

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung



VON RAGHU NARAYANAN

1. Einleitung

Drahtloses Aufladen findet gegenwärtig – vor allem bei neueren technischen Geräten wie Smartphones, Tablets oder Laptops – eine immer stärkere Verbreitung. Angesichts der rasanten technischen Entwicklung in diesem Bereich kann wohl davon ausgegangen werden, dass zukünftig zahlreiche elektronische Endverbrauchergeräte drahtlos aufgeladen oder betrieben werden. Die Anzahl der Hersteller drahtloser Ladespulen und zugehöriger Regler-ICs wird voraussichtlich ebenfalls zunehmen, um den steigenden Bedarf aufseiten der Verbraucher zu decken. Nun könnte man fragen, warum der Endverbrauchermarkt für uns interessant sein sollte. Die meisten bekannten Technologien wurden durch den Markt für elektronische Konsumgüter vorangetrieben, und erst danach haben Industrie und ähnliche Bereiche auf der Basis der gemachten Erfahrungen die Entwicklungszeiten verkürzt. Der Zweck des vorliegenden Dokuments besteht darin, eine Methodik zum Tausch drahtloser Stromladespulen von Würth Elektronik eiSos zu veranschaulichen, wie sie auf einer Demoschaltung verbaut wurden, die auch die Empfängersteuerung LTC4120 von Linear Technology umfasst.

In Anbetracht des Bedarfs an drahtlosen Ladeanwendungen bei verschiedenen tragbaren Geräten und zur Unterstützung von Technikern bei der Entwicklung weiterer Endprodukte mit drahtloser Ladefunktionalität wurde dieser Anwendungshinweis verfasst. Er enthält Empfehlungen und beschreibt Methoden zum Tausch drahtloser Ladespulen.

2. Das Prinzip der drahtlosen Energieübertragung

Zur Übertragung von Energie von einem Sender an einen Empfänger auf drahtlosem Wege wird ein Prinzip eingesetzt, das mehr als ein Jahrhundert alt ist: die Gegeninduktion. Dennoch zeigen neuere Entwicklungen, dass, wenn zwei für minimale Verluste und Absorption (hoher Q-Wert) ausgelegte Schwingkreise, die auf gleicher Frequenz resonieren, in enge Nachbarschaft (d. h. in den Nahfeldbereich) gebracht werden, Energie aufgrund evaneszenter Wellenkopplung mit hoher Effizienz vom Sender an den Empfänger übertragen wird.

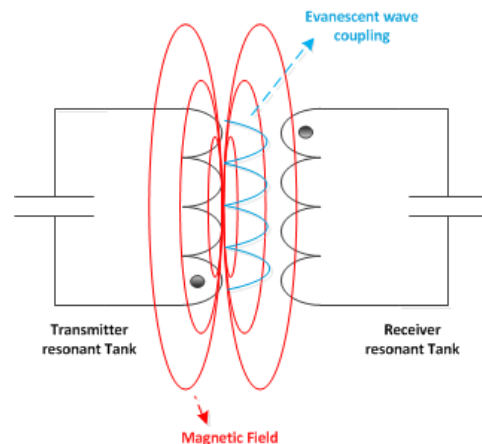


Abbildung 1: Prinzip der drahtlosen Energieübertragung

Damit ein drahtloses Energieladesystem effizient funktionieren kann, müssen die Frequenzen von Sender und Empfänger aufeinander abgestimmt werden. Für unterschiedliche Induktivitätswerte bei Lade- und Koppelspule müssen weitere Bestandteile der Schaltung getauscht werden, um dieselbe Schwingungsfrequenz zu erhalten. Das vorliegende Dokument erläutert ferner den einmaligen Vorteil der Verwendung drahtloser Energieladespulen von Würth Elektronik.

3. WE Wireless Power-Ladespulen

Als Mitglied des Wireless Power Consortium (WPC) und der Alliance for Wireless Power (A4WP), die jetzt unter dem Namen „Rezence“ bekannt ist, hat Würth Elektronik eiSos im Rahmen proprietärer Lösungen bereits verschiedene drahtlose Sende- und Empfängerspulen entwickelt, die mit dem Qi-Standard kompatibel sind. Nachfolgend abgebildet sind einige drahtlose Sende- und Empfängerspulen.



Abbildung 2: Empfängerspulen von WE

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung



Abbildung 3: Senderspulen von WE

Nachfolgend aufgeführt sind die zur Evaluierung in Betracht gezogenen drahtlosen Sende- und Empfängerspulen von Würth Elektronik eiSos.

