

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung



Andreas Unterreitmeier, Christian Merz

1. EINLEITUNG

Seit der immer größer werdenden Verbreitung von Wireless Power Transfer in der Consumer Elektronik, etwa bei Smartphones und Ladestationen, richtet sich auch der Blick bei Herstellern in der Industrie- und Medizintechnik immer mehr auf diese Technologie und der sich daraus ergebenden Vorteile. Besonders für Industriezweige, welche mit harten Umgebungsbedingungen zu tun haben, wie beispielsweise Baumaschinen, explosionsgefährdete Umgebung (ATEX), Landwirtschaft usw. bietet diese Technologie interessante Ansätze. Es können beispielsweise teure und anfällige Schleifringe ersetzt werden, was den Wartungsaufwand verringert und die Lebensdauer des Produktes verlängert.

Auch in der Medizintechnik bieten sich zahlreiche Vorteile durch die kontaktlose Energieübertragung. Hier bestehen besondere Anforderungen an die Hygiene und Keimfreiheit von Medizingeräten. Weiterhin müssen die Geräte und Systeme beständig gegen scharfe Reinigungsmittel und Chemikalien sein. Es kann damit auf spezielle Stecker verzichtet werden, die z.B. besondere Eigenschaften in Bezug auf Dichtigkeit haben. Da auch die Datenkommunikation wie WLAN, Bluetooth etc. immer mehr drahtlos erfolgt, bietet es sich an auch die benötigte Energie für die Endgeräte kontaktlos zu übertragen. Ziel dieser Application Note ist es, dem Entwickler aufzuzeigen, wie er eine proprietäre kontaktlose Energieübertragung inklusive Datenkommunikation für mehrere hundert Watt auf einfache und effiziente Art und Weise realisieren kann.

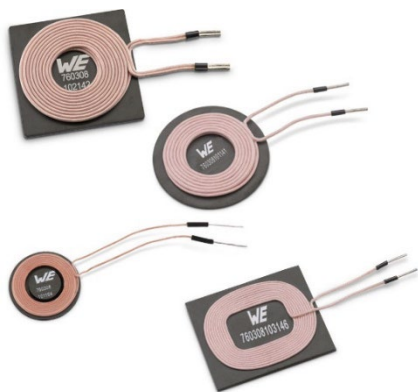


Abbildung 1: Wireless Power Spulen von Würth Elektronik eiSos.

2. FUNKTIONSWEISE DER INDUKTIVEN DRAHTLOSEN ENERGIEÜBERTRAGUNG

Wir verwenden ausschließlich die Energieübertragung im Nahfeld. Zu dieser Übertragungsart zählt die induktive Kopplung, welche auf dem magnetischen Fluss zwischen zwei Spulen basiert.

Wie aus Abbildung 2 erkennbar besteht die Übertragungsstrecke aus vier Hauptkomponenten.

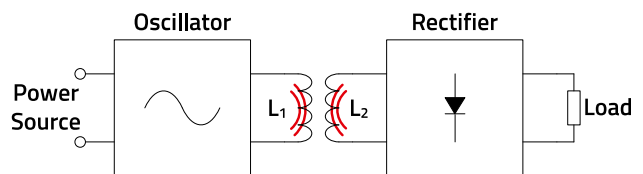


Abbildung 2: Prinzip der drahtlosen Energieübertragung.

Auf der Senderseite ist das ein Oszillator, der als Wechselrichter arbeitet und eine Transmitterspule. Auf Empfängerseite besteht das System aus der Empfängerspule und dem Gleichrichter, der aus der Wechselspannung eine Gleichspannung generiert. Der Oszillator erzeugt aus der Eingangsgleichspannung einen Wechselstrom, der dann in der Senderspule (L_1) ein Wechselfeld erzeugt. Durch die Gegeninduktion zwischen beiden Spulen erfolgt die Energieübertragung zwischen der Senderspule L_1 und der Empfängerspule L_2 . Durch den Wechselstrom in der Senderspule wird eine Wechselspannung in der Empfängerspule induziert (Induktionsgesetz nach Faraday), welche dann gleichgerichtet und an die Last weitergegeben wird. Zum Problem wird, dass bei größeren Abständen zwischen Sende- und Empfängerspule, der Streufluss stark zunimmt und damit die Effizienz der Energieübertragung geringer wird. Dies entspricht der Funktion eines Transformators mit loser Kopplung. Abhilfe schafft hier die resonant induktive Kopplung. Durch eine resonante induktive Kopplung kann sowohl die Reichweite als auch die Effizienz vergrößert werden. Sie stellt eine Erweiterung der rein induktiven Kopplung dar. Dazu wird in Reihe zur Sende- und Empfängerspule zusätzlich ein Kondensator eingefügt. Es ergibt sich dadurch ein LC-Serienschwingkreis, nachfolgend auch als Resonant-Tank bezeichnet. Um die bestmögliche Effizienz der Energieübertragung zu erreichen, müssen beide

