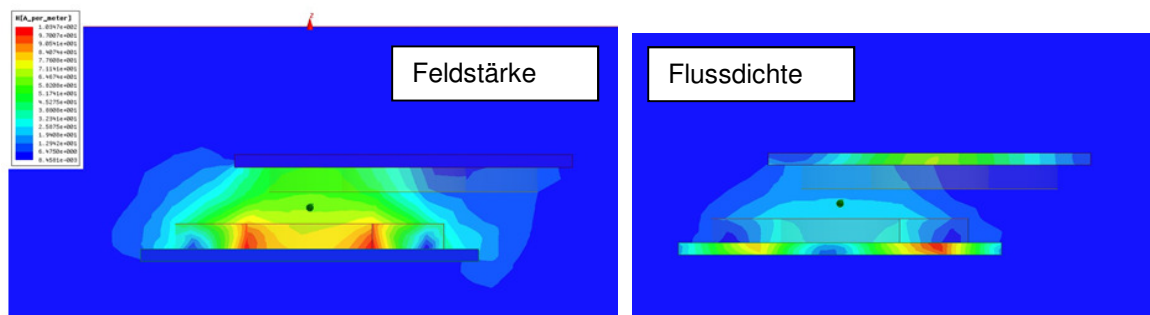


Bild 7: Quelle: Würth Elektronik

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 zur Zeit 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.

3.7. 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.

4. 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

5. 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

IMPORTANT NOTICE

Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG and its subsidiaries and affiliates (WE) assume no liability for application assistance of any kind. Customers may use WE's assistance and product recommendations for their applications and design. The responsibility for the applicability and use of WE Products in a particular customer design is always solely within the authority of the customer. Due to this fact it is up to the customer to evaluate, where appropriate to investigate and decide whether the device with the specific product characteristics described in the product specification is valid and suitable for the respective customer application or not.

Customers are cautioned to verify that data sheets are current. The current data sheets can be downloaded at www.we-online.com. Customers shall strictly observe any product-specific notes, cautions and warnings. WE reserve the right to make corrections, modifications, enhancements, improvements, and other changes to its products and services.

WE does not warrant or represent that any license, either express or implied, is granted under any patent right, copyright, mask work right, or other intellectual property right relating to any combination, machine, or process in which WE products or services are used. Information published by WE regarding third-party products or services does not constitute a license from WE to use such products or services or a warranty or endorsement thereof.

WE products are not authorized for use in safety-critical applications (such as life support). It has to be clearly pointed out that the possibility of a malfunction of electronic components or failure before the end of the usual lifetime cannot be completely eliminated in the current state of the art, even if the products are operated within the range of the specifications. In certain customer applications requiring a very high level of safety and in which the malfunction or failure of an electronic component could endanger human life or health Customers must ensure that they have all necessary expertise in the safety and regulatory ramifications of their applications, and acknowledge and agree that they are solely responsible for all legal, regulatory and safety-related requirements concerning their products and any use of WE products in such safety-critical applications, notwithstanding any applications-related information or support that may be provided by WE. Further, Customers shall fully indemnify WE against any damages arising out of the use of WE products in such safety-critical applications. WE products are neither designed nor intended for use in automotive applications or environments unless the specific WE products are designated by WE as compliant with ISO/TS 16949 requirements. Customers acknowledge and agree that, if they use any non-designated products in automotive applications, WE will not be responsible for any failure to meet such requirements.

USEFUL LINKS

Application Notes: <http://www.we-online.com/app-notes>
Component Selector: <http://www.we-online.com/component-selector>
Toolbox: <http://www.we-online.com/toolbox>
Product Catalog: <http://katalog.we-online.de/en/>

CONTACT INFORMATION

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.com>