

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

## **Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen**

im Rahmen des FuE-Programms  
**"Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität"**

Oktober 2011

Kurztitel: W-Charge

Gefördert durch das:

Projektpartner: Audi Electronics Venture GmbH, Gaimersheim  
Fraunhofer IWES, Kassel  
Paul Vahle GmbH & Co. KG, Kamen  
Volkswagen AG, Wolfsburg



Projektlaufzeit: 01.01.2010 – 30.09.2011



**FuE-Programm "Förderung von Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität" des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)**

**Gemeinsamer Abschlussbericht**

Vorhabenbezeichnung: Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge



Laufzeit des Vorhabens:

vom: 01.01.2010

bis: 30.09.2011

Zuwendungsempfänger:  
*(Auflistung aller Verbundpartner)*

Audi Electronics Venture GmbH  
Sachsstr. 18, 85080 Gaimersheim  
*Dr.-Ing. Björn Elias (Projektleiter)*

Fraunhofer IWES  
Königstor 59, 34119 Kassel (FuE)  
*Prof. Dr.-Ing. Martin Braun (Projektleiter)*

Paul Vahle GmbH & Co. KG  
Westicker Strasse 52, 59174 Kamen  
*Dipl.-Ing. Ulrich Reker (Projektleiter)*

Volkswagen AG  
Brieffach 1778, 38436 Wolfsburg  
*Dipl.-Ing. Elisabeth Schulze (Projektleiter)*

Förderkennzeichen:  
*(FKZ's entsprechend der links angegebenen Verbundpartner)*

16 EM 0044



**Audi**  
Electronics Venture GmbH

16 EM 0041



16 EM 0042



16 EM 0043



Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

## Autorenliste

Heike Barth	Fraunhofer IWES
Martin Braun	Fraunhofer IWES
Marco Jung	Fraunhofer IWES
Björn Elias	Audi Electronics Venture
Reinhard Peer	Audi Electronics Venture
Ulrich Reker	Paul Vahle GmbH
Benedikt Schmülling	Paul Vahle GmbH
Faical Turki	Paul Vahle GmbH
Elisabeth Schulze	Volkswagen AG

Das Projektvorhaben wurde gefördert durch das BMU aufgrund eines Beschlusses des deutschen Bundestags.  
Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Kassel, den 27. Oktober 2011

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b><i>Executive Summary</i></b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b><i>Zielstellung des Verbundprojektes</i></b>	<b>5</b>
2.1	Gesamtziel	5
2.2	Aufgaben der einzelnen Partner	6
<b>3</b>	<b><i>Ergebnisse</i></b>	<b>9</b>
3.1	Projektkoordination	9
3.2	Entwicklung der induktiven Ladeinfrastruktur	10
3.2.1	Fahrzeug- und netzseitige induktive Ladeinfrastruktur (Vahle)	10
3.2.2	Höher integrierter Fahrzeugstromrichter (IWES)	19
3.2.3	Teststand (IWES)	24
3.3	Integration in ein rein batterieelektrisches Fahrzeug (AEV)	26
3.3.1	Audi Demonstrator	26
3.3.2	Mechanische Integration	27
3.3.3	Elektrische Integration	28
3.3.4	Kommunikationsanbindung	29
3.3.5	Enparkstudien	30
3.3.6	Inbetriebnahme und Test des Demonstrators	36
3.4	Integration in ein PlugIn-Hybridfahrzeug (Volkswagen)	41
3.4.1	Mechanische Integration	41
3.4.2	Elektrische Integration	44
3.4.3	Kommunikationsanbindung	45
3.4.4	Inbetriebnahme und Test des Demonstrators	46
3.5	Systembewertung (IWES)	49
3.6	Zusammenfassung	55
<b>4</b>	<b><i>Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan</i></b>	<b>57</b>
<b>5</b>	<b><i>Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik</i></b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b><i>Zukunftsaussichten und weiterer F&amp;E-Bedarf</i></b>	<b>61</b>
6.1	Verwertbarkeit und Nutzen	61
6.2	Weiterer F&E-Bedarf	62
<b>7</b>	<b><i>Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)</i></b>	<b>64</b>
<b>8</b>	<b><i>Veröffentlichungen</i></b>	<b>65</b>
<b>9</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b>	<b>67</b>

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

## 1 Executive Summary

Zur Steigerung der Kundenakzeptanz von Elektrofahrzeugen spielen der Komfort und die Anwenderfreundlichkeit eine entscheidende Rolle. Das Ziel des kabellosen Ladens von Elektrofahrzeugen ist daher die Gestaltung eines einfachen, zuverlässigen und idealerweise automatisierten Ladevorgangs. Dies kann die Kundenakzeptanz erheblich erhöhen und somit dazu beitragen Elektro- und PlugIn-Hybridfahrzeuge verstärkt in den Markt zu bringen.