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

Schwingkreise bezüglich ihrer Resonanzfrequenz aufeinander abgestimmt sein. Weiterhin wird durch den Kondensator in Reihe zur WPT-Spule die normalerweise sehr große Streuinduktivität nahezu kompensiert. Die Resonanz zwischen den beiden Schwingkreisen führt zu einer verbesserten magnetischen Kopplung zwischen Sende- und Empfängerspule bei der gewählten Resonanzfrequenz.

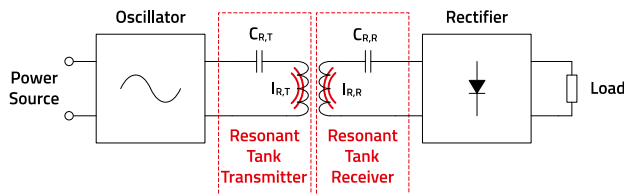


Abbildung 3: Prinzip der resonant induktiven Energieübertragung.

Das Prinzip der induktiv resonanten Energieübertragung kann sehr einfach in einer Applikation realisiert werden. Im folgenden Kapitel wird so eine proprietäre Lösung aus der Praxis beschrieben.

3. PRAKTISCHER EINSATZ DER INDUKTIV RESONANTEN ENERGIEÜBERTRAGUNG

3.1 Aufbau eines Vollbrücken-Resonanz-Wandlers

Abbildung 4 zeigt das Blockschaltbild eines Vollbrücken-Resonanz-Wandlers. Das Schaltbild kann in folgende Funktionsblöcke unterteilt werden:

- Oszillator mit festem Tastverhältnis (50 %) und Vollbrücken MOSFET Treiber.
- Vollbrücke aus 4 schaltenden Elementen (MOSFETs).
- Serienschwingkreis bestehend aus Resonanzkondensator und WPT Senderspule.
- Serienschwingkreis bestehend aus Resonanzkondensator und WPT Empfängerspule.

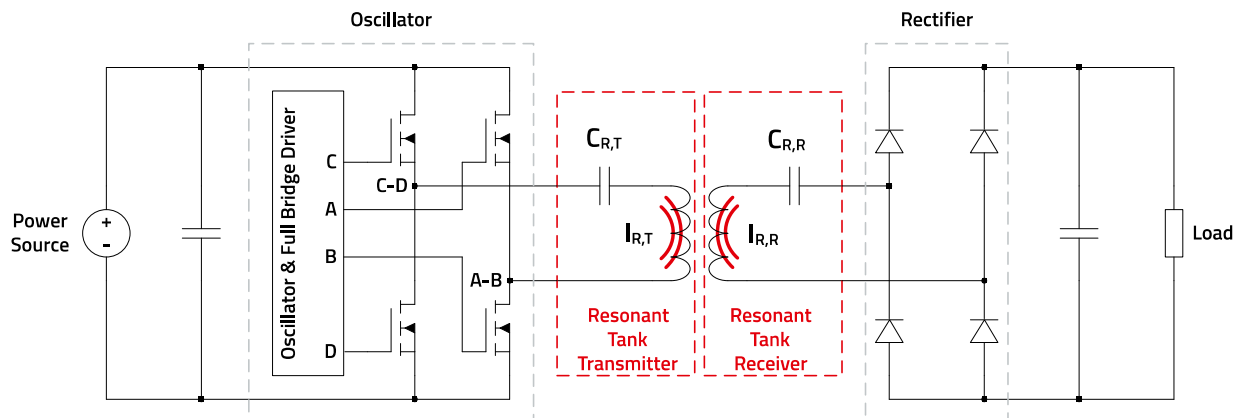


Abbildung 4: Blockschaltbild Vollbrücken-Resonanz-Wandler.

- Gleichrichter (Brückengleichrichter oder synchron Gleichrichter).

Diese Schaltung ist nicht selbstschwingend, die Schaltfrequenz wird vom Oszillator bestimmt und ist auf die Resonanzfrequenz des Serienschwingkreises abgestimmt.