Senderspulen

1. 760 308 111
2. 760 308 110
3. 760 308 104 113
4. 760 308 101 302

Empfängerspulen

1. 760 308 201
2. 760 308 101 303

4. Laderegler für die drahtlose Energieübertragung

Der für diese Evaluierung ausgewählte drahtlose Laderegler ist der LTC4120 von Linear Technology, der in einem einzigen Chip einen drahtlosen Energieempfänger und eine Buck-Batterieladeeinheit (400 mA) integriert. Dieser Regler wird für die Demoschaltung DC1967A verwendet. Die Schwingfrequenz der Empfängerbaugruppe beträgt 127 kHz bei vorhandener und 140 kHz bei fehlender Abstimmung. *Abbildung 4: DC1967A, Demo-Empfängerkarte zeigt die Demoschaltung DC1967A.*

Merkmale des LTC4120:

- Mit der DHC-Funktion (Dynamic Harmonization Control) wird das drahtlose Laden über einen breiten Kopplungsbereich optimiert.
- Breiter Eingangsspannungsbereich: 4,3 V bis 40 V

- Einstellbare Erhaltungsspannung: 3,5 V bis 11 V
- Ladestrom: 50 mA bis 400 mA (programmierbar über einzelnen Widerstand)
- ± 1 % Genauigkeit bei der Rückführspannung
- Ladestrom auf 5 % genau programmierbar
- Kein Transformator Kern

Die drahtlose Demo-Senderschaltung DC1968A ist ein einfacher Sender, der unter Verwendung einer stromgekoppelten astabilen Kippschaltung entwickelt wurde, deren Schwingfrequenz durch einen Schwingkreis festgelegt wird (siehe *Abbildung 5: DC1968A, Demo-Sendekarte*). Die hier festgelegte Schwingfrequenz beträgt 130 kHz. Allerdings würde die Betriebsfrequenz abhängig von der Last beim Empfänger und dem Kopplungsfaktor zur Empfängerspule schwanken. Eine andere Version des Senders, gefertigt von Power by Proxy, bietet den zusätzlichen Vorteil der Erkennung fremder Objekte und besitzt eine niedrige Standby-Leistung.

Mit der DHC-Funktion des LTC4120 wird die Frequenz entsprechend den Leistungsanforderungen des Akkus (Last) entweder nah oder entfernt von der Schwingfrequenz des Senders festgelegt: Ist der Kopplungsfaktor zwischen Sende- und Empfangsspule hoch, dann wird die Frequenz so festgelegt, dass die Energieübertragung begrenzt wird; ist der Kopplungsfaktor niedrig, dann wird die Frequenz so eingestellt, dass die Energieübertragung verstärkt wird. Das Merkmal des fehlenden Transformator Kerns beim LTC4120 ermöglicht eine galvanische Trennung ohne Transformator kern.

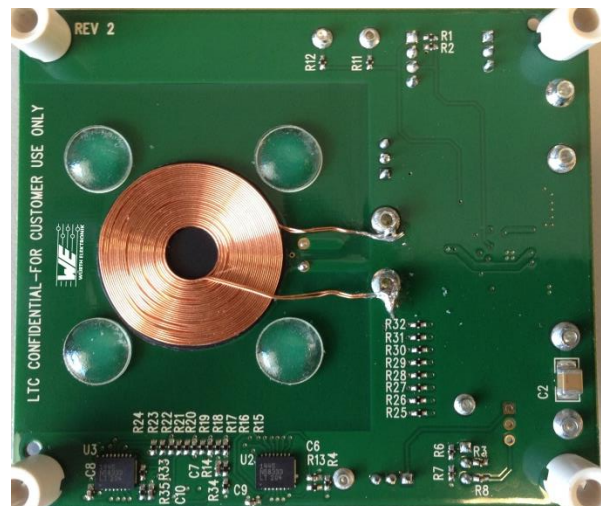


Abbildung 4: DC1967A, Demo-Empfängerkarte mit WE-Empfängerspule 760308101303

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung

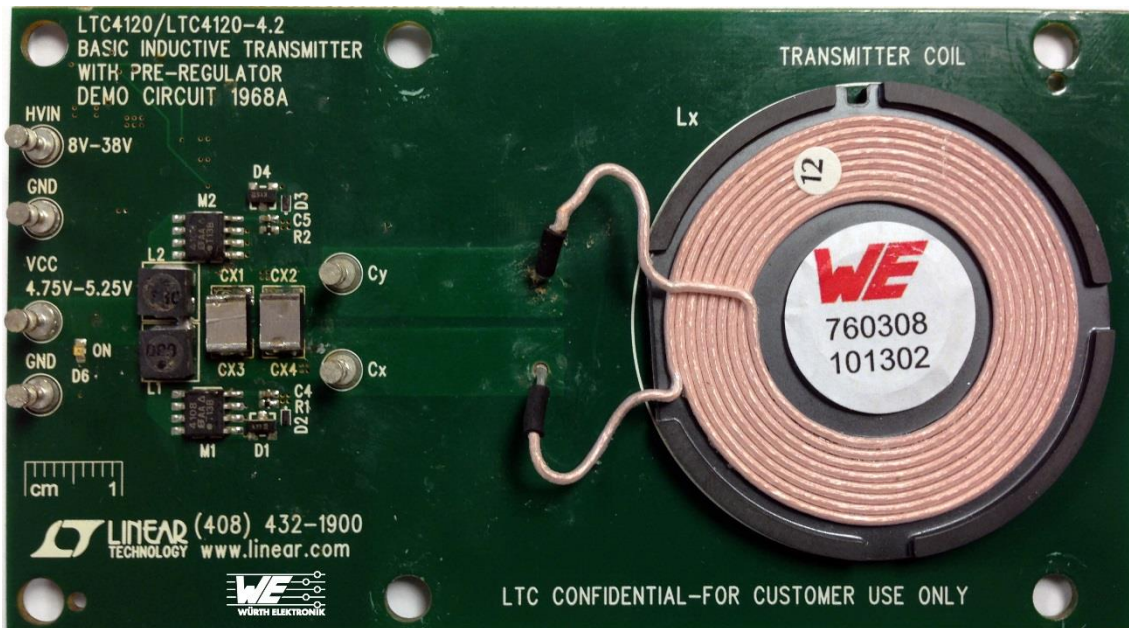


Abbildung 5: DC1968A, Demo-Sendekarte mit WE-Senderspule 760 308 101 302

5. Drahtlosspulen von Würth Elektronik und ihre Spezifikationen

Die für die vorliegende Evaluierung ausgewählten Drahtlosspulen sind in Abschnitt 3 aufgeführt. Die nachfolgend aufgeführte grobe Zusammenfassung der Spezifikationen soll als Grundlage für weitere Berechnungen dienen.

