

Höher integrierter Stromrichter

Kombiniert kabelgebundenes und induktives Laden von Elektrofahrzeugen

Marco Jung, Heike Barth, Martin Braun, Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES), Königstor 59, 34119 Kassel, Germany

Kontakt: marco.jung@iwes.fraunhofer.de, +49(561)7294-112

Kurzfassung

Das wesentliche Ziel des deutschen Energiekonzeptes ist die Reduktion der CO₂-Emissionen. Regenerative Energien und die Elektromobilität spielen dabei eine wegweisende Rolle [1]. Von erneuerbaren Energien geladene Elektrofahrzeuge können signifikant zur Reduktion des CO₂-Ausstoßes beitragen. Hierbei dient die Fahrzeugbatterie als mobiler Speicher. Heutige fahrzeugseitige Ladesysteme sehen nur eine kabelgebundene Ladung vor. Neue Entwicklungen lassen auch eine kontaktlose, induktive Ladung der Fahrzeugbatterie zu. Der hier vorgestellte höher integrierte Stromrichter stellt eine fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur dar, die sowohl 1-phasig und 3-phasig als auch induktiv unter Nutzung der gleichen Leistungselektronik und Drosseln laden kann.

Abstract

The main goal of the German energy concept is the reduction of CO₂-emissions in which regenerative energy and electromobility play a pioneering role. Large emission reductions can be made through the use of electric vehicles charged with renewable energy, where the battery acts as mobile storage unit. Current charging systems only allow for cable based charging. New developments now permit vehicle battery charging via contactless, inductive methods. Using the same power electronics and inductors, a new, higher integrated inverter is capable of both single and three phase charging as well as inductive charging.

1 Einleitung

Elektrofahrzeuge kombiniert mit Erneuerbaren Energien sind die Zukunft für den Personenverkehr. Über diesen Grundsatz sind sich Politik, Industrie und Gesellschaft seit einiger Zeit einig. Nach einer anfänglichen Dominanz von Elektrofahrzeugen um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert, schloss sich eine über 100-jährige Phase an, in der der Straßenverkehr von Autos mit Verbrennungskraftmaschine geprägt war. Motiviert durch Umweltschutzanforderungen und die Ressourcenknappheit von fossilen Brennstoffen erfährt die

Elektromobilität seit einigen Jahren einen starken Vorschub, der auch in den Zielen der „Nationalen Plattform Elektromobilität NPE“ zum Ausdruck kommt. Bis zum Jahr 2020 sollen auf Deutschlands Straßen eine Million Elektroautos rollen. Um die ehrgeizige Marke zu erreichen, sind vorbereitende Maßnahmen erforderlich, sowohl im Bereich der Technologieentwicklung als auch im Hinblick auf die Nutzerakzeptanz.

Im Zuge der zukünftig geplanten NetZRückspeisung (z.B. aus zuvor mit erneuerbaren Energien geladenen Batterien), zur Netzunterstützung bzw. als Zwischenspeicherung wird eine bidirektionale, intelligente und fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur benötigt, welche die zuvor aufgenommene Energie zusätzlich dem öffentlichen Netz wieder zur Verfügung stellen kann. Um die Verfügbarkeit im Netz und die Nutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen in der Bevölkerung zu steigern, wird der Ansatz der induktiven sowie kabelgebundenen Ladung der Fahrzeugbatterie verfolgt. Nach dem derzeitigen Stand der Technik wird die Batterie über entsprechende Ladegeräte vom Niederspannungsnetz kabelgebunden geladen. Die meisten Ladeinfrastrukturen im Fahrzeug können 1-phasig und 3-phasig laden, bieten allerdings keine Möglichkeit kabellose, induktive Ladesysteme effektiv anzukoppeln.