Vorteile dieses Konzeptes:

- Skalierbarkeit von kleiner bis sehr großer Leistung (10 W bis mehrere 10 kW).
- Der Stromverlauf im Resonanzkreis und Gleichrichter ist sinusförmig, günstiges EMV Verhalten.
- Die MOSFETs schalten bei Spannungsnull (ZVS) dadurch sehr hoher Wirkungsgrad > 90 %.
- Leicht skalierbar für viele verschiedene Spannungen / Ströme.
- Durch Ändern der Schaltfrequenz kann die Ausgangsspannung größer oder kleiner gegenüber der Eingangsspannung sein.
- Regelung der Ausgangsspannung ist möglich.
- Datenübertragung zwischen Empfänger und Transmitter ist möglich.

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

3.2 Funktionsweise Vollbrücken-Resonanz-Wandler

Die beiden Abbildungen Abbildung 5 und Abbildung 6 zeigen die Leistungsübertragung zwischen Sender und Empfänger. Der Strom (Resonanzstrom) ist in der Sendespule sinusförmig, schwingt um den Nullpunkt. In beiden Halbwellen des Resonanzstromes $I_{CR/LR}$ findet eine Energieübertragung statt.

Abbildung 7 zeigt die Signale am Resonanzkreis.

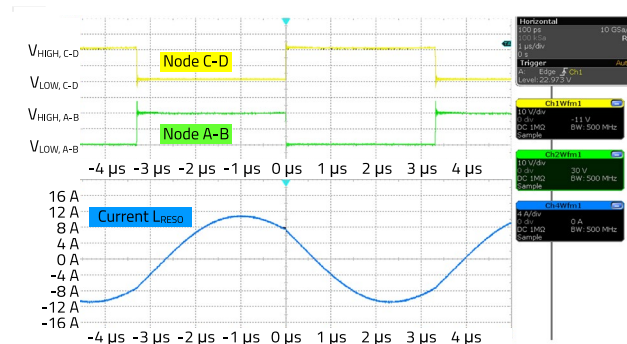


Abbildung 7: Oszillogramm Drain-Signale A-B, C-D und Spulenstrom ($U_E = 20 \text{ V}$, $U_A = 17 \text{ V}$, $I_A = 6 \text{ A}$, $P_A = 100 \text{ W}$)

Die Signale „Node CD“ und „Node AB“ sind die Spannungsverläufe innerhalb der Vollbrücke. In der High-Phase von Node AB ist die Spannung an Node CD Low und umgekehrt. Der Stromverlauf im Resonanzkreis ist, wie vorhin erwähnt, sinusförmig und es ist eine Phasenverschiebung zwischen den Spannungssignalen und dem Stromsignal erkennbar. Diese Phasenverschiebung entsteht dadurch, weil die Schaltfrequenz der Vollbrücke über der Resonanzfrequenz des Serienschwingkreises liegt. Der Arbeitspunkt befindet sich im induktiven Bereich des Serienschwingkreises, der Strom eilt dadurch der Spannung nach.

Für die Funktion ist das sehr wichtig, da nur durch diese Phasenverschiebung in den induktiven Bereich der ZVS-Betrieb (Zero-Voltage-Switching) möglich ist. Der Wirkungsgrad ist dann am höchsten.

Im anderen Fall, wenn die Phasenverschiebung in den kapazitiven Bereich geht, d.h. der Strom eilt der Spannung voraus, arbeitet der Wandler nicht mehr im ZVS-Betrieb, sondern im ZCS-Betrieb (Zero-Current-Switching).

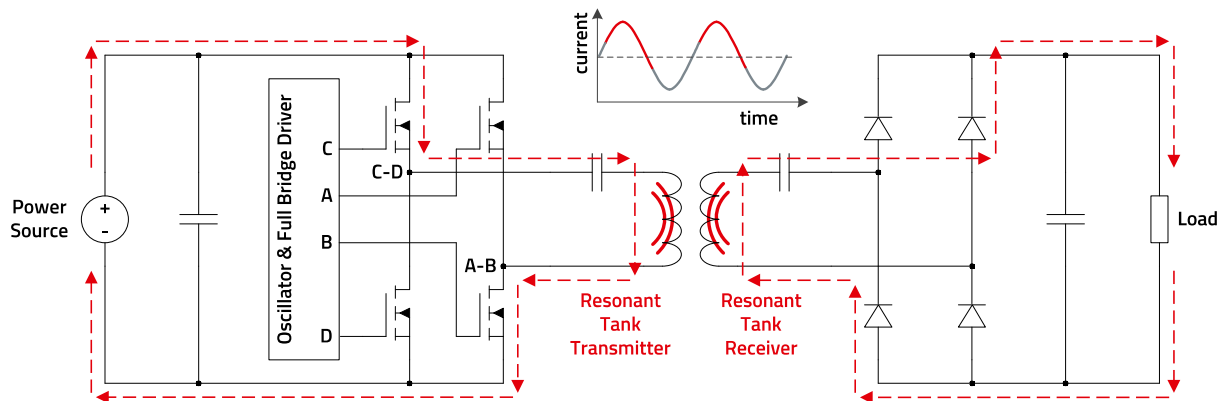


Abbildung 5: Prinzip der Energieübertragung während der positiven Halbwelle ($I_{CR/LR}$) im Resonanzkreis.

