

Wireless charging – Wireless disturbing?

Frequenz tuning versus variable Resonanzkreisabstimmung

Unterschiedliche Systemeigenschaften elektrischer Fahrzeuge wie Bodenfreiheit, Batteriespannungen, Spulengeometrien, Stromtragfähigkeit etc. haben zur Folge, dass gegenwärtig jeder Hersteller eine individuell für eine jeweilige Fahrzeugflotte entwickelte induktive Ladeeinheit anstrebt. Finpower arbeitet an der Entwicklung eines universellen induktiven Ladesystems.

Autoren: Georg Heiland, Dr. Christof Ziegler

Induktive Ladesysteme für elektrische Fahrzeuge sind aktuell Gegenstand der Erforschung, Entwicklung und Standardisierung. Typische Anwendungsbeispiele induktiver Ladesysteme sind das kontaktlose Nachladen von Flurförderfahrzeugen im industriellen Bereich

sowie von Elektrofahrzeugen im Straßenverkehr.

Üblicherweise werden induktive Ladesysteme auf eine bestimmte Frequenz abgestimmt, wobei der Übertragerspule sender- und empfängerseitig Kapazitäten zugeschaltet sind. Durch diese Kombina-

tion kann das System auf die normativ geforderten Übertragungsfrequenzen ausgelegt werden. Durch eine solche Kombination von Spulen und Kapazitäten entsteht ein Schwingkreis, der eine bestimmte Eigenfrequenz, auch Resonanzfrequenz genannt, besitzt.

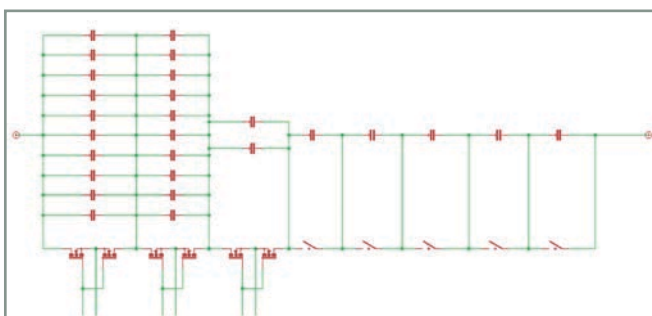


Bild 1: Schaltung zur variablen Abstimmung eines induktiven Ladesystems, die im Forschungsvorhaben realisiert wurde.

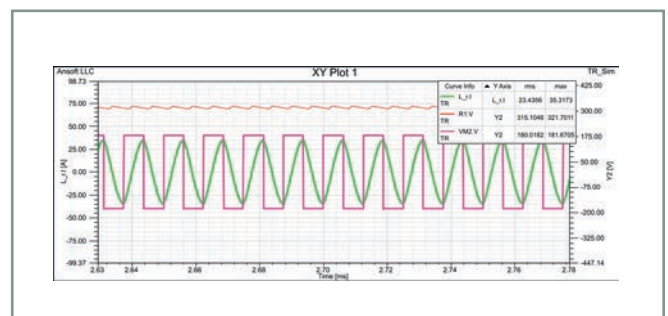


Bild 2: Zu erwartende Strom- und Spannungsformen an den Übertragerspulen bei einer Betriebsfrequenz, die über der Resonanzfrequenz liegt.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Je nach Positionierung der Sender- und Empfängerspulen zueinander verschiebt sich die Resonanzfrequenz geringfügig zu höheren oder niedrigeren Werten, da sich die für die Resonanzfrequenz maßgebende Induktivität verändert. Um die gewünschte Ladeleistung zur Verfügung zu stellen, muss dann die Übertragungsfrequenz entsprechend angepasst werden.

Eine alternative Methode verändert nicht die Übertragungsfrequenz, sondern die Resonanzkreisabstimmung. Konkret bedeutet das, dass beispielsweise durch ein Zu- oder Abschalten von zusätzlichen Kapazitäten die Resonanzfrequenz immer auf demselben Wert gehalten wird. Eine im Forschungsvorhaben realisierte Schaltung zeigt Bild 1.