5.1. Senderspulen

Teile-Nr.:	Induktivität	DCR	Q	Größe	Nennstrom bei 40 °C
760 308 111	6,3 μ H	17 m Ω	80	5353	13 A
760 308 110	24 μ H	7 m Ω	180	5353	6 A
760 308 104 113	12 μ H	60 m Ω	120	6052	6 A
760 308 101 302	5,3 μ H	33 m Ω	100	Ø50	6 A

Tabelle 1: Senderspulen im Überblick

5.2. Empfängerspulen

Teile-Nr.:	Induktivität	DCR	Q	Größe	Nennstrom bei 40 °C
760 308 201	10 μ H	160 m Ω	50	3737	4,5 A
760 308 101 303	47 μ H	460 m Ω	25	Ø26	1,4 A

Tabelle 2: Empfängerspulen im Überblick

6. Wesentliche Parameter

Es ist vor allem wichtig, Betrieb und Merkmale des drahtlosen Ladereglers LTC4120 und die Spezifikationen der Spulen nachzuvollziehen, die in die Demoschaltungen integriert werden sollen. Im Abschnitt 3 ist eine Liste drahtloser Sende- und Empfängerspulen aufgeführt, die für

die Evaluierung der Demo-Baugruppen DC1968A bzw. DC1967A in Betracht gezogen werden. Der obige Abschnitt 4 erläutert kurz die Funktionen und Merkmale der Demo-Baugruppe. Die Senderspule wird durch eine stromgekoppelte Quelle gespeist, damit vom Sender ein gutes sinusförmiges Signal übertragen wird.

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung



Wie sich dem Datenblatt zum LTC4120 entnehmen lässt, sollten L_x (Induktivität der Senderspule) und L_r (Induktivität der Empfängerspule) idealerweise so ausgewählt werden, dass ein Windungsverhältnis von 1:3 erzielt wird. Die Induktivitätswerte können so ausgewählt werden, dass die erforderliche Spule nicht zu groß ist (falls die Kapazität des Kondensators am sendeseitigen Ende zu niedrig ist) und der Kreisstrom am sendeseitigen Ende nicht zu hoch ist (falls die Induktivität der Primärseite zu niedrig ist). Die für die korrekte Auswahl von Schwingungsinduktivitäten und Kondensatoren erforderliche Rückwärtsanalyse ist im Folgenden beschrieben.

6.1. Empfängerspule und Frequenz

Die Spule auf der Empfängerseite, die gegenwärtig beim DC1969A eingesetzt wird, hat eine Induktivität von $47 \mu\text{H}$. Es handelt sich dabei um eine eingebettete 4-Schicht-PCB-Spule mit Ferritbasis. Würth Elektronik eiSos bietet eine Spule an, die die PCB-Spezifikation erheblich überschreitet und so eine deutlich höhere Effizienz bietet. Die Teilenummer lautet [760 308 101 303](#), die Kurzspezifikation entnehmen Sie Tabelle 2. Eine ausführliche Spezifikation finden Sie im Datenblatt, das Sie unter www.wue-online.com/wirelesspower herunterladen können.

Die Empfängerfrequenz ändert sich von 127 kHz in 142 kHz . Unter abgestimmten Bedingungen beeinträchtigen sowohl C2P als auch C2S die Schwingungsfrequenz, unter nicht abgestimmten Bedingungen würde dies nur C2S tun.

$$F_t \cong \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_r * (C_{2P} + C_{2S})}}$$

$$F_d \cong \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_r * C_{2S}}}$$

Bei Berechnung mit der obigen Formel für die Schwingungsfrequenz unter nicht abgestimmten Bedingungen ($F_D = 142 \text{ kHz}$) ergibt sich als erforderliche Kapazität $C_{2S} = 26,7 \text{ nF}$.

*Durch Parallelschaltung von 22 nF und $4,7 \text{ nF}$ ergibt sich die erforderliche Kapazität.

**Die Frequenz 142 kHz unter nicht abgestimmten Bedingungen (anstelle von 140 kHz) ergibt sich aus der Begrenzung der verfügbaren Kapazität.

Ähnlich ergibt sich für die Schwingungsfrequenz unter abgestimmten Bedingungen ($F_T = 127 \text{ kHz}$) für die erforderliche Kapazität:

$C_{2P} = 6,75 \text{ nF}$,

*Der nächstgelegene Wert für diese Kapazität beträgt $6,8 \text{ nF}$.

Hinweis: Die in DC1969A verwendeten Bauteile sind parallel geschaltet und weisen $1,8 \text{ nF}$ bzw. $4,7 \text{ nF}$ auf. Bei diesem Wert beläuft sich die Frequenz auf 131 kHz .