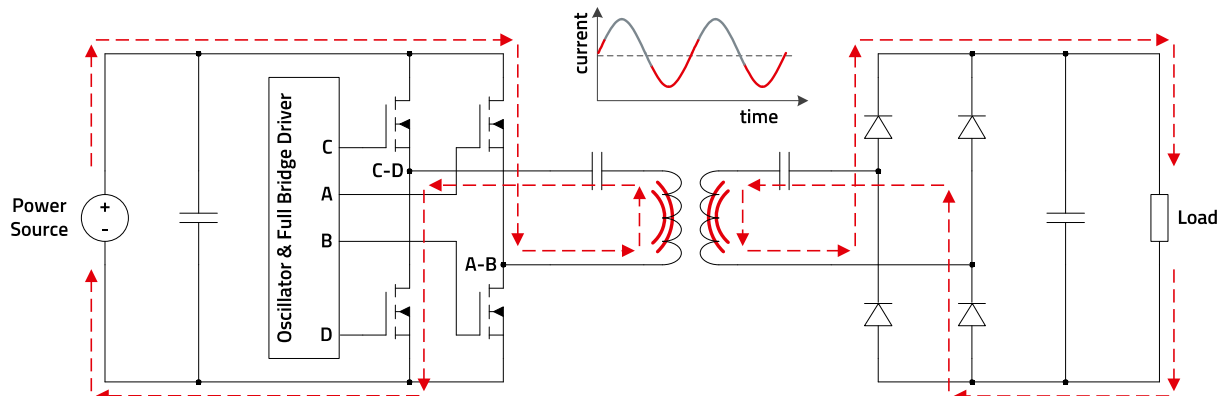


Abbildung 6: Prinzip der Energieübertragung während der negativen Halbwelle ($I_{CR/LR}$) im Resonanzkreis.

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

Der ZCS-Betrieb führt zu höheren Verlusten, da der Strom hart in die Body-Dioden der MOSFETs kommutiert. Unter ungünstigen Umständen kann das sogar zu einer Zerstörung der MOSFETs führen.

3.3 Zusammenhang zwischen Schaltfrequenz und Resonanzfrequenz

Nachfolgende Simulation in Abbildung 8 zeigt auf der linken Seite ein vereinfachtes Modell dieser Schaltung. Es sind nur der Resonanzkreis vom Sender und Empfänger dargestellt. Für die weitere Betrachtung ist dies ausreichend.

Die Schaltung zeigt zwei Serienschwingkreise, je einer auf der Sende- und Empfängerseite. Diese stellen die beiden Resonant-Tanks in Abbildung 4 dar. Auf beiden Seiten befinden sich je ein Kondensator mit 400 nF und eine WPC-Spule (**760 308 102 142**) mit einer Induktivität von 5,8 μH . Beide Schwingkreise sind aufeinander abgestimmt. Für die Simulation benötigen wir den Koppelfaktor von Sende- und Empfangsspule. Dieser hängt vom Abstand beider Spulen zueinander ab. In unserem Beispiel haben wir den Abstand auf 6 mm festgelegt, daraus ergibt sich ein Koppelfaktor von 0,537 (0,54). Dieser Wert wurde messtechnisch ermittelt.

Die Resonanzfrequenz des Systems bestehend aus Sender- und Empfängerspule liegt bei ca. 100 kHz. Im Bode-Diagramm auf der rechten Seite ist auf der X-Achse die Frequenz und auf der Y-Achse die Verstärkung aufgetragen. Bei der Verstärkung = 1 ($V_{\text{gain}} = V_{\text{in}}$) laufen alle Kurven der verschiedenen Lastzustände durch einen Punkt, in unserem Beispiel geschieht das bei der Frequenz = 155 kHz, was der Schaltfrequenz in dieser Schaltung entspricht. Wie bereits vorher erwähnt liegt die Schaltfrequenz höher als die Resonanzfrequenz des Schwingkreises, hier sehen wir auch

den Grund dafür. Nachfolgendes Oszillogramm (Abbildung 9) zeigt die Schaltfrequenz und den Resonanzstrom.