Einfluss auf die elektromagnetische Störaussendung

Die Energieübertragung erfolgt bei induktiven Ladesystemen über ein Magnetfeld, das aus dem hochfrequenten Wechselstrom resultiert, der durch die Übertragerspulen fließt. Betrachtet man diesen Strom an einem digitalen Speicheroszilloskop, so ist eine Sinusform erkennbar, welche der Resonanzfrequenz des Übertragungssystems entspricht. Die Physik der elektromagnetischen Wellen erklärt, dass der zeitliche Verlauf des Magnetfelds identisch

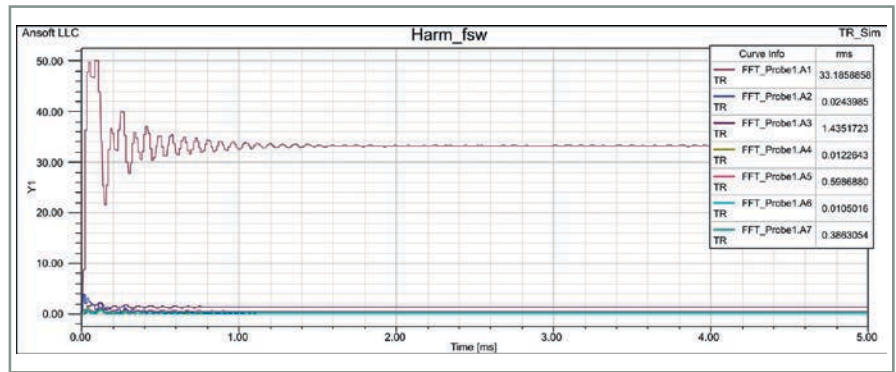


Bild 3: Zu erwartende Amplituden der Oberwellen des Spulenstroms bei einer Betriebsfrequenz, die über der Resonanzfrequenz des Systems liegt (überresonanter Betrieb).

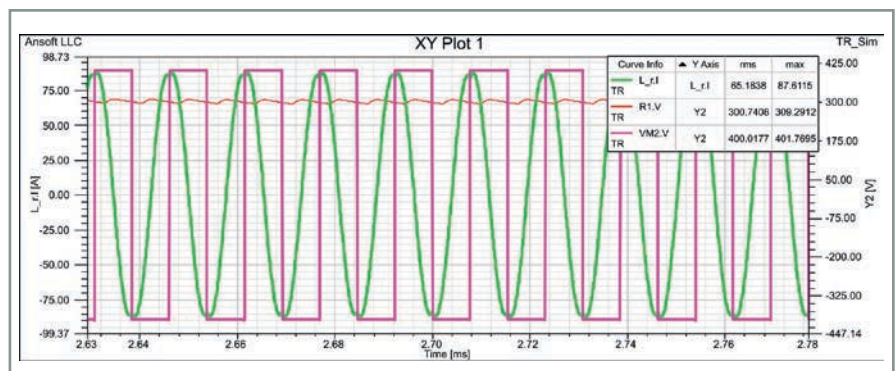


Bild 4: Zu erwartende Strom- und Spannungsformen an den Übertragerspulen bei einer Betriebsfrequenz, die unter der Resonanzfrequenz des Systems liegt (unterresonanter Betrieb, UR).

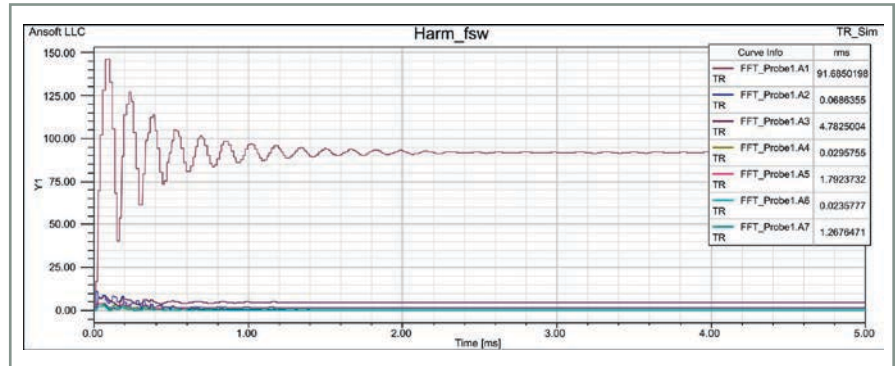


Bild 5: Zu erwartende Amplituden der Oberwellen des Spulenstroms bei einer Betriebsfrequenz, die unter der Resonanzfrequenz des Systems liegt (unterresonanter Betrieb).

