

Induktive Ladestationen für Elektrofahrzeuge



von / by

Prof. Dr. Benedikt Schmülling

schmuelling@uni-wuppertal.de

Kontaktloses Laden bietet den Fahrern von Elektroautos einen deutlichen Komfortgewinn im Vergleich zum Einsatz kabelgebundener Ladesysteme. Das Auto wird eingeparkt und der automatische Ladevorgang startet unmittelbar. Steckvorgänge und die Handhabung eventuell durch Witterung verdreckter Kabel sind nicht notwendig. Auch die Unfallgefahr durch freihängende Leitungen zwischen Ladestationen und Fahrzeugen besteht nicht mehr. Diese und weitere Vorteile machen die kontaktlose induktive Ladetechnologie zu einer Alternative für konventionelle Ladesysteme.



Wireless battery charging is a far more convenient solution for the driver of an electric vehicle than a conventional cable link-up. You park your car in the charging bay and the automatic charge-up process begins immediately. No more plugs and sockets; no more dirty or weathered cables; no more risk from cables dangling between charging station and vehicle.

These and other advantages make contact-free inductive battery charging technology an attractive alternative to conventional cable systems.

In ihrem Energiekonzept formuliert die Bundesregierung das Ziel, Deutschland zu einem Leitmarkt für Elektromobilität zu entwickeln. Vorteile eines hohen Marktanteils von Elektrofahrzeugen (Ekfz) sind die potentielle Senkung von Treibhausgasemissionen bei Speisung durch erneuerbare Energien. Des Weiteren können die Energiespeicher der Fahrzeuge für die Kompensierung der zeitlich schwankenden Energieproduktion eingesetzt werden. Hierfür ist jedoch eine hohe Verfügbarkeit der im Markt befindlichen Fahrzeuge im elektrischen Stromnetz notwendig, d.h. der Einsatz der Fahrzeugbatterien zum Ausgleich schwankender Energieproduktion wird sinnvoller, je länger die Fahrzeuge mit dem Netz verbunden sind.

Konventionelle Ladesysteme für Ekfz nutzen Kabel, um das Fahrzeug mit dem Netz zu verbinden. Der Einsatz von Kabeln führt jedoch zu einigen Nachteilen, wie zum Beispiel einer erhöhten Vandalismusgefahr und zusätzlichem unkomfortablem Aufwand für den Fahrer. Mangelnde Sorgfalt bei der Steckverbindung führt zu nicht aufgeladenen Batterien. Lose oder defekte Kabel bedeuten ein erhöhtes Sicherheitsrisiko.

Eine Alternative ist das berührungslose Laden durch induktive Energieübertragung. Diese innovative Technologie gewährleistet einfache, verlässliche und sichere Ladevorgänge und ist damit in der Lage, die Nutzerakzeptanz der Elektromobilität stark zu verbessern. Eine bessere Marktdurchdringung, d.h. mehr Ekfz auf den Straßen und am elektrischen Stromnetz, führt zu einer besseren Kompensierbarkeit der immer schwieriger vorhersahbaren elektrischen Energieversorgung. Durch den Einsatz von induktiven Ladesystemen werden viele Nachteile kabelgebundener Systeme vermie-

den: Der Betrieb ist barrierefrei, d.h. keine Steckvorgänge und keine weiteren manuellen Vorgänge sind notwendig. Des Weiteren ist die Wahrscheinlichkeit von Systembeeinträchtigungen durch Vandalismus stark reduziert, da keine freihängenden Kabel existieren und Aufbauten oberhalb des Asphalts nicht zwangsläufig notwendig sind. Der Einsatz dieser berührungslosen Technologie verspricht außerdem einen geringeren Systemverschleiß im Vergleich zu steckerbehafteten Systemen.

Am Markt sind derzeit noch keine Elektrofahrzeuge mit induktiven Ladesystemen erhältlich, jedoch arbeiten weltweit mehrere Unternehmen und Forschungseinrichtungen an einer erfolgreichen Markteinführung. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Komponenten eines induktiven Ladesystems sowie Beispiele bereits realisierter Systeme.