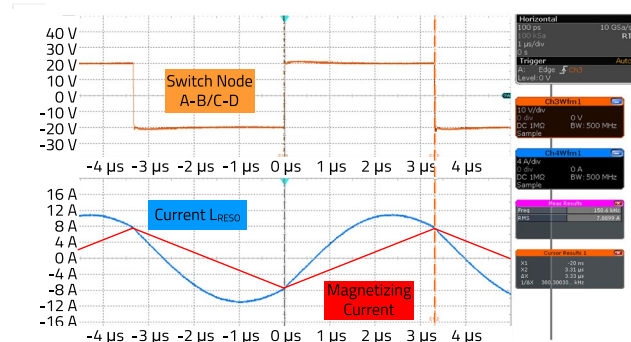


Abbildung 9: Schaltfrequenz und Magnetisierungsstrom ($U_E = 20 \text{ V}$, $U_A = 17 \text{ V}$, $I_A = 6 \text{ A}$, $P_A = 100 \text{ W}$).

Die Messung oben zeigt eine Schaltfrequenz von ca. 150 kHz, was recht genau mit der Simulation übereinstimmt. Abbildung 9 zeigt den Spannungsverlauf der Switch-Node A-B/C-D (orangefarbene Linie) und den Resonanzstrom durch den Serienschwingkreis auf der Senderseite.

Aus diesen beiden Kurven wird ersichtlich, dass während jeder Halbwelle eine vollständige Energieübertragung zwischen Sender und Empfänger stattfindet. Der Resonanzstrom erreicht den Magnetisierungsstrom bei jedem Umschalten der Switch-Node. In diesem Arbeitspunkt arbeitet das System mit der höchsten Effektivität. Auf der Senderseite schalten die MOSFETs bei einer Drain/Source Spannung von etwa 1 V (ZVS-Betrieb), diese Spannung hängt von den Eigenschaften der Freilaufdiode in den MOSFETs ab. Laut Datenblatt der MOSFET's liegt ein typischer Wert zwischen 0,93 V bis 1,2 V.

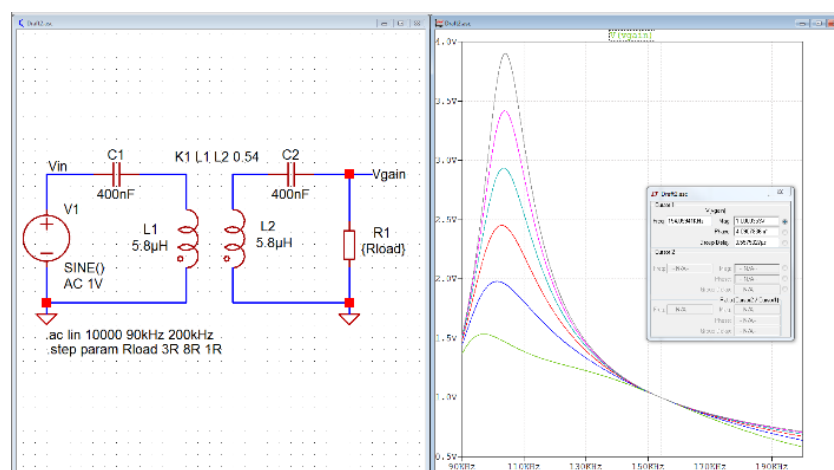


Abbildung 8: Simulation Resonanzverhalten bei verschiedenen Lastzuständen.

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

Auf der Empfängerseite arbeiten die Gleichrichterdiode oder der Synchrongleichrichter im ZCS-Betrieb (Zero-Current Switching). Das heißt, wenn der Strom im Resonanzkreis (Empfängerseite) auf 0 V geht, bzw. wenn der Resonanzstrom auf der Senderseite den Magnetisierungsstrom erreicht, kommutiert der Strom weich zwischen den beiden Brückenzeigen im Gleichrichter.

Durch verändern der Schaltfrequenz kann die Ausgangsspannung verändert werden. Wird die Schaltfrequenz verringert, wandert der Arbeitspunkt in Richtung der Resonanzfrequenz, die Ausgangsspannung steigt.

Erhöht sich die Schaltfrequenz, entfernt sich der Arbeitspunkt von der Resonanzfrequenz und die Ausgangsspannung sinkt. Siehe Resonanzkurve in Abbildung 9.