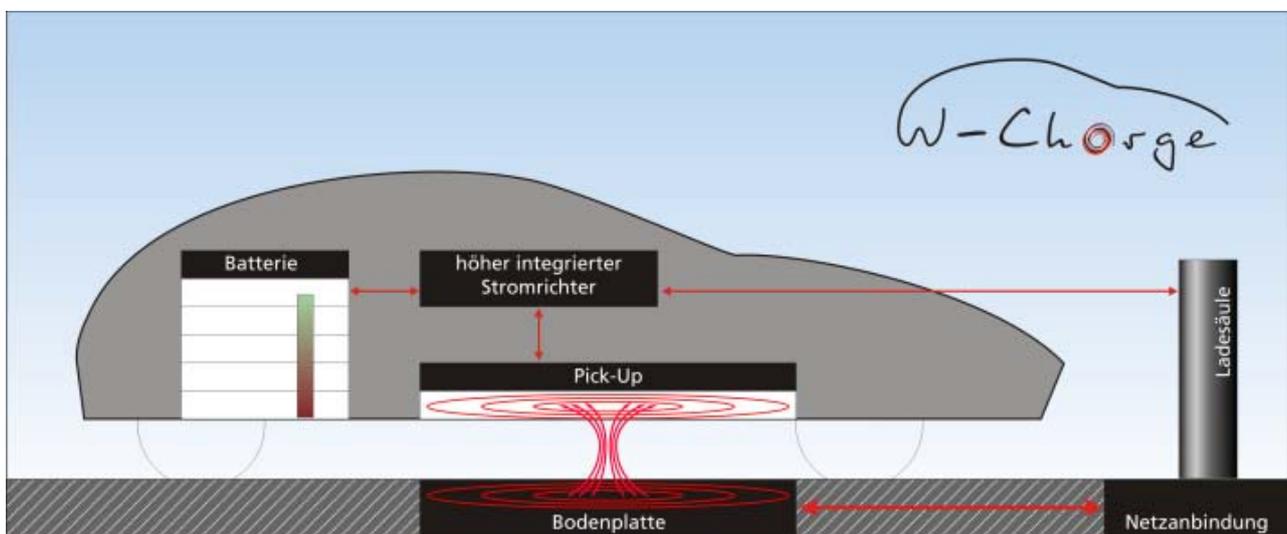


Bild 1 Energieflussdiagramm

Dieser Beitrag beschreibt die im BMU Projekt W-Charge (www.w-charge.de) entwickelte on-Board Ladeinfrastruktur. Darin ist das wesentliche Element ein höher integrierter Stromrichter, der aller bisher separaten Komponenten vereint und durch die Mehrfachnutzung von Baugruppen zu einer Gewichts-, Größen- und Kostenersparnis führt. Gleichzeitig können mit dem hier beschriebenen Ansatz multidirektionale Energieflüsse zwischen der Fahrzeugbatterie, dem 1- oder 3-phasigen Stromnetz sowie einem DC-Netz und einem induktiven Energieübertragungssystem realisiert werden [2].

2 BMU Verbundprojekt W-Charge

Derzeitig verfügbare Ladesysteme für Elektrofahrzeuge konzentrieren sich auf die einfachste Form der Verknüpfung des Fahrzeugs mit dem Netz: das Stromkabel. Allerdings sind mit der kabelgebundenen Netzanbindung auch Nachteile verbunden, denn ein vergessenes Einstecken des Kabels führt zu nicht geladenen

Stromspeichern und herumhängende Kabel können zu Stolperfallen werden. Außerdem bieten Kabelverbindungen im öffentlichen Raum ein einfaches Ziel für Vandalismus und Sabotage.

Eine Alternative dazu ist die kabellose Netzkopplung auf Basis einer induktiven Energieübertragung, welche den genannten Nachteilen entgegenwirkt und eine erhöhte Sicherheit und verbesserten Bedienkomfort als Vorteile aufweist. Diese Vorteile führen zu einer höheren Nutzerakzeptanz und damit zu einer häufigeren und längeren Kopplung mit dem Stromnetz. Dies ermöglicht eine verbesserte Integration ins Energieversorgungsnetz durch mehr Freiheitsgrade für das Speichermanagement.

Daher wurden im Vorhaben W-Charge die Möglichkeiten des kabellosen Ladens von Elektrofahrzeugen intensiv erforscht. Es wurde ein grundlegendes Konzept für das kabellose Laden mit einem Wirkungsgrad $> 90\%$ unter Einhaltung geltender Sicherheitsstandards untersucht. Die entwickelten Komponenten sind in 3 Elektrofahrzeugen als Demonstratoren vollständig integriert worden.

3 Einsatz und Anforderungen

3.1 Motivation

Um garantieren zu können, dass ein Elektrofahrzeug immer und überall geladen werden kann, muss die fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur auch zukünftig weiterhin kabelgebunden laden. Zusätzlich sollte mit den im halböffentlichen und öffentlichen Raum vorrausichtlich existierenden induktiven Ladevorrichtungen Energie in der Fahrzeugbatterie gespeichert werden können. Somit ist eine höhere Integration der Leistungselektronik zur Ladung der Batterie unumgänglich.