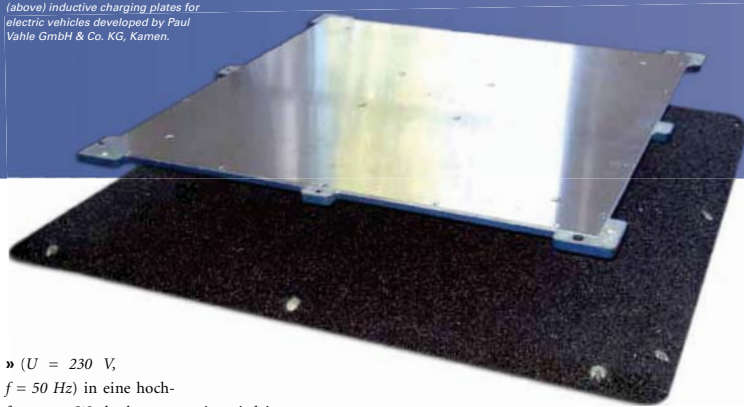
Induktive Ladesysteme für Ekfz bestehen aus einer mobilseitigen Einheit, welche direkt am Fahrzeug montiert ist. Eine übliche Befestigungsposition ist hier der Fahrzeugunterboden. Um den Ladevorgang dann zu starten, muss das Fahrzeug lediglich über einer weiteren, der stationären Einheit positioniert sein. Diese kann zum Beispiel zentral in einer öffentlichen Parkbox, oberhalb oder unterhalb der Bodenoberfläche, angebracht sein.

Die magnetische Kopplung zwischen Netz und Fahrzeug wird durch die stationäre Ladeplatte und die mobile Ladeplatte, auch „Pickup“ genannt, hergestellt. Die stationäre Ladeplatte ist galvanisch mit dem Feldregler, einem Hochfrequenz-Wechselrichter (HF-Wechselrichter) inklusive Feldregelungssystem, verbunden. Dieser wandelt die Netzspannung »

Kabellos aufladen – Induktive Ladestationen für Elektrofahrzeuge

Abb. 1: Stationäre (unten) Ladeplatte und mobile (oben) Ladeplatte des induktiven Ladesystems für Kfz der Paul Vahle GmbH & Co. KG, Kamen.

Fig. 1: Stationary (below) and mobile (above) inductive charging plates for electric vehicles developed by Paul Vahle GmbH & Co. KG, Kamen.



» ($U = 230 \text{ V}$,
 $f = 50 \text{ Hz}$) in eine hochfrequente Wechselspannung im niedrigen dreistelligen kHz-Bereich um. Die mit dieser Spannung gespeiste stationäre Ladeplatte erzeugt somit ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld. Die Platte besteht aus einer flachen Kupferspule mit mehreren Windungen, die in eine stabile Abdeckplatte, z. B. aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK) eingelassen ist. Diese Baugruppe wird passgenau über einer Aluminiumplatte angebracht, welche mit einer flachen weichmagnetischen Ferritschicht versehen ist. Der Aufbau der mobilen Ladeplatte ist prinzipiell gleich. Ein Unterschied kann lediglich in den äußeren Abmessungen, der Windungszahl und eventuell der Spulenteilung bestehen.

Die Abmessungen der ersten Prototypen sind durch die in der entsprechenden VDE-Anwendungsregel (VDE-AR-E-2122-4-2) vorgegebenen Sicherheitsgrenzwerte für das elektromagnetische Feld sehr groß. So kann zum Beispiel die Grundfläche der stationären Ladeplatte bis zu $A \approx 1 \text{ m}^2$ betragen. Diese Größe und insbesondere auch das entsprechende Gewicht stellen eine große Hürde bei der Markteinführung dieses Systems dar. Ein Beispiel für eine stationäre und eine mobile Ladeplatte sind in Abbildung 1 zu sehen. Abbildung 2 zeigt ein über einer oberirdisch aufgebauten stationären Ladeplatte parkendes Fahrzeug. Neben möglichst geringen Kosten und einem hohen Wirkungsgrad sind eine hohe Leistungsdichte bei