3.4 Datenübertragung zwischen Sender und Empfänger

Mit dieser Schaltungsart ist es auch möglich Daten zwischen Sender und Empfänger und auch umgekehrt zu übertragen. Durch einen AM-Demodulator und dem UART-Controller werden aus dem modulierten Signal an der Senderspule die Daten wieder zurückgewonnen. Die Daten auf der Senderseite können auf einem LCD-Display angezeigt werden (Abbildung 12 und Abbildung 13) oder über ein zusätzliches RF-Modul an jede Art von Cloud Service gesendet werden.

Möglich ist das durch Modulation des Wechselfeldes zwischen den Spulen. Siehe nachfolgendes Oszillogramm. Die Datenübertragung erfolgt seriell mit einer Übertragungsrate von ca. 9,6 kBaud. In Abbildung 10 zeigt die gelbe Linie den Datenstrom vom Empfänger, die grüne Linie ist das demodulierte Signal am Ausgang des Senders. In unserem Beispiel erfolgt die Datenübertragung vom WPC-Empfänger zum WPC-Sender. Als praktisches Beispiel kann eine Sensorapplikation genannt werden. Ein am WPC-Empfänger angeschlossener Sensor wird über die WPC-Spule mit Energie versorgt und gleichzeitig werden die Sensordaten über die gleiche Spule zum WPC-Sender übertragen.

Auf der Empfängerseite (Datenquelle) wird zum vorhandenen Resonanzkondensator durch einen Schalter ein zusätzlicher Kondensator geschaltet. Dieser Schalter ist mit dem Ausgang der UART des Mikrokontrollers verbunden. (Siehe Abbildung 11).

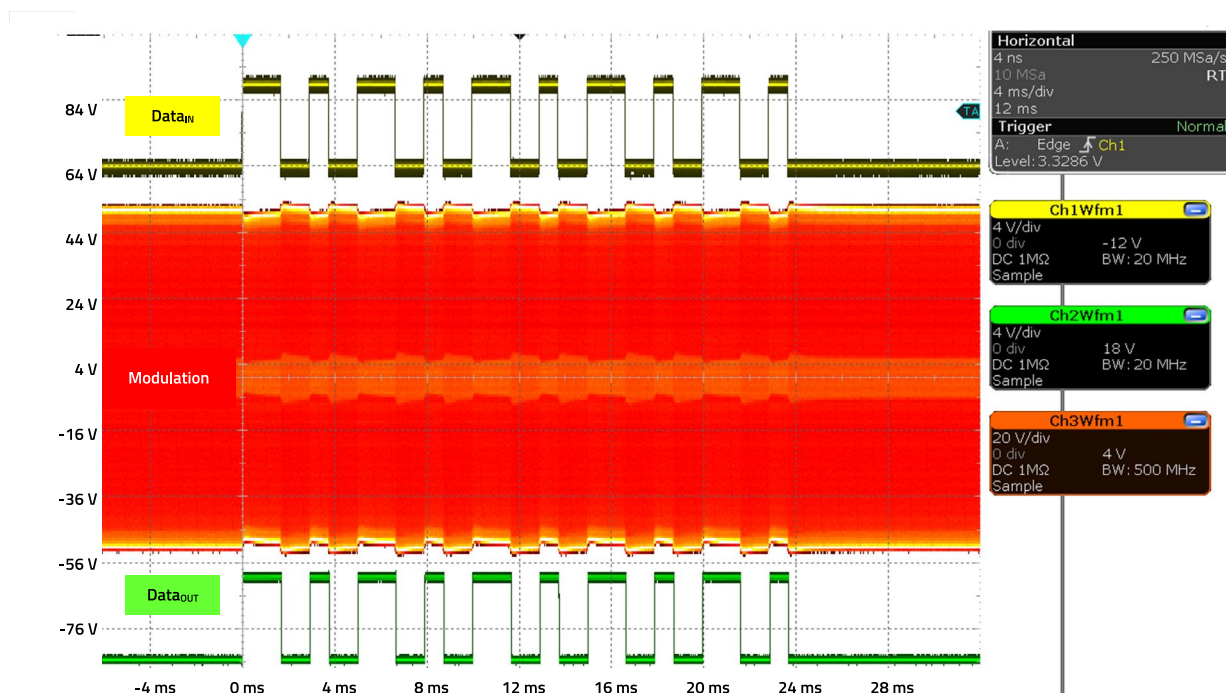


Abbildung 10: Datenübertragung vom Empfänger zum Sender ($U_E = 20 \text{ V}$, $U_A = 17 \text{ V}$, $I_A = 6 \text{ A}$, $P_A = 100 \text{ W}$).