Im Rahmen des Projekts W-Charge wurden daher die Möglichkeiten der kontaktlosen Ladung von Elektrofahrzeugen auf Grundlage der induktiven Energieübertragung untersucht. Hierzu wurde für den ersten Entwicklungsschritt eine Übertragungsleistung von 3 kW, vergleichbar mit dem Laden an einer haushaltsüblichen Steckdose, angestrebt. Zwei Demonstratorfahrzeuge, ein rein batterieelektrisches Fahrzeug (BEV) von Audi sowie ein PlugIn-Hybridfahrzeug von Volkswagen, wurden mit dem im Vorhaben entwickelten kontaktlosen Energieübertragungssystem ausgestattet. Die Funktionalität des Systems konnte in beiden Fahrzeugen gezeigt werden. Allerdings erwies sich die Integration in das PlugIn-Hybridfahrzeug auf Grund der strengeren thermischen und mechanischen Randbedingungen als deutlich anspruchsvoller.

Das kontaktlose Laden stellt zudem neue Anforderungen an die fahrzeugseitigen Ladegeräte, um ein flexibles Laden mit verschiedenen Technologien zu gewährleisten. Das im Projekt W-Charge entwickelte Labormuster für die fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur ermöglicht eine kabelgebundene 1-phasige und 3-phasige Ladung sowie eine Ankopplung an eine induktive Übertragungsstrecke zur Ladung der Fahrzeugbatterie. Zusätzlich kann die Energie konform 3-phasig ins Niederspannungsnetz zurückgespeist werden.

Zusätzlich konnten innerhalb des Vorhabens W-Charge Messverfahren erarbeitet und eingesetzt sowie ein Teststand aufgebaut werden, so dass eine Performance-Analyse und eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme möglich ist. Ebenso wurden Studien zum Enparkvorgang durchgeführt, deren Ergebnisse Anforderungen an Übertragungssysteme und notwendige, zukünftige Entwicklungsschwerpunkte aufzeigen. Auf Grundlage der Erkenntnisse aus dem Projekt W-Charge konnten notwendige Entwicklungsschritte hin zu einer Markteinführung abgeleitet werden. Interoperabilität und Systemsicherheit sind hierbei wichtige Aspekte.

Parallel zu den vorhabensspezifischen Arbeiten waren verschiedene Projektpartner im DKE-GAK 353.0.1 „Berührungsloses Laden von Elektrofahrzeugen“ aktiv und haben die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse dort einfließen lassen. Im Gegenzug wurde die Auslegung des Systems in Anlehnung an die im Arbeitskreis erarbeitete Anwendungsregel [VDE-AR-2011] durchgeführt. Auch zukünftig wird eine Arbeit in und Kommunikation mit Normungsgremien auf nationaler wie auch internationaler Ebene als sehr wichtig erachtet, um die Sicherstellung einer einheitlichen und interoperablen Schnittstelle zu gewährleisten.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

## 2 Zielstellung des Verbundprojektes

### 2.1 Gesamtziel

Elektrofahrzeuge kombiniert mit Erneuerbaren Energien sind die Zukunft für den Personenverkehr. Über diesen Grundsatz sind sich Politik, Industrie und Gesellschaft seit einiger Zeit einig. 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.

Bei der Entwicklung von Ladesystemen wurde sich lange Zeit auf die zunächst einfachste und effizienteste Form der Verknüpfung des Fahrzeugs mit dem Netz konzentriert: das Stromkabel. Allerdings hat die kabelgebundene Netzanbindung auch nicht zu vernachlässigende Nachteile:

- Herumhängende Kabel sind Stolperfallen, welche ein Unfallpotential darstellen
- Vergessenes Einstecken von Kabeln kann zu nicht geladenen Stromspeichern und nicht ausreichender Reichweite für die Weiterfahrt sorgen
- Bei vielen Parkvorgängen muss das Ladekabel an die Ladestation angeschlossen werden und vor der Weiterfahrt entnommen werden (hoher Aufwand für den Nutzer)
- diese Handgriffe zum Ein- und Ausstecken des Kabels werden durch den Nutzer auf ein Minimum reduziert, wodurch die Anbindungshäufigkeit und -dauer an das Stromnetz geringer ausfällt
- Die Kabelverbindungen im öffentlichen Raum bieten ein einfaches Ziel für Vandalismus und Sabotageversuche

Eine Alternative dazu ist die kabellose (bzw. kontaktlose) Netzkopplung auf Basis einer induktiven Energieübertragung, welche den genannten Nachteilen entgegenwirkt. Durch die Gestaltung eines einfachen, zuverlässigen und idealerweise automatisierten Ladevorgangs durch kontaktlose Energieübertragung kann die Kundenakzeptanz erheblich erhöht und maßgeblich zur Markteinführung von Elektro- und Hybridfahrzeugen beigetragen werden.