Diese Maßnahme reduziert zusätzliches Gewicht, womit die Reichweite des Fahrzeugs erhöht werden kann. Außerdem kann der begrenzte Bauraum durch weitere Integrierung der Leistungselektronik z.B. für die Batterie genutzt werden. Der größte Vorteil der neuen fahrzeugseitigen Ladeinfrastruktur ist die Kostenreduktion. Weniger Komponenten bedeuten auch gleichzeitig weniger Ausgaben an Materialien.

Bild 1 zeigt die wesentlichen Energieflüsse zwischen Batterie und dem öffentlichem Niederspannungsnetz. Kernkomponente ist dabei der höher integrierte Stromrichter. Der Energiefluss ist bei allen Baugruppen bidirektional, um somit Elektrofahrzeuge in Smart Grids, Back-Up-Systemen oder in Vehicle to Grid Konzepten usw. integrieren zu können. Der kabelgebundene Netzanschluss muss mit einem 1-phasigen Anschluss (Schuko-Steckdose), 3-phasigen AC-Netz (mindestens $3 \times 16A$, z.B. Garage oder Ladesäule) bzw. einem DC-Netz verbunden werden können. Zusätzlich muss der Stromrichter die Ankopplung eines induktiven Energieübertragungssystems gewährleisten.

3.2 Konzept einer induktiven Energieübertragung zur Ladung einer Fahrzeugbatterie

Eine alternative zum konventionellen Laden ist die kontaktlose induktive Energieübertragung (siehe Bild 2).

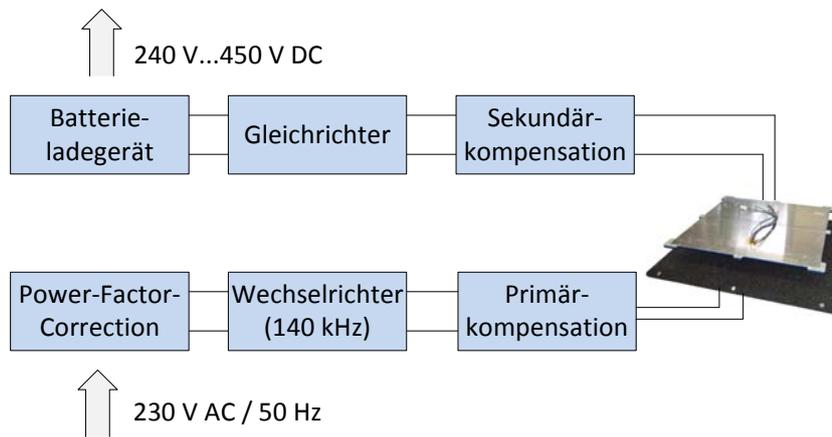


Bild 2 Konzept induktive Energieübertragung zur Ladung einer Batterie [3]

Im Projekt W-Charge wurde ein Übertragungssystem entwickelt und in Fahrzeugen integriert. Es besteht aus einer im Fahrzeugunterboden befestigten on-Board Einheit und einer stationären Einheit auf der Straße. Diese beiden Komponenten stellen die Primär- bzw. Sekundärseite des induktiven Energieübertragungssystems dar, die über Magnetfelder miteinander verkoppelt sind (Transformatorprinzip). Die stationäre Einheit (der „Sender“) besteht aus den Primärwicklungen und der Primärkompensation, welche direkt mit einem Stromrichter verbunden sind, der die gleichgerichtete Netzspannung in eine höher frequente Wechselspannung ($f = 140\text{kHz}$) wandelt. Das daraus resultierende hochfrequente elektromagnetische Feld ist mit dem Empfänger, dem Pick-Up, gekoppelt. Dieser besteht aus der Sekundärwicklung, einer Kompensationseinheit und einem Gleichrichter. Die bereitgestellte Energie kann somit über ein Batterieladegerät der Batterie zur Verfügung gestellt werden.

3.3 Derzeitige fahrzeugseitige Ladeinfrastrukturen

Aktuell sind die meisten Elektrofahrzeuge mit einer 1-phasigen Ladeelektronik ausgestattet. Weitere Entwicklungen und Forschungen bezüglich einer höheren Netzintegration und autarken Stromversorgung ermöglichen zukünftig eine Rückspeisung ins öffentliche Niederspannungsnetz bzw. haben eine Inselnetzbildung möglich gemacht (Bild 3 1.) [4].