6.2. Senderspule und Frequenz

Nachdem wir nun die Empfängerspule mit einem Induktivitätswert von $47 \mu\text{H}$ ausgewählt haben, lässt sich die Senderspule entsprechend auswählen, um der im Datenblatt zum LTC4120 beschriebenen Empfehlung eines Windungsverhältnisses von 1:3 nachzukommen.

$$n = \frac{nR}{nX} = \sqrt{\frac{L_r}{L_x}}$$

$$3^2 = 9 = \frac{47 \mu\text{H}}{L_x}$$

$$L_x = 5,2 \mu\text{H}$$

Für die obige Anforderung bietet Würth Elektronik eiSos das Bauteil [760 308 101 302](#) an. Die wichtigsten Parameter lauten: $5,3 \mu\text{H}$, 6 A , $33 \text{ m}\Omega$, $Q = 100$.

Frequenz der angestrebten Schwingung

$$F_0 \approx \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L_x * C_x}} = 130 \text{ kHz}$$

Bei Berechnung mit der obigen Formel für die Schwingungsfrequenz des Senders (130 kHz) ergibt sich als erforderlicher Wert für C_x 283 nF . Da es für diesen Wert kein Standardbauteil gibt, wählen wir 180 nF bzw. 100 nF aus, um eine möglichst starke Annäherung an die vorgesehene Betriebsfrequenz zu erzielen. Diese beiden Kondensatoren nutzen denselben Kreisstrom. Genauere Werte lassen sich auswählen, um die gewünschte Schwingungsfrequenz exakt zu erzielen.

Aus diesem Grund beträgt die tatsächliche Kapazität 280 nF . Die zugehörige Schwingungsfrequenz beläuft sich auf:

$$F_0 = 130,71 \text{ kHz}$$

* F_0 ist $0,5 \%$ höher als die ursprüngliche erforderliche Frequenz.

Allerdings beläuft sich der ausgewählte Kapazitätswert beim DC1969A auf $2 * 0,15 \mu\text{F}$.

Teilenummer: ECHU1H154GX9

Beim obigen Wert beläuft sich die neue Schwingungsfrequenz auf $126,3 \text{ kHz}$ (unbelastet).

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung



6.3. Bedeutung des Windungsverhältnisses (n)

Das für DC1967A empfohlene Windungsverhältnis zwischen Sende- und Empfängerspule beträgt 1:3. Hier wurden verschiedene Bedingungen ausgewählt, bei denen das Erfüllen dieser Anforderung schwierig ist. Welche Wirkung hätte dies auf die Leistung? Die Schaltung wurde so modifiziert, dass sie mehr Strom von der Spule bezieht. Hierzu wurde die Ausgangsspannung auf 8,23 V festgelegt. Gleichzeitig jedoch stellt die Schaltung den größtmöglichen Strom bereit und behält die maximale Effizienz bei.

6.3.1. Bedingung 1

Tx: 760308101302 (5,3 μ H, 33 m Ω , Q: 100, 6 A)

Rx: 760308101303 (47 μ H, 460 m Ω , Q: 25, 1,4 A)

$$n = \sqrt{\frac{47 \mu H}{5,3 \mu H}}$$

$$n = 3$$

Messergebnisse:

*V_{CC} = 5 V

*I_{INPUT} = 0,973 A

*V_{IN_LR} = 15,04 V

*I_{IN} = 0,239 A

V_{BAT} = 8,21 V

I_{BAT} = 0,275 A

P_{MAX_BAT} = 4,865 W

Wirkungsgrad (η) = $(V_{IN_LR} * I_{IN}) / (V_{CC} * I_{INPUT}) = 73,9 \%$

6.3.2. Bedingung 2

Tx: 760308104113 (12 μ H, 60 m Ω , Q-120, 7 A)

Rx: 760308101303 (47 μ H, 460 m Ω , Q-25, 1,4 A)

$$n = \sqrt{\frac{47 \mu H}{12 \mu H}}$$

$$n = 1,97 \approx 2$$

Messergebnisse:

*V_{CC} = 5 V

*I_{INPUT} = 0,224 A

*V_{IN} = 11,85 V

*I_{IN} = 0,072 A

Hinweis:

V_{OUTPUT} = 8,23 V

I_{OUTPUT} = 0,05 A

P_{MAX_BAT} = 1,12W

Wirkungsgrad (η) = $(V_{IN_LR} * I_{IN}) / (V_{CC} * I_{INPUT}) = 76,2\%$

6.3.3. Bedingung 3

Tx: 760308110 (24 μ H, 7 m Ω , Q-180, 6 A)

Rx: 760308101303 (47 μ H, 460 m Ω , Q-25, 1,4 A)

$$n = \sqrt{\frac{47 \mu H}{24 \mu H}}$$

$$n = 1,4$$

Messergebnisse:

*V_{CC} = 5V

*I_{INPUT} = 0,1 A

*V_{IN} = 11,65 V

*I_{IN} = 0,025 A

V_{OUTPUT} = 8,23 V

I_{OUTPUT} = **0,013 A**

P_{MAX_IN} = 0,5 W

Wirkungsgrad (η) = $(V_{IN_LR} * I_{IN}) / (V_{CC} * I_{INPUT}) = 58,3 \%$

6.3.4. Bedingung 4

Tx: WT-505060-8K2-LT (5,0 μ H, 30,3 m Ω , Q-80, X A)