gleichzeitiger Einhaltung der Feldgrenzwerte weitere Auslegungskriterien für diese induktiven Komponenten des berührungslosen Ladesystems. Das hochfrequente elektromagnetische Feld der stationären Ladeplatte ist mit den Windungen der mobilseitigen Ladeplatte verketet. Das Übertragungsverhalten entspricht dem eines handelsüblichen Transformators und kann ebenso durch ein T-Ersatzschaltbild technisch beschrieben werden. Um eine ausreichende Wirkleistung auf das Fahrzeug zu übertragen, ist die Kompensierung der Systemreaktanzen erforderlich, die aufgrund der höheren Betriebsfrequenz recht groß sind. Aus diesem Grund ist die Primärwicklung mit Kondensatoren verbunden. Diese können in Reihe oder parallel angeschlossen werden. Eine ähnliche Kompensation befindet sich an der fahrzeugseitigen Wicklung. Der durch die in der Sekundärwicklung induzierte Spannung erregte hochfrequente Strom wird schließlich über einen Gleichrichter mit dem bordeigenen Batterieladegerät verbunden. Die Nennleistung bisheriger Systeme beträgt $PN = 3,3 \text{ kW}$. Diese Leistung soll über einen Luftspalt von bis zu 210 mm übertragen werden können.

Eine große Herausforderung bei der Entwicklung dieser Systeme ist die Auslegung und Fertigung eines

{ Cable-free charge-up – Inductive charging stations for electric vehicles }

verlässlichen Feldreglers. Zurzeit ist der Einsatz der 140-kHz-Technologie in leistungselektronischen Geräten dieser Leistungsklasse nicht üblich. Die Auswahl sinnvoller leistungselektronischer Komponenten, deren fehlerfreies Zusammenspiel und die Sicherstellung der elektromagnetischen Verträglichkeit sind daher Hauptanforderungen der Systementwicklung. In Abbildung 3 (S. 28) ist die gesamte Funktionskette des induktiven Ladesystems dargestellt.

Eine Alternative zu dem Unterbodenladesystem bietet das induktive Laden durch das Kfz-Kennzeichen, das sogenannte Nummernschild. Diese Lademethode unterscheidet sich von dem beschriebenen Unterbodensystem lediglich durch die unterschiedliche Aus-

legung der stationären und der mobilen Ladeplatte. Die mobile Ladeplatte wird in den typischen Abmessungen des Nummernschildes ebenfalls als Flachspule ausgelegt. Angebracht wird diese Ladeplatte direkt hinter dem vorderen Kennzeichen. Das Kennzeichen selbst muss in diesem Fall aus nicht elektrisch und nicht magnetisch leitfähigem Material, z. B. aus einem Kunststoff bestehen.

Die stationäre Ladeplatte weist etwas größere seitliche Abmessungen als ein Kfz-Kennzeichen auf und ist an einer im öffentlichen oder privaten Parkraum fest installierten Ladesäule angebracht. Um den Ladevorgang zu starten, fährt das Fahrzeug mit dem vorderen Kennzeichen direkt an die stationäre Ladeplatte »



Abb. 2: Elektrofahrzeug während des Ladevorgangs auf einer Ladestation der Fa. Vahle. Foto: Paul Vahle GmbH & Co. KG

Fig. 2: Electric vehicle at a Vahle charging station. Photo: Paul Vahle GmbH & Co. KG

Kabellos aufladen – Induktive Ladestationen für Elektrofahrzeuge

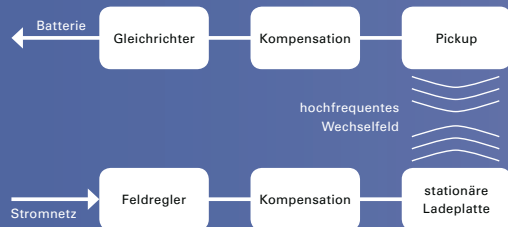


Abb. 3: Funktionskette mit den Komponenten eines induktiven Ladesystems.

Fig. 3: Inductive charging system chain.

» heran, bis beide Platten direkten Kontakt haben. Die stationäre Ladeplatte ist beweglich angebracht und kann in die Ladesäule zurückweichen, wenn durch das Fahrzeug hoher mechanischer Druck ausgeübt wird. Leuchtzeichen auf der Ladesäule, welche sich auf Sichthöhe des Fahrers befinden, zeigen das Erreichen der richtigen Parkposition an. Abbildung 4 zeigt eine Ladesäule mit Fahrzeug während des Ladevorganges.