Für eine höhere Ladeleistung und der damit verbundenen Verkürzung der Ladezeit wird eine 3-phasige Ladung der Fahrzeugbatterie herangezogen (Bild 3 2.) [5]. Hierbei stehen mehrere technische Lösungen zur Diskussion. Zu nennen sind z.B. die Verwendung des Antriebsstromrichters, die Verwendung dreier 1-phasiger Ladegeräte und die Verwendung eines einzelnen 3-phasigen Ladegerätes [4-7]. Diese Lösungen können auch entsprechend rückspeisefähig ausgeführt sein [4][8].

Die Idee zur Schnellladung mit der die Fahrzeugbatterie in wenigen Minuten geladen werden kann, ist ein wesentlicher Faktor bei der Nutzerakzeptanz. Viele Konzepte werden derzeit kontrovers diskutiert. Vereinzelt werden Schnellladestationen favorisiert, bei denen die Ladeelektronik teilweise bzw. ganz außerhalb des Fahrzeuges liegen sollte [9].

All diese Ladekonzepte bieten allerdings keine effektive Ankopplungsmöglichkeit von induktiven Energieübertragungssystemen. Derzeit wird ein induktives Energieübertragungssystem z.B. nur über einen weiteren DC/DC-Wandler parallel zur Batterie oder parallel zu einem DC-Bussystem angekoppelt (siehe Bild 3 3.) [3].

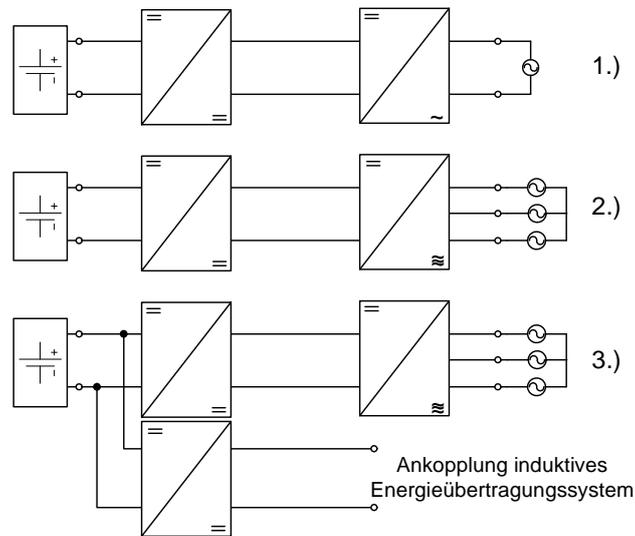


Bild 3 On-Board Ladetopologien für Elektrofahrzeuge 1.) 1-phasig 2.) 3-phasig 3.) 3-phasig + induktiv

3.4 Elektrische Anforderungen bzw. Herausforderungen

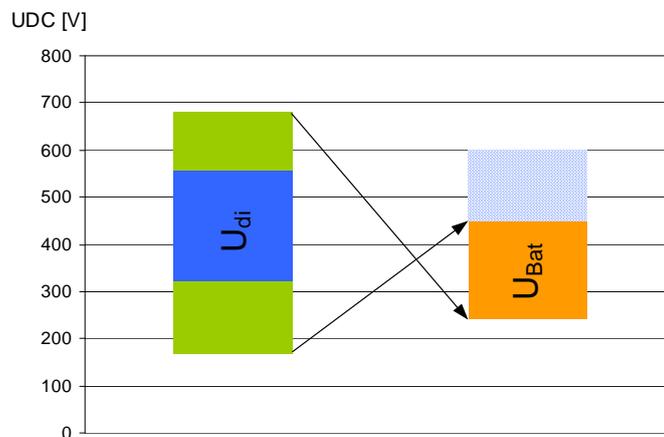


Bild 4 Vergleich ungesteuert gleichgerichtete AC-Netzspannungen mit Batterieklemmspannungen

Eine vollständige Integration der Ladeelektronik ins Fahrzeug würde heißen, dass man als Schnittstelle den Netzanschluss des Niederspannungsnetzes mit den in Europa typischen Spannungswerten 1~230 V / 50 Hz wählen würde [10]. Die weltweit zur Anwendung kommenden 1-phasigen und 3-phasigen Netzspannungen liegen zwischen 1~100 V und 1~240 V sowie zwischen 3~120 V und 3~440 V bzw. 480 V [4][11].