Eck-DATEN

Eine induktive Ladestation mit der Fähigkeit, eine möglichst hohe Anzahl unterschiedlicher Fahrzeugtypen mit entsprechend unterschiedlichen Empfängerspulen und Batteriesystemen zu bedienen, wird aktuell bei Finpower im Rahmen des vom bayerischen Staatsministerium für Wirtschaft & Medien (StMWi) geförderten Forschungsprojekts UnIndCha (Universal Inductive Charging) aufgebaut. TDK Electronics (vormals Epcos) ist im Projekt als Hersteller von Transmitter- und Receiver-Spulen für induktive Ladesysteme beteiligt, mit Augenmerk auf die elektromagnetische Verträglichkeit universeller Systeme. Des Weiteren unterstützen die Technische Universität München (TUM), Fachgebiet Energiewandlungstechnik, sowie die Hochschule Kempten beziehungsweise das Technologienetzwerk Allgäu (TNA) mit grundlegenden Forschungsarbeiten.

mit dem des Spulenstroms ist (Maxwell'sches Durchflutungsgesetz):

$$N \cdot I = \oint \vec{H} \, d\vec{l}$$

Jedoch kann ein solches System trotz der augenscheinlich idealen Kurvenformen von Strom und Magnetfeld die normativ geforderten Grenzwerte nicht ohne weitere Filtermaßnahmen einhalten. Grund hierfür ist, dass die Stromform nicht exakt sinusförmig ist, sondern je nach Betriebsfrequenz einen mehr oder weniger stark ausgeprägten weiteren, unterschiedlichen Frequenzanteil besitzt. Diese Stromform

ist immer dann erkennbar, wenn die Betriebsfrequenz deutlich von der Resonanzfrequenz abweicht. Je nach Vorzeichen der Abweichung ergeben sich folgende beispielhafte Stromformen bei jeweils gleichen Lastbedingungen (Simulation mit Parametern des realen Systems).

Eine Frequenzanalyse der Stromform (FFT) ergibt die folgenden Werte für die Oberwellen (Bilder 3 bis 6). Ein Vergleich der Oberwellen des Spulenstroms zeigt, dass bei resonantem Betrieb die Werte deutlich niedriger ausfallen (Tabelle 1). Für die Einhaltung normativer Forderungen ist jedoch eine Bewertung der abgestrahlt-

ten Magnetfelder notwendig. Folgende Abschätzung gibt einen qualitativen Überblick über die resultierenden abgestrahlten Magnetfelder. Bei einem geraden Leiter, durch den der Strom fließt, kann ein kreisförmiges Magnetfeld angenommen werden, dessen Amplitude umgekehrt proportional zum Abstand einer Magnetfeldlinie zum Leiter abnimmt (Nahfeld).

$$|\vec{H}| \approx \frac{I}{2\pi r}$$

Aus der Normung wird eine Magnetfeldmessung im Abstand von 10 m gefordert. Dies ergibt in dem oben dargestellten Beispiel in etwa folgende Feldstärken (Peak-Werte) (Tabelle 2).

Messergebnisse

Im Forschungsvorhaben UnIndCha wurde ein induktives Ladesystem prototypisch aufgebaut und die abgestrahlte magnetische Störaussendung im Frequenzbereich zwischen 9 kHz und 30 MHz bei unterschiedlichen Übertragungsfrequenzen des WPT-Systems gemessen (Bild 8).

Die Ergebnisse zeigen, dass mit unterschiedlichen Resonanzkreisabstimmungen unterschiedlich starke Störaussendungen bei ansonsten gleichen Betriebsparametern resultieren (Bilder 9 bis 11). Diese Unterschiede ergeben sich vor allem durch unterschiedlich hohe Abweichungen der Betriebsfrequenzen von der jeweiligen resultierenden Resonanzfrequenz des Systems. Je nach Abstimmung konnte in den Messreihen eine Reduktion der abgestrahlten Emissionen um bis zu 10 dBµA/m festgestellt werden. Dabei ergab sich in Übereinstimmung mit den theoretischen Annahmen eine minimale Störabstrahlung bei Betrieb in Resonanz.

Zudem konnte in den Messungen ein optimaler Wert für die Abstimmung von 62 Prozent festgestellt werden, wodurch die Schlussfolgerung naheliegt, dass mit einer variablen Abstimmung bei zu starker Kompensation die Störaussendungen wieder zunehmen. Bei höheren Versatzpositionen ist davon auszugehen, dass die Anpassung der Abstimmung an Wirksamkeit zunimmt. Durch die Möglichkeit der variablen Resonanzkreisabstimmung kann dabei bei höheren Versatzpositionen immer ein Betrieb im normativ vorgesehenen Frequenzbereich sichergestellt werden.