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

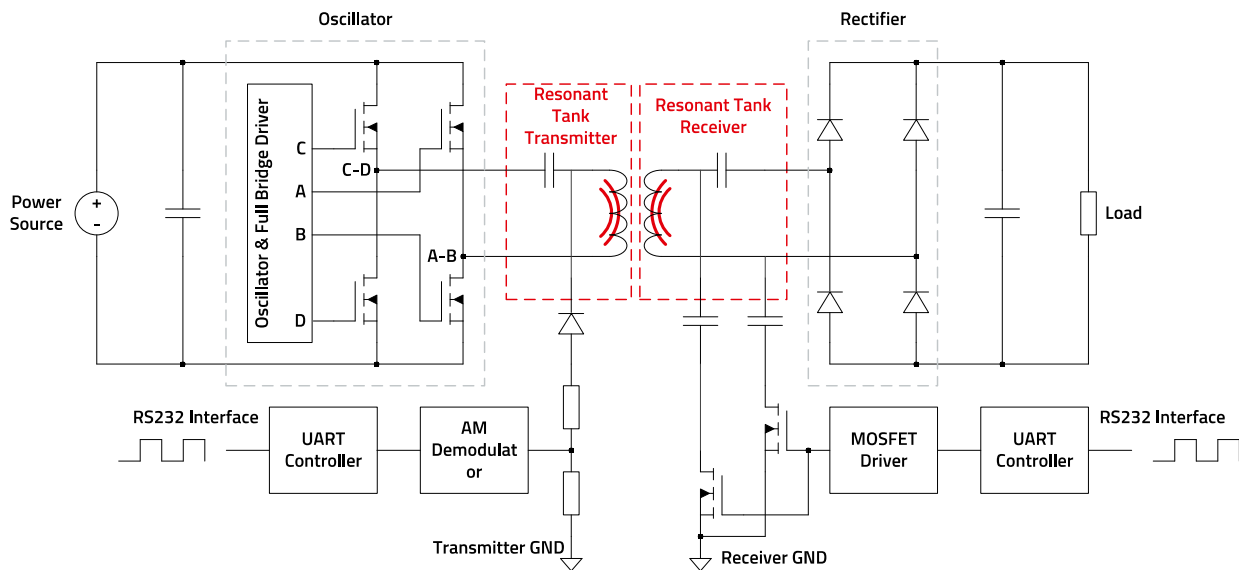


Abbildung 11: Prinzip der Datenübertragung vom Empfänger zum Sender.

4. ZUSAMMENFASSUNG UND MESSAUFBAU

Mit dieser vorgestellten Schaltungstopologie ist es möglich sehr hohe Leistungen mit mehreren 10 kW kontaktlos zu übertragen. Es ist sowohl die Übertragung von Energie als auch Daten möglich. Der Hardwareentwickler kann durch Ändern oder Erweitern der Schaltung diese beliebig an seine Anwendung anpassen. Aufgrund der Möglichkeit auch Daten übertragen zu können, ist eine Regelung der Ausgangsspannung realisierbar.

Entscheidend für einen hohen Wirkungsgrad und eine möglichst kompakte Bauform, sind neben dem Schaltungsdesign vor allem die Sende- und Empfängerspulen. Die Würth Elektronik eiSos bietet neben einem breiten Sortiment auch die Spulen mit dem höchsten Q-Faktor in der jeweiligen Bauform. Dadurch können hohe Induktivitätswerte erzielt werden und daraus resultierend kleine Bauformen für die Resonanzkondensatoren. Zudem wird für höhere Leistungen ausschließlich HF-Litze (geringere AC-Verluste) und hochwertiges Ferritmaterial (hohe Permeabilität) verwendet. Das bedeutet für die Applikation den maximalen Wirkungsgrad und die bestmöglichen EMV-Eigenschaften.