Bild 4 beschreibt die Problematik zwischen einer passiven Gleichrichtung der AC-Spannungen mit dem Klemmspannungsbereich bei Hochvolt-Batterien (orange und blau schattiert). Blau eingefärbt ist der Span-

nungsbereich von 1-phasig und 3-phasig gleichgerichteten Spannungen in Europa. Grün beschreibt die Überlappung in den USA und Japan. Somit muss die fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur nicht nur den kompletten netzseitigen Eingangsspannungsbereich sowie Frequenz abdecken können, sondern vielmehr die daraus resultierenden Eingangsströme, die Zwischenkreisspannung, die Klemmspannung der Batterie und den Ladestrom. Dies hat Auswirkungen auf die Spannungsfestigkeit und Stromtragfähigkeit der Halbleiter sowie der Drosseln.

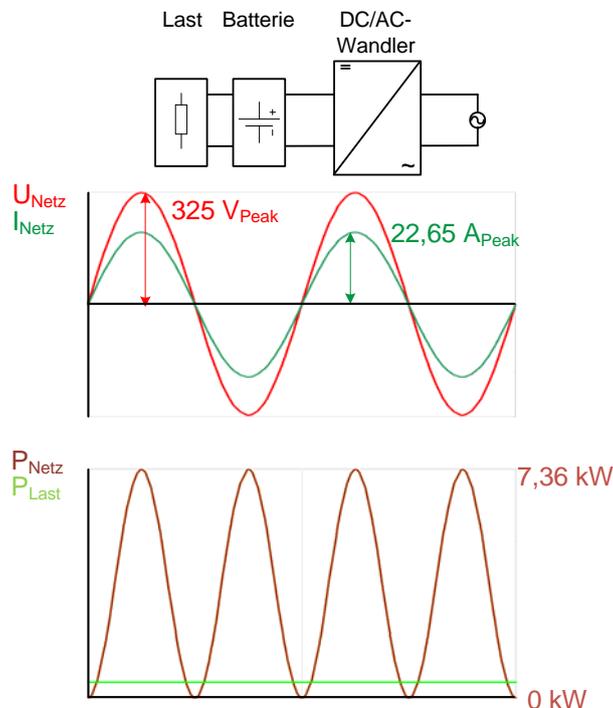


Bild 5 Netzseitiger Strom-, Spannungs- und Leistungsverlauf bei 1-phasiger Ladung

Als weitere Herausforderung ist bei einer 1-phasigen Ladung der Fahrzeugbatterie der momentane Netzleistungsverlauf bei gleichzeitiger Belastung der Fahrzeugbatterie von z.B. der Wasserkühlung zu sehen. Dies beschreibt Bild 5. Die momentane Netzleistung variiert bei einer mittleren Leistung von 3,6 kW zwischen 0 kW und 7,3 kW. Um entsprechend große Zwischenkreiskapazitäten zur Pufferung der nötigen Ladeenergie einzusparen, muss ein DC/DC-Wandler in Serie des AC/DC-Wandlers geschaltet werden, der einen entsprechend konstanten Ladestrom der Batterie zur Verfügung stellen kann (Bild 3 1.)). Somit wird einer Entladung der Batterie mit doppelter Netzfrequenz bei kleinerer momentaner Netzleistung als der Lastleistung entgegengewirkt (vgl. Bild 5 unten) [4]. Der AC/DC-Wandler wirkt zusätzlich als PFC (Power-Factor-Correction), um die Netzanschlussbedingungen einhalten zu können. Durch diese beiden Komponenten können Hochvoltbatterien mit unterschiedlichen Klemmspannungen geladen werden.

Diese Problematik tritt bei einer 3-phasigen Ladung nicht auf (Bild 3 2.)). Das Netz stellt dauerhaft eine konstante Leistung zur Verfügung. Hierbei wird der in Serie geschaltete DC/DC-Wandler zur Anpassung des Ladestromes bei entsprechender Batterieklemmspannung verwendet, da die passiv gleichgerichtete Spannung im europäischen Niederspannungsnetz ca. 560V DC beträgt.

Die Ausgangsspannung des Pick-Up ist nicht konstant. Diese ist abhängig von der abgenommenen Leistung, der Windungszahl der Spule und des Kopplungsfaktors zwischen der Bodenplatte und des Pick-Ups. Der Kopplungsfaktor wiederum ist abhängig von der räumlichen Position des Pick-Ups zur Bodenplatte und des Mediums im Luftspalt. Somit wird eine Ladeelektronik im Fahrzeug benötigt, die einen entsprechenden Ausgleich und den entsprechenden Ladestrom und –spannung zur Verfügung stellen kann. Für eine Rückspeisung sollte diese bidirektional arbeiten können (siehe Bild 3 3.) und Bild 2).