Tabelle1: Vergleich der Oberwellen des Spulenstroms

Harmonische	% der Grundwelle		
	überresonant	unterresonant	resonant
1	100,00	100,00	100,00
2	0,07	0,08	0,04
3	4,34	5,21	0,47
4	0,04	0,03	0,03
5	1,81	1,95	0,13
6	0,03	0,03	0,03
7	1,17	1,38	0,07

Tabelle 2 : Vergleich der Feldstärken (Peak-Werte)

Harmonische [dBµA/m]	überresonant	unterresonant	resonant
1	114,5	123,3	119,6
2	51,6	60,8	51,3
3	87,6	97,6	73,0
4	45,6	53,6	50,1
5	79,6	89,1	61,9
6	44,9	51,6	50,5
7	75,9	86,1	57,1

Tabelle 3: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Amplitudenwerte für die Harmonischen der Betriebsfrequenz

[dBµA/m]	76% - ÜR	62% - ÜR	62% - R	49% - ÜR	49% - R
1.	45	39,8	44,8	38,1	41,5
2.	-7,6	-12,8	-8,5	0,5	7,1
3.	17,8	17,4	8,7	16,7	12,4
4.	-8,4	-14,4	-17,5	-10,3	-2,5
5.	9,5	8,8	2,5	6,5	4,1
6.	-22,5	-22,1	-22,4	-12,4	-7,7
7.	2,7	1,6	-4,3	0,1	-2,0
8.	-23,6	-23,1	-26,1	-16,5	-11,3
9.	-1,5	-3,0	-10,5	-4,1	-8,0
10.	-27,9	-27,9	-29,9	-18,9	-14,8
11.	-6,2	-9,2	-14,1	-8,4	-12,4

Die unterschiedlichen Amplitudenwerte für die Harmonischen der Betriebsfrequenz sind in Tabelle 3 nochmals zusammengefasst und gegenübergestellt. Die Unterschiede zu den theoretischen Betrachtungen sind in erster Linie quantitativ, da in den Messungen nur eine Vektor-Polarisation gemessen wurde, welche einen mehr oder weniger großen Bruchteil des gesamten Feldvektors beiträgt. In den theoretischen Betrachtungen wurde durch

die Annahme eines idealen geraden Leiters und eines daraus resultierenden idealen kreisförmigen Magnetfelds immer der Maximalwert des Feldvektors berechnet. Die qualitative Übereinstimmung der berechneten und gemessenen Werte ist hingegen gegeben. Messungen der abgestrahlten Störemissionen haben deutliche Unterschiede bei Betrieb mit unterschiedlichen Frequenzen sowie zusätzlich unterschiedlichen Abstimmungen ergeben. Bei

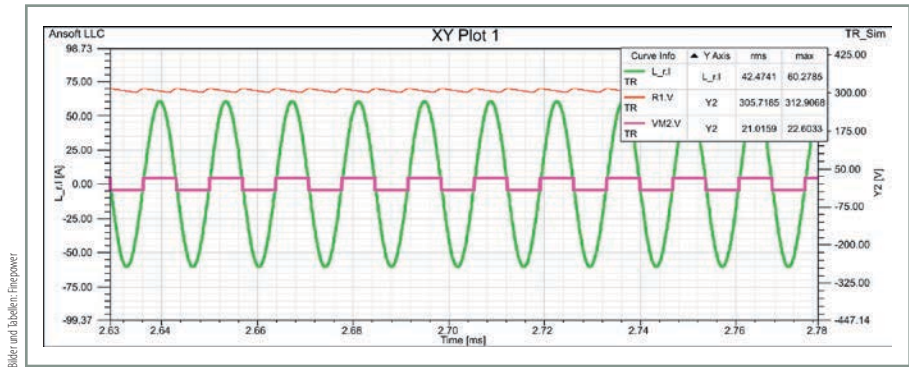


Bild 6: Zu erwartende Strom- und Spannungsformen an den Übertragerspulen bei einer Betriebsfrequenz, die der Resonanzfrequenz des Systems entspricht (resonanter Betrieb, R).