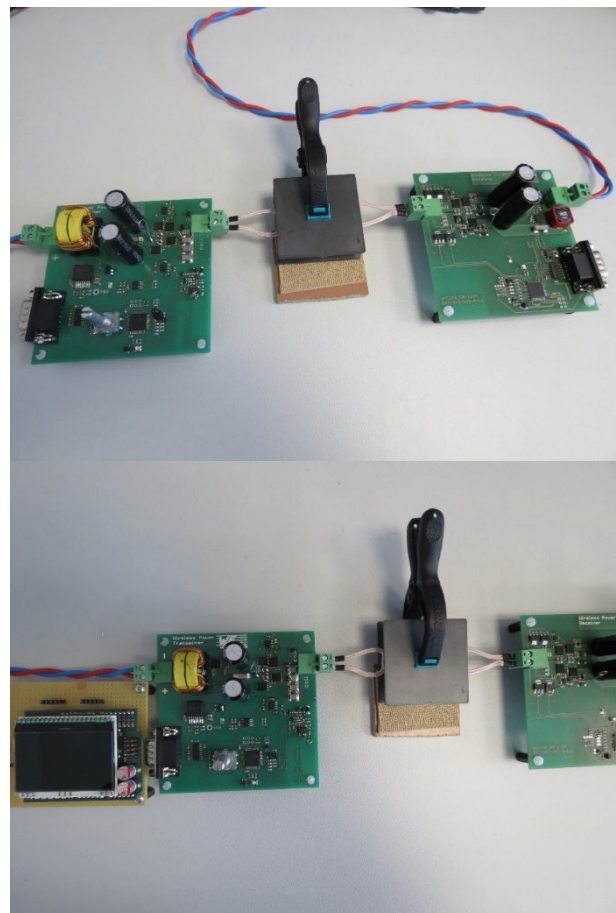


Abbildung 12: WPC Transmitter und WPC Receiver.

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

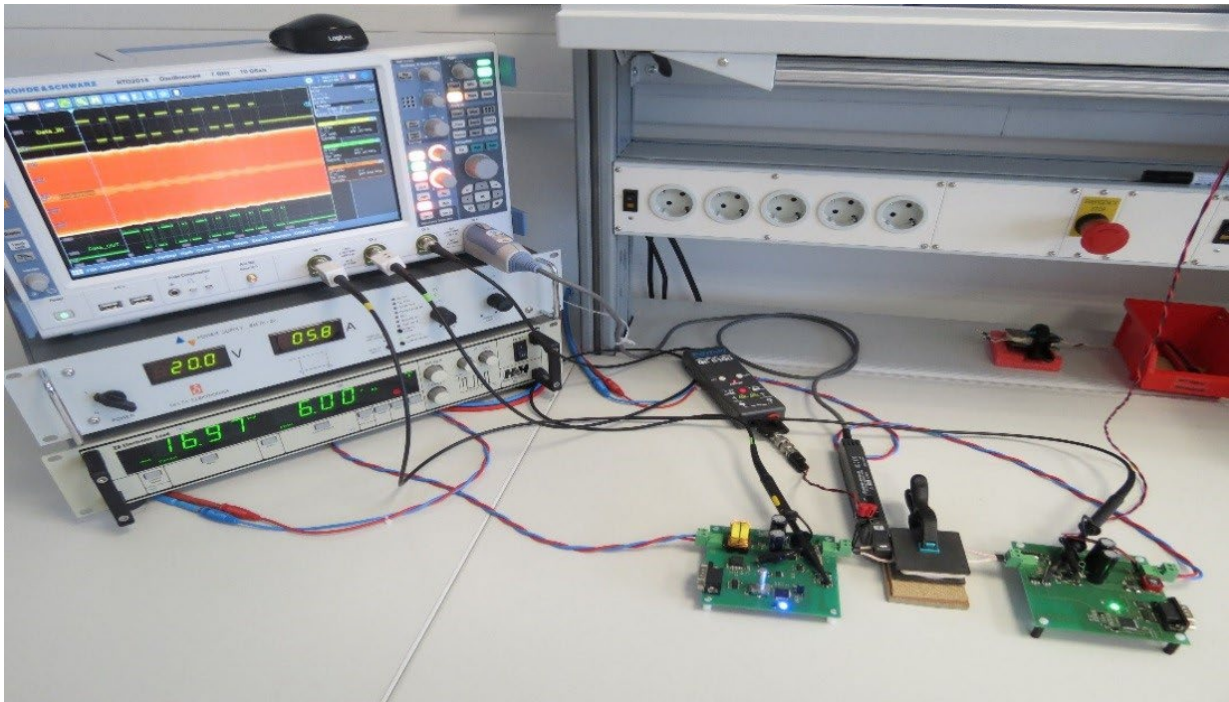


Abbildung 13: Messaufbau.

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

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 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/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

APPLICATION NOTE

ANP070 | Proprietäre Wireless Power Transfer Lösung für hohe Leistungen inklusive Datenübertragung

REVISIONSHISTORIE

Dokument Version	Veröffentlichungsdatum	Änderungen
ANP070a	2018/03/06	Ursprüngliche Version der Application Note
ANP070b	2018/03/12	Geringfügige sprachliche Anpassungen, Geänderte Abbildungen: Abbildung 4-8, Abbildung 10-12
ANP070c	2018/10/22	Änderung von Abbildung 5 a und b
ANP070d	2026/04/28	Überführung in ein neues Grafikdesign und geringfügige sprachliche Anpassungen

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