4 Höher integrierter Stromrichter

Der höher integrierte Stromrichter ermöglicht durch Verwendung der gleichen Leistungselektronik und Drosseln eine Ladung der Fahrzeugbatterie 1-phasig, 3-phasig, DC und induktiv. Außerdem kann eine Rückspeisung kabelgebunden und induktiv erfolgen.

Es gibt zwei wesentliche Möglichkeiten, nach denen die gleiche Leistungselektronik und deren Induktivitäten für die verschiedenen Energieflüsse verwendet werden können. Zum einen die Leistungselektronik des Antriebsumrichters und zum anderen eine zusätzliche Leistungselektronik (Ersatz für ein on-Board Ladegerät). Bei einer Verwendung der Antriebsleistungselektronik kann entweder der Antriebsbetrieb oder der Ladebetrieb eingenommen bzw. eine Rückspeisung vorgenommen werden. Die Halbleiter sind zumeist für den optimalen Antriebsbetrieb bzw. der Rekuperation und der damit in Verbindung stehenden Ströme und Spannungen ausgelegt. Somit müsste der Stromrichter in vielen Fällen überdimensioniert werden, da bei einem Netzanschluss zumeist eine höhere Spannungsfestigkeit bei verhältnismäßig kleineren Strömen notwendig ist. Eine zusätzliche Komponente würde zu einer Verbesserung des Wirkungsgrades führen, da nun die Leistungselektronik und die Drosseln optimal für die bidirektionalen Wandlungen DC/DC und DC/AC sowie den entsprechenden Leistungen ausgelegt werden können. Bei einer möglichen Weiterentwicklung des stationären induktiven Ladens auf Parkplätzen hin zu dynamischen Ladesystemen ist eine zusätzliche Komponente ohnehin neben der Antriebsleistungselektronik notwendig, um eine zukünftige dynamische Ladung während der Fahrt durchführen zu können.

4.1 Konzept des höher integrierten Stromrichters

Die wesentlichen Merkmale des höher integrierten Stromrichters sind der DC/DC-Wandler und der DC/AC-Wandler bzw. DC/DC-Wandler sowie eine Umschalt-einheit KS (siehe Bild 6). Daher kann zum einen die Batterie mit der Energie direkt über Kabel vom Niederspannungsnetz versorgt werden und zum anderen kann die übertragene Energie von dem induktiven Energieübertragungssystem verwendet werden. Die Betriebsführung entscheidet welche Quelle zur Anwendung kommt. Durch die Bidirektionalität des DC/DC-Wandlers und des DC/AC-Wandlers bzw. des DC/DC-Wandlers kann über das Kabel sowie über das induktive Energieübertragungssystem eine Rückspeisung ins Niederspannungsnetz erfolgen. Somit wäre die Verfügbarkeit und Nutzbarkeit mobiler Speicher im Verbundnetz erhöht. Eine Energieübertragung könnte direkt von „intelligenten Netzen“ ohne Eingriff der Benutzer angefordert oder beendet werden. Hierfür ist ein überlagertes Fahrzeugmanagement notwendig, welches die entsprechende Kommunikation kabelgebunden als auch kabellos mit dem Niederspannungsnetz betreibt.