Ein großer Vorteil dieses Systems – verglichen mit der Unterbodenlösung – sind die wesentlich kleineren Abmessungen der Ladeplatten. Durch den direkten Kontakt beider Platten muss nur eine sehr kurze Übertragungstrecke überwunden werden, weshalb die magnetische Kopplung viel höher ist. Gleichzeitig können während des Ladevorganges keine Fremdkörper oder Personen in den Bereich der Übertragungstrecke gelangen, weshalb hier die Grenzwerte der magnetischen Flussdichte wesentlich höher angesetzt werden können. Dies führt zu kleineren Abmessungen für die gleiche Nennübertragungsleistung. Ein Nachteil ist der kompliziertere Aufbau der stationären Einheit mit mechanisch beweglicher Komponente und Anzeigeinstrumenten. Des Weiteren kann die Ladeplatte der Unterbodenlösung aus allen Richtungen angefahren und verlassen werden, ist also überfahrbar, was für viele potentielle Anwendungsbereiche dieser Ladetechnologie ein großer Vorteil ist.

Aktuelle Systeme deutscher und internationaler Hersteller zeigen, dass induktive Ladestationen für Elektrofahrzeuge grundsätzlich funktionieren. Um eine serienmäßige Einführung dieses Systems in den Kfz-Markt zu ermöglichen, müssen diese Systeme optimiert und erweitert werden. Das Arbeitsgebiet Elek-

tromobilität der Bergischen Universität Wuppertal beschäftigt sich intensiv mit der Weiterentwicklung dieser Systeme mit dem Ziel, den Sprung zur Marktreife zu schaffen.

So muss zum Beispiel gewährleistet sein, dass das über einer im Boden eingelassenen Ladeplatte parkende Fahrzeug korrekt positioniert ist. Kleinere seitliche Abweichungen zwischen stationärer und mobiler Ladeplatte sind zwar möglich, aber größere Abweichungen würden zu einer Verschlechterung des Übertragungsverhaltens führen. Wirkungsgrad und übertragbare Leistung würden sinken. Ein praxistaugliches System muss demnach auch über eine automatische Positionserkennung verfügen. Ein weiterer kritischer Punkt ist die mögliche Minimierung der Ladeplattenabmessungen und damit die Reduzierung des Fahrzeuggewichtes. Um die Ladeplatten wesentlich zu verkleinern, gibt es mehrere Ansätze. So könnte die erlaubte magnetische Flussdichte zwischen den Ladeplatten erhöht werden. Zur Übertragung der notwendigen Leistung wäre dann eine kleinere Plattenfläche ausreichend. Hierbei würden aber die gesetzlichen Grenzwerte für magnetische Felder im öffentlichen Raum verletzt. Eine Lösung wäre eine sicher funktionierende Fremdkörpererkennung: Sobald diese einen Fremdkörper im Übertragungsbereich detektiert, schaltet das System ab. Aber auch bei Einhaltung der Grenzwerte ist eine weitere Minimierung der Ladeplatten in einem gewissen Rahmen möglich. So kann z. B. durch alternative Spulengeometrien oder neue Magnetmaterialien eine weitere Verbesserung erreicht werden.

Weitere Ansätze, die derzeit am Arbeitsgebiet Elektromobilität untersucht werden, betreffen die Erhö-

ung der Nennübertragungsleistung, um in Zukunft auch ein schnelleres Laden der Elektrofahrzeuge an induktiven Ladestationen zu ermöglichen.

Weitere Herausforderungen vor der Markteinführung sind

- die Entwicklung geeigneter Fertigungstechnologien für die Komponenten des induktiven Ladesystems,

- die Festlegung geeigneter Normen zur Gewährleistung des interoperablen Betriebs zwischen Ladestationen und mobilen Einheiten unterschiedlicher Hersteller sowie
- die Eingrenzung der Störeinflüsse (Elektromagnetische Verträglichkeit) des Ladesystems auf andere Bordsysteme.

Es ist davon auszugehen, dass zunächst die hohen Kosten durch den zusätzlichen technischen Aufwand dazu führen werden, dass überwiegend Fahrzeuge des Premiumsegments mit dieser Technologie ausgestattet werden. Diese Markteinführung wird aber zu weiteren Kostensenkungen führen, was nach und nach den Anwendungsbereich des induktiven Ladens vergrößern wird. In absehbarer Zeit bieten induktive Ladestationen für Elektrofahrzeuge somit eine Alternative zu konventionellen konduktiven Ladestationen. Große Vorteile wie Vandalismussicherheit und Barrierefreiheit werden vor allem im öffentlichen Raum den Einsatz dieser Technologie fördern. ©

{ Cable-free charge-up – Inductive charging stations for electric vehicles }

Abb. 4: Elektrofahrzeug an einer Ladesäule der Fa. Vahle.

Fig. 4: Electric vehicle at a Vahle charging stand.