Innerhalb des Projekts W-Charge wurden daher die Möglichkeiten der kontaktlosen Ladung von Elektrofahrzeugen auf Grundlage der induktiven Energieübertragung untersucht. Hierzu wurde für den ersten Entwicklungsschritt eine Übertragungsleistung von ca. 3 kW angestrebt. Die

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Fahrzeugerprobung wurde mit Elektrofahrzeugen von Volkswagen und AEV als Demonstratoren geplant. Eine besondere Herausforderung lag dabei in der Integration in unterschiedliche Fahrzeugtypen: Ein reines batterieelektrisches Fahrzeug (AEV) sowie ein PlugIn-Hybridfahrzeug (Volkswagen). Neben der Einbindung der Ladeinfrastruktur in die Demonstratoren lag auch die Positionierung von Fahrzeug und Stromabnehmer für den Ladevorgang im Fokus.

Insgesamt wurden in W-Charge die folgenden Ziele gesetzt:

- 1) Erforschung eines Konzepts für eine kabellose Ladeinfrastruktur mit >90% Wirkungsgrad bei Berücksichtigung der geltenden Sicherheitsstandards und [VDE-AR-2011]
- 2) Vollständige Integration der fahrzeugseitigen Ladeinfrastruktur in Elektrofahrzeuge von zwei verschiedenen Fahrzeugherstellern als Demonstratoren, wobei die mechanische, elektrische und kommunikationstechnische Kopplung berücksichtigt wird
- 3) Untersuchung der Leistungsfähigkeit der Demonstratoren
- 4) Bewertung des entwickelten Konzepts im Hinblick auf die anschließend notwendigen Forschungsschritte für eine zukünftige Integration in Serienfahrzeuge

## 2.2 Aufgaben der einzelnen Partner

Im Folgenden werden die Teilziele und Aufgaben der Projektpartner im Vorhaben W-Charge vorgestellt.

### **Audi Electronics Venture**

Der zunächst vermutete naheliegende und größte Vorteil des kontaktlosen Ladens ist die Steigerung des Komforts bei der Benutzung für den Kunden, insbesondere bei regelmäßig erforderlichem Nachladen des Elektrofahrzeugs. Um diese Vermutung zu bestätigen, sind Untersuchungen des tatsächlichen Aufwands und des gefühlten Aufwands notwendig. Dies ist für das kabelgebundene Laden und das Kabelladen durchzuführen und zu vergleichen.

Um ein System für spätere Serienprozesse analysieren und freigeben zu können, ist für einen Fahrzeughersteller das Testen der spezifizierten Eigenschaften essenziell. Aus diesem Grund soll auch die Definition, Analyse und Messung des Wirkungsgrades sowie dessen Darstellung im Vergleich zum kabelgebundenen Laden durchgeführt werden. Sofern neben der Angabe des Wirkungsgrades weitere Parameter existieren, die die Leistungsfähigkeit eines Übertragungssystems beschreiben, so sollen diese ebenso erarbeitet, aufgelistet und detailliert werden.

Die Einbindung von Fahrzeugherstellern in dieses Projekt ist sinnvoll, da zusätzliche Erkenntnisse durch die Integration in einen Demonstrator

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

gewonnen werden können. In den nachfolgenden Abschnitten wird implizit beschrieben, welche Erkenntnisse dabei gewonnen werden konnten.

Im Anschluss wird gezeigt, welche weiteren Aufgabenpakete für zukünftige Projekte im Bereich der kontaktlosen Energieübertragung notwendig erscheinen, um dem Ziel der Markteinführung näher zu kommen.

### **Fraunhofer IWES**

Das Fraunhofer IWES übernahm im Projekt die Rolle der Projektkoordination und verfolgte die zwei wesentlichen Teilziele:

*Teilziel 1: Erkenntnis über die Potenziale der gerätetechnischen Integration von kabelloser und kabelgebundener Ankopplung des Fahrzeugs an das Netz*

Das Ziel für kommende Generationen von Batterieladegeräten in Elektrofahrzeugen sollte sein, dass sie sowohl kabelgebunden als auch kabellos gespeist werden können. Wird für jede Anwendung ein eigener Stromrichter eingesetzt, wird dies insbesondere bei hohen Ladeleistungen zu unverhältnismäßig großen und teuren Lösungen führen.

Aufbauend auf dem Konzept von Vahle sollte das IWES Lösungsansätze untersuchen, mit denen es möglich ist, die fahrzeugseitige Leistungselektronik, die die Energie des Pick-ups aufnimmt und im Falle der Rückspeisung Energie aus der Batterie an den Pick-up abgibt, durch geeignete Zusatzkomponenten auch für die kabelgebundene Netzkopplung nutzbar zu machen. Ziel dieser Untersuchungen war es, die Potenziale der logischen zukünftigen Schritte für eine Integration in Seriefahrzeuge und der