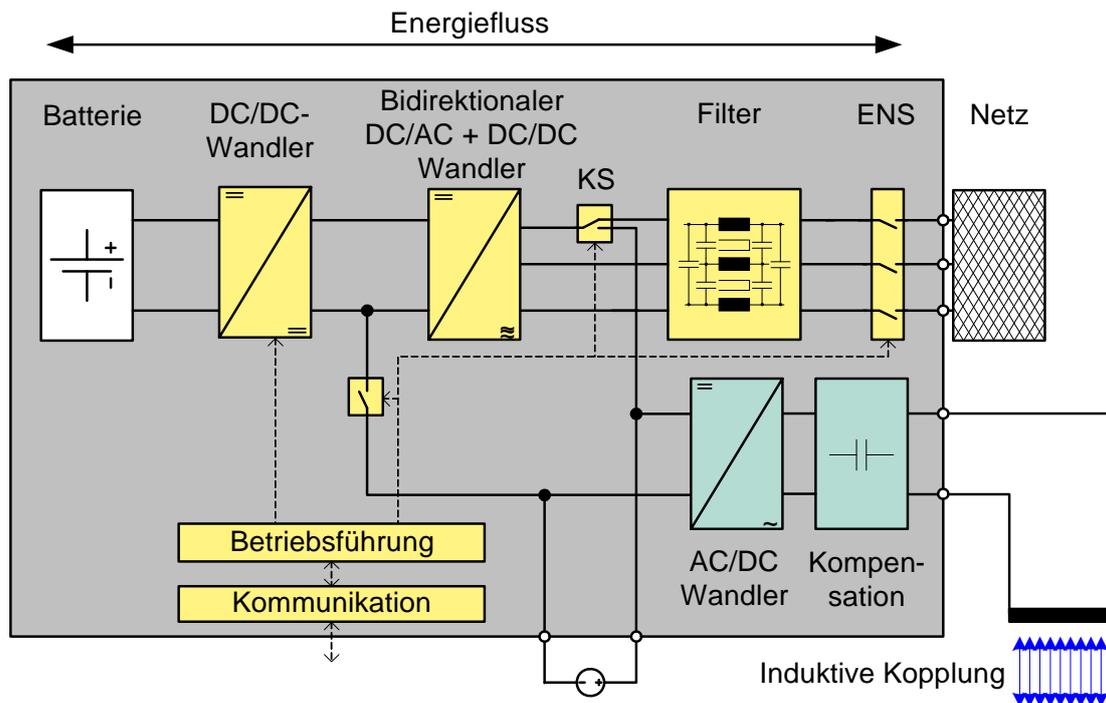


Bild 6 Höher integrierter Stromrichter (gelb eingefärbt)

4.2 Die Topologie

Bild 7 zeigt die Hardwaretopologie des fahrzeugseitigen höher integrierten Stromrichters. Blau umrandet zeigt den DC/DC-Wandler der je nach Energieflussrichtung als Hoch- bzw. als Tiefsetzsteller wirkt. Rot ist der DC/AC-Wandler bzw. der zweite DC/DC-Wandler. Durch die Schalterstellungen von KS_1 und KS_2 wirken die Drosseln entweder gemeinsam mit den Netzkondensatoren als Sinusfilter oder als Glättungsinduktivitäten für den DC/DC-Wandler mit entsprechend vorgeschalteter Kapazität.

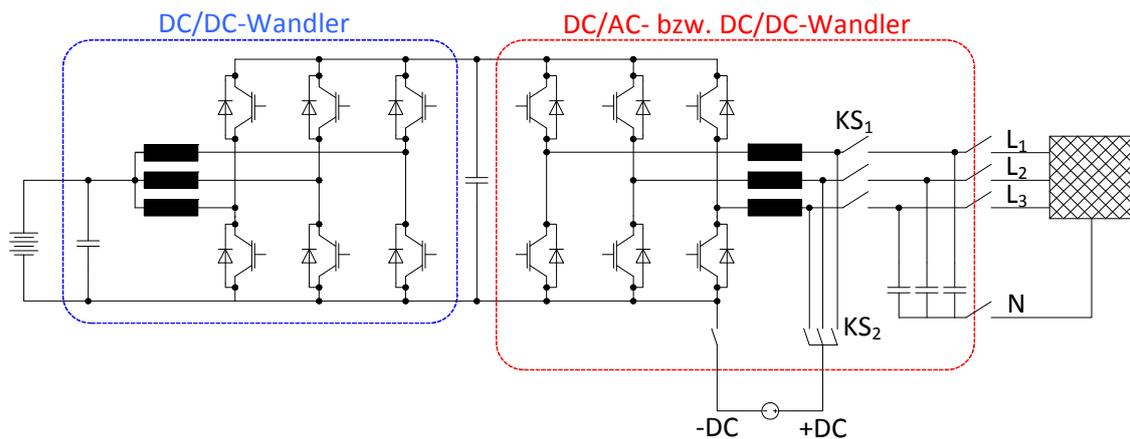


Bild 7 Topologie des höher integrierten Stromrichters

Die Umschalteneinheit ermöglicht eine direkte Verbindung zwischen dem Minuspol der Batterie und dem negativen Pol des induktiven Energieübertragungssystems. Somit wirken die Leistungshalbleiter und die Drosseln

je nach Energieflussrichtung als Hoch- bzw. Tiefsetzsteller. Durch die Umschalteneinheit wird eine gleich große DC-Ladeleistung, also induktive Ladeleistung, erzielt wie bei einer 3-phasigen AC-Ladung, was bei einem DC-Quellenanschluss z.B. an L_1 und L_2 nicht erreichbar wäre.