Rx: 760308101303 (47 μ H, 460 m Ω , Q-25, 1,4 A)

$$n = \sqrt{\frac{47 \mu H}{5 \mu H}}$$

$$n = 3,07$$

Messergebnisse:

*V_{CC} = 5 V

*I_{INPUT} = 1,159 A

*V_{IN} = 13,16 V

*I_{IN} = 0,314 A

V_{OUTPUT} = 8,21 V

I_{OUTPUT} = 0,275 A

P_{MAX_BAT} = 5,795 W

Wirkungsgrad (η) = $(V_{IN_LR} * I_{IN}) / (V_{CC} * I_{INPUT}) = 71,3\%$

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung



* V_{IN} = Spannung am Prüfpunkt VIN des DC1967A

* I_{IN} = von der Empfängerspule abgegebener Strom

* V_{CC} = Eingangsspannung an der Senderbaugruppe DC1968A

* I_{INPUT} = von der Spannungsquelle VCC abgegebener Strom

Oszillogramm Aufnahmen

Die nachfolgenden Oszillogramm Aufnahmen beziehen sich auf die oben beschriebenen jeweiligen Tests. In den Oszillogrammen bezeichnet Ch1 das gleichgerichtete empfangene Signal, Ch2 ist kein Signal, Ch3 ist das Empfängersignal und Ch4 der gleichgerichtete Empfängerstrom.

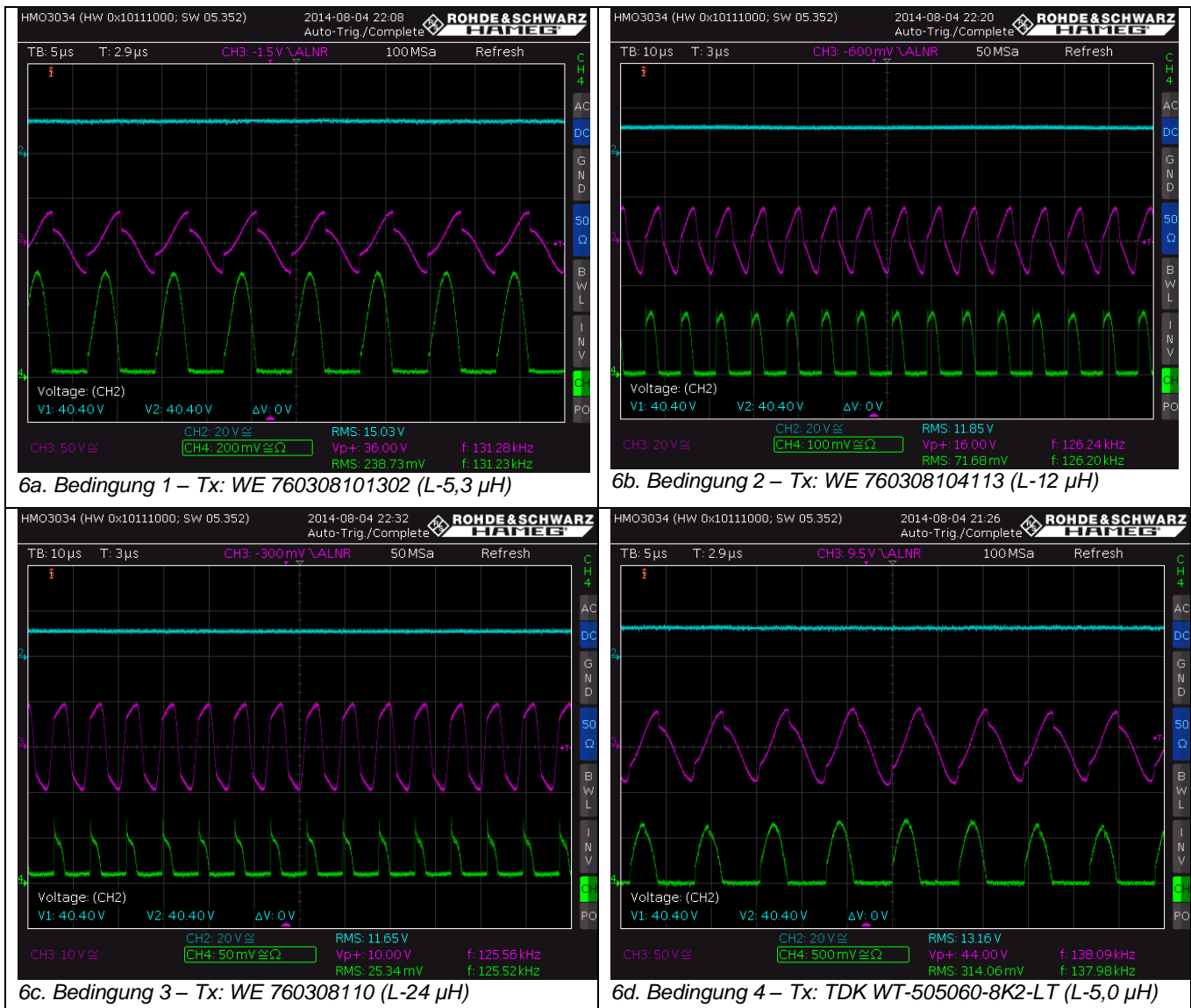


Abbildung 6: Oszillogramme für unterschiedliche Testbedingungen

Durch Analyse dieser Signale lässt sich feststellen, dass sich mit Bedingung 1 die beste Leistung erzielen lässt. Die betrachteten Kriterien sind dabei der Wirkungsgrad der Spule und die Fähigkeit zur Unterstützung des maximalen Laststroms bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung einer möglichst hohen Spannung am empfangenseitigen Ende. Es