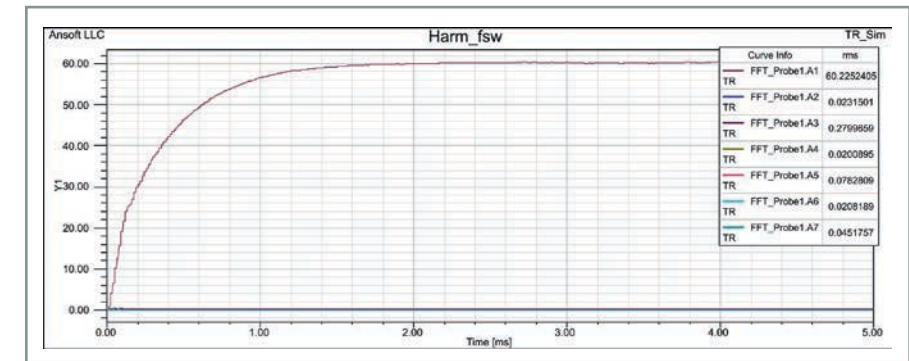


Bild 7: Zu erwartende Amplituden der Oberwellen des Spulenstroms bei einer Betriebsfrequenz, die der Resonanzfrequenz des Systems entspricht (resonanter Betrieb).

Betrieb mit Resonanzfrequenz konnte eine wesentliche Reduktion der Oberwellen erreicht werden. Dies erfordert insbesondere bei hohen Versetzpositionen eine schaltungstechnische Möglichkeit der Nachjustierung der Resonanzabstimmung, was im Forschungsvorhaben UnIndCha untersucht wurde. (neu) ■

Die Schaubilder der Messergebnisse finden Sie in der Online-Version unter der InfoDIREKT-Nummer sowie eine grafische Gegenüberstellung der Harmonischen der Betriebsfrequenz der gemessenen Resonanzkreisabstimmungen.

Autoren
Georg Heiland
Finpower

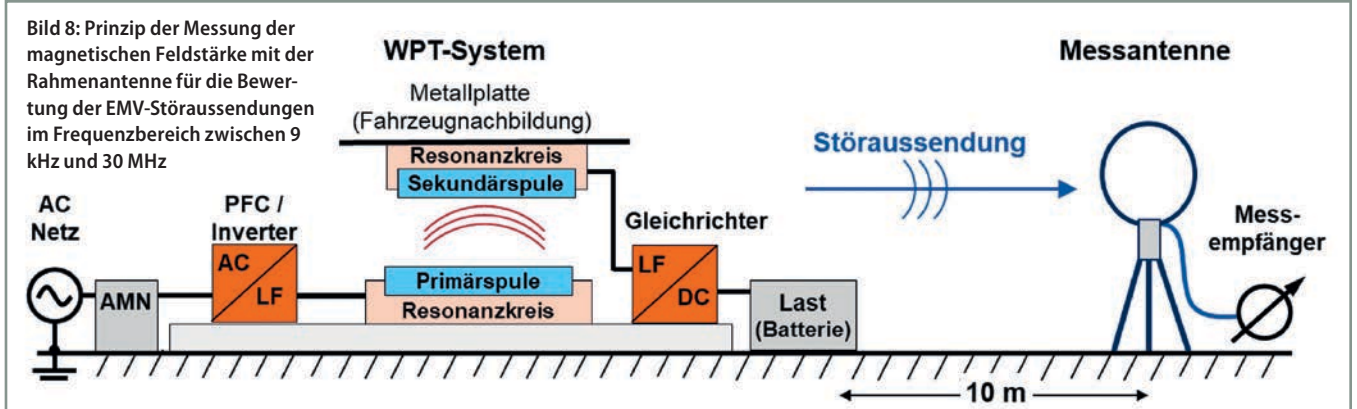


Dr. Christof Ziegler
TDK Electronics



all-electronics.de
infoDIREKT

602ei1219



INTELLIGENTE HOCHLEISTUNG-NETZTEILE FÜR INDUSTRIE, MEDIZIN UND NEUE MÄRKTE

- ▶ 19" Einschub mit 4 oder 8 Slots
- ▶ bis zu 24.000 Watt Ausgangsleistung
- ▶ max. 1.000 VDC, max. 1.600 A am Ausgang
- ▶ ETH, CAN, RS-485, USB Interface
- ▶ IEC 60950 + IEC60601 zertifiziert