Des Weiteren bietet die Topologie die Möglichkeit ein 1-phasiges Netz zur Ladung zu verwenden. Hierbei werden der Phasenanschluss und der N-Leiter des Netzes jeweils mit einem der drei Phasenanschlüsse L_1 - L_3 des Stromrichters verbunden. Nun wirken zwei der drei Halbbrücken gemeinsam mit den Drosseln als aktiver Gleichrichter und versorgen somit den Zwischenkreis mit Energie.

Der DC/DC-Wandler ist als 3-phasiger Steller ausgelegt. Je nach Höhe des Ladestromes wird eine weitere Phase hinzugeschaltet, um somit den Wirkungsgrad zu erhöhen.

Auf der Gleichstromseite sorgen die Drosseln und der Ausgangskondensator für Glättung von Strom und Spannung. Des Weiteren stellt ein netzseitiger Filter die Dämpfung leitungsgebundener EMV-Einwirkungen sicher. Gleich- und wechselstromseitig sorgen entsprechende elektromagnetische Schalter für die sichere Zu- und Abschaltung des Stromrichters über den gesamten Leistungsbereich.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die im Projekt W-Charge entwickelte fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur ermöglicht eine 1-phasige, 3-phasige und DC- bzw. induktive Ladung der Fahrzeugbatterie. Zusätzlich kann die Energie konform 3-phasig als auch induktiv ins Niederspannungsnetz zurückgespeist werden. Hierbei werden die gleichen Leistungshalbleiter und Induktivitäten für die unterschiedlichen Energiewandlungen verwendet. Die Betriebsführung entscheidet mittels entsprechenden Regelalgorithmen und einer Umschalteneinheit, welche Quelle zur Ladung der Batterie verwendet werden soll. Diese Maßnahme verringert den Platzbedarf, das Gewicht und die Kosten.

Zukünftig soll eine Ankopplung an ein „Split-Phase“ System ermöglicht werden. Außerdem soll ein 1-phasiges Inselnetz durch den höher integrierten Stromrichter bereitgestellt werden können.

6 Danksagung

Dieser Beitrag basiert auf Ergebnissen des Verbundprojektes W-Charge „Kabelloses Laden von Elektrofahrzeugen“ (FK: 16EM0041). Die Autoren danken dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit für die Förderung des Projektes und dem Projektträger VDI/VDE Innovation + Technik GmbH für die Unterstützung während der Laufzeit. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

7 Literatur

- [1] Bundesregierung: Energiekonzept der Bundesregierung, Langfristige Strategie für künftige Energieversorgung, 2010
- [2] Internetseite des Projektes W-Charge: Kabelloses Laden von Elektrofahrzeugen, www.w-charge.de, 24.08.2011
- [3] Barth, H.; Jung, M.; Braun, M.; Schmülling, B.; Reker, U.; Elias, B.: Concept Evaluation of an Inductive Charging System for Electric Vehicles. München: OTTI 3. European Conference, SmartGrids and E-Mobility, 2011
- [4] Zeltner, S.: Actual and Advanced Converter Technologies for On-Bord Chargers. Valencia: ECPE-Workshop, „Power Electronics for Charging Vehicles“, 2011
- [5] Reichert, S.: Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge. Ulm: FVEE Workshop, „Elektrochemische Speicher und Elektromobilität“, 2010
- [6] Nielsen, H. R.: US Patent Application Publication US 2010/0156353A1. Cambridge: 2010
- [7] Anwar, M.; Mese, E.: Leistungsverarbeitungssysteme und –verfahren zur Verwendung in Steckdosen-Elektrofahrzeugen. München: Deutsches Patentamt , Offenlegungsschrift DE102009033955A1, 2009
- [8] Internetseite e-mobility-21.de: Fraunhofer ISE entwickelt neues Schnelladegerät für E-Autos, www.e-mobility-21.de, 23.08.2011
- [9] Magraner, J. M.: Ultra-Fast DC Charging Stations. Valencia: ECPE-Workshop, „Power Electronics for Charging Vehicles“, 2011
- [10] Zacharias, P.; Brabetz, L.: Stromrichter für Elektrofahrzeuge. Kassel: 15. Kasseler Symposium, Energie-Systemtechnik, 2010
- [11] Internetseite kropla.com: Global Electric & Phone Directory, <http://kropla.com/electric2.htm>, 24.08.2011