lässt sich erkennen, dass die Energieübertragungsleistung besser ist, wenn das Windungsverhältnis der Spule Tx zur Spule Rx 1:3 beträgt – ein niedrigeres Windungsverhältnis hat offenbar eine Abschwächung der Signalübertragung auf Empfängerseite zur Folge, weswegen kein ausreichend hoher Ladestrom erzielt werden kann. Dies ist bei den

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung



Bedingungen 2 und 3 der Fall, wo von den Spulen nicht mehr als 1,895 W bzw. 1,18 W unterstützt werden.

Deswegen ist das Windungsverhältnis von 1:3 zwischen Sender und Empfänger wichtig, entbindet aber nicht von der Auswahl einer Ferritbasis geeigneter Größe, Form und Stärke und der Anordnung der Wicklung auf der Ferritbasis.

6.4. Kreisstrom

Der Kreisstrom im LC-Kreis der Primär- und Sekundärspule muss für einen zuverlässigen Betrieb der Schaltung geschätzt werden. Die geschätzte Spannung in der Primärspule beträgt:

$$V_{pk} - p_{pk} = 2 * \pi * V_{inDC}$$

$$V_{pk} - p_{pk} = 2 * 3,14 * 5$$

$$V_{pk} - p_{pk} = 31,4 V$$

Deswegen gilt:

$$V_{pk} = 15,7 V$$

Der Blindwiderstand des 0,3- μ F-Kondensators beläuft sich bei einer Frequenz von 126,3 kHz auf:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f c}$$

$$X_c = 3,74 \Omega$$

Der oben berechnete Wert X_c hat eine Kreisstromstärke in einer Größenordnung von ca. 4,2 A (Spitze) bzw. ca. 3 A (effektiv) zur Folge.

Aus diesem Grund sind 0,15- μ F-Kondensatoren auszuwählen, die bei 126,3 kHz einen zulässigen Effektivstrom von mindestens 1,5 A bieten. Verwendet wurde der Kondensator ECHU1H154GX9 mit einem Effektivstrom von ca. 1,5 A. Ebenso unterscheidet sich der Kreisstrom bei verschiedenen Prüfbedingungen; es ergeben sich folgende Werte:

- i. Bedingung 1: 2,07 A effektiv
- ii. Bedingung 2: 0,931 A effektiv
- iii. Bedingung 3: 0,459 A effektiv
- iv. Bedingung 4: 2,14 A effektiv

6.5. Eingangsstrom

Der Betrag der Eingangsstromaufnahme zur Erzeugung eines ausreichend großen Sekundärstroms ist eine Funktion des Magnetfeldes, das an der Primärspule generiert wird. Die Größenordnung des Magnetfeldes ist direkt proportional zum Strom der Senderspule und ein Produkt von Eingangsstrom und Q-Wert.

$$B = Q \cdot I_{Lx}$$

Aus diesem Grund ist bei der Auswahl der Primärspule deren Q-Wert zu beachten. Diese Spule [760 308 101 302](#) von Würth Elektronik eiSos hat einen Q-Wert von 100. Dies ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt im Vergleich zu den

Mitbewerbern der höchste verfügbare Wert. Der zur Versorgung mit dem Laststrom erforderliche Eingangsstrom kann durch Verwendung einer Senderspule mit einem möglichst hohen Q-Wert und des optimierten Windungsverhältnisses optimiert oder minimiert werden. Bei einem hohen Windungsverhältnis wird durch die DHC-Funktion sichergestellt, dass nicht zu viel Eingangsstrom an die Empfängerseite übertragen wird. Betrachten Sie in diesem Zusammenhang auch die Prüfbedingungen 1 und 2, wobei das empfangene Signal bei Bedingung 1 stärker ist und die DHC-Funktion aktiv die an den DC/DC-Wandler angelegte Spannung begrenzt (das Signal Ch2 verzeichnet in jedem Zyklus einen abrupten Abfall, wenn der DHC-Kontakt an Masse gelegt wird). Im Vergleich dazu wird bei Bedingung 2, bei der das Windungsverhältnis lediglich 1:2 beträgt, die Bedingung $V_{IN} > V_{DHC}$ nicht erfüllt, wenn der DHC-Kontakt an Masse gelegt wird. Aus diesem Grund ist der Wirkungsgrad der Energieübertragung der höchste bei den vier Testbedingungen.

6.6. R_{DC}

Der R_{DC} der Sende- und Empfangsspulen ist direkt proportional zum Wirkverlust, weswegen ein niedrigerer R_{DC} der Spulen zur Erzielung eines höheren Wirkungsgrads zu bevorzugen ist.

Der Widerstand der Sekundärspule wirkt sich auf deren Wirkungsgrad aus, der wie folgt festgelegt ist:

$$\frac{RL}{R2 + RL}$$

Der R_{DC} der Senderspule 760 308 101 302 von Würth Elektronik eiSos beläuft sich auf 33 m Ω bei einem Effektivstrom von 2,2 A.

Es ergibt sich ein Leistungsverlust von $I^2 \cdot DCR = 0,16 W$.

6.7. Reflektierte Impedanz

Die Schwingungsfrequenzen der LC-Kreise von Sende- und Empfängerseite ändern sich je nach belastetem oder unbelastetem Zustand. Es ist wichtig zu verstehen, welchen Einflüssen die reflektierte Impedanz in einem Schwingkopplungskreis ausgesetzt ist und welche Wirkung die reflektierte Impedanz ihrerseits auf die Leistungsfähigkeit des Systems ausübt.

Durch welche Faktoren die reflektierte Impedanz beeinträchtigt wird, ist im Folgenden erklärt.

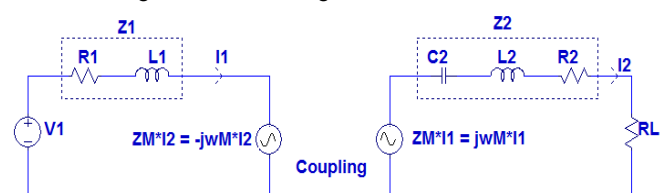


Abbildung 7: Modell eines gekoppelten Kreises

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung

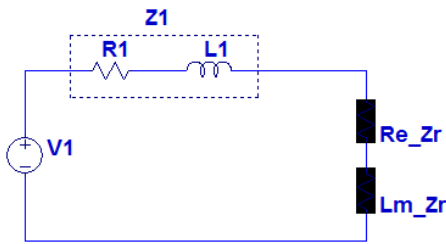


Abbildung 8: Gleichwertiges Primärmodell mit reflektierter Impedanz

Die reflektierte Impedanz Z_r lässt sich mit folgender Gleichung ausdrücken:

Kirchhoffsche Gleichung zur Primärseite aus Abbildung 6
 $I1Z1 + I2ZM = V1 \rightarrow$ Gleichung 1

Kirchhoffsche Gleichung bei Berücksichtigung der Lastabschaltung

$$I1ZM + I2Z2 = 0$$

$$I2 = \frac{-I1Zm}{Z2} \rightarrow \text{Gleichung 2}$$

Ersetzung des Werts $I2$ in Gleichung 1

$$Z_{eq} = \frac{V1}{I1} = Z1 - \frac{(Zm)^2}{Z2}$$

Hierbei ist $Zm = -j\omega M$.

M = gegenseitige Induktivität zwischen Primär- und Sekundärseite

$$Z_{eq} = Z1 - \frac{\omega^2 M^2}{Z2}$$

So lässt sich die reflektierte Impedanz im Kreis wie folgt ausdrücken: $\frac{\omega^2 M^2}{Z2}$

Wenn der Sekundärkreis mit der gleichen Frequenz schwingt wie der Primärkreis, wird nur die Resistanz, nicht aber die Induktanz oder Reaktanz am Primärkreis reflektiert. Die Resistanz des Sekundärkreises beträgt:

$$Z2 = R2 + RL$$

Daraus ergibt sich, wenn beide Kreise bei gleicher Frequenz schwingen, folgende reflektierte Impedanz:

$$ReZr = \frac{\omega^2 M^2}{R2 + RL}$$

Der Wirkungsgrad des Systems ist voraussichtlich höher, wenn der Term $ReZr$ größer ist.

Allerdings wirkt sich auch eine erhebliche Abnahme des Lastwiderstands RL auf den Wirkungsgrad des Sekundärkreises aus, denn Rs ist vorherrschend bezogen auf den Spannungsabfall.

Folgende Faktoren bestimmen den Spannungsabfall am Sekundärkreis:

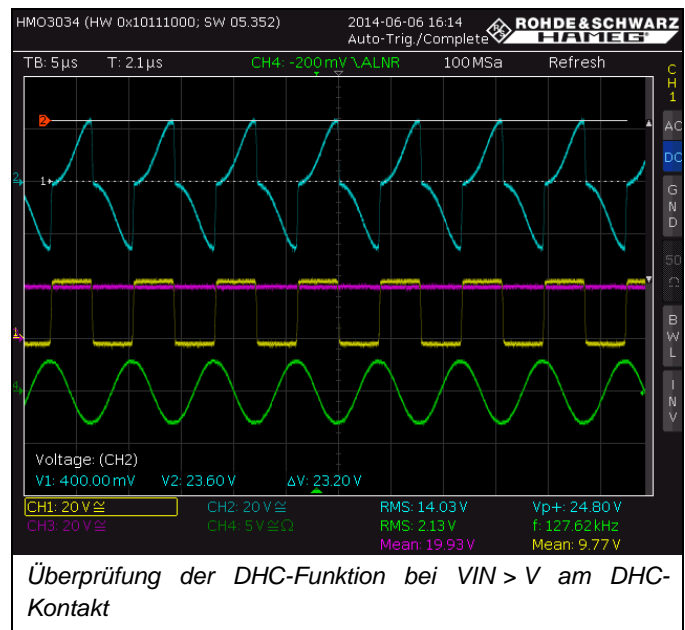
$$\frac{RL}{R2 + RL}$$

6.8. Die DHC-Funktion

Durch die DHC-Funktion des LTC1967A wird die Schwingungsfrequenz auf eine voreingestellte, nicht abgestimmte Frequenz von 140 kHz verschoben, wenn die Spulen einen besseren Kopplungsfaktor aufweisen, d. h. die Spannung bei V_{IN} größer als 14 V ist; ist der Kopplungsfaktor der Spulen hingegen niedrig ($V_{IN} < 14$ V), dann erfolgt eine Abstimmung auf 127 kHz.

Deswegen ist es bei der Auswahl der Spule für einen Sendekreis wichtig, auf eine Schwingungsfrequenz zu achten, die höher ist als die im abgestimmten Zustand eingestellte Empfängerfrequenz. Hierdurch wird sichergestellt, dass Sender und Empfänger bei gleicher Frequenz schwingen und dieser Kreis als doppelt abgestimmter Schwingkreis fungiert und der Chip folglich die volle Energieübertragung ermöglicht.

Das nachfolgende Oszillogramm zeigt das Signal bei Ch1: einen Rechteckimpuls im Bereich der Senderfrequenz. Jedes Mal, wenn das Empfangssignal bei V_{IN} höher ist als die Spannung am DHC-Kontakt, wird der DHC-Kontakt an Masse gelegt, damit sichergestellt ist, dass sich V_{IN} (Ch3) nicht noch weiter erhöht. Die Kurve von Ch2 zeigt das Signal in der Empfängerwindung, Ch4 stellt den Strom durch den Sender dar.



Überprüfung der DHC-Funktion bei $V_{IN} > V$ am DHC-Kontakt

Abbildung 9: DHC-Funktionsprüfung

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose Energieübertragung



7. Fazit

Eine stärkere Kopplung, ein niedrigerer physischer Abstand zwischen Sender und Empfänger und ein höheres Windungsverhältnis gewährleisten eine höhere Spannung auf der Empfängerseite und damit einen höheren Wert für VIN. Die DHC-Funktion begrenzt den Wert der an den DC-DC-Wandler angelegten VIN und stellt damit sicher, dass der Sender in einem weiten Betriebsspannungsbereich betrieben werden kann. Das Experiment (Bedingung 2) zeigt, dass der Wirkungsgrad höher ist, wenn die Sinusförmigkeit des Empfangssignals stärker ausgeprägt ist. Aus diesem Grund sollte, sofern die Anwendung einen weiteren Eingangsspannungsbereich erforderlich macht, ein höheres Windungsverhältnis (ca. 3) ausgewählt werden; ist

hingegen ein besserer Wirkungsgrad notwendig, dann wird das optimale Windungsverhältnis (bei dem das Empfangssignal möglichst sinusförmig ist) empfohlen.

Sende- und Empfangsspule müssen unter Beachtung allen oben aufgeführter Parameter sorgfältig ausgewählt werden, um die drahtlose Energieübertragung wahlweise mit einem höheren Wirkungsgrad oder einem breiteren Eingangsspannungsbereich für den Demoschaltkreis DC1969A erzielen zu können. Die Effizienz der Energieübertragung kann mithilfe verschiedener Sendee- und Empfängerspulen mit hohen Q-Werten gesteigert werden, die von Würth Elektronik eiSos gefertigt werden.

8. Anhang

8.1. Stückliste

Einige Bauteile wurden getauscht, um die Leistung der Kopplung und der Energieübertragung bei Windungsverhältnissen von unter 3 zu prüfen. Details zu den geänderten Bauteilen sind nachfolgend angegeben:

Bezeichnung	Bedingung 1	Bedingung 2	Bedingung 3	Bedingung 4
Lx	760 308 101 302 (5,3 µH; 33 mΩ; Q-100)	760 308 104 113 (12 µH; 60 mΩ; Q-120)	760 308 110 (24 µH; 7 mΩ; Q-180)	WT-505060-8K2-LT (5 µH; 30,3 mΩ; Q-80)
Lr	760 308 101 303 (47 µH; 460 mΩ; Q-25)	760 308 101 303 (47 µH; 460 mΩ; Q-25)	760 308 101 303 (47 µH; 460 mΩ; Q-25)	760 308 101 303 (47 µH; 460 mΩ; Q-25)
CX1	ECHU1H154GX9 (PPS; 0,15 µF; 50 V)	ECHU1H154GX9 (PPS; 0,15 µF; 50 V)	ECHU1H154GX9 (PPS; 0,082 µF; 50 V)	ECHU1H154GX9 (PPS; 0,15 µF; 50 V)
CX2	ECHU1H154GX9 (PPS; 0,15µF; 50V)	Wird nicht verwendet	Wird nicht verwendet	ECHU1H154GX9 (PPS; 0,15 µF; 50 V)
R_{FB1}	2,0 mΩ	2,0 mΩ	2,0 mΩ	2,0 mΩ
R_{FB2}	825 kΩ	825 kΩ	825 kΩ	825 kΩ

Tabelle 3: Stückliste

ANWENDUNGSHINWEIS

Überlegungen zum Tausch von Ladespulen für die drahtlose 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:

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

Component Selector:

<http://www.we-online.de/component-selector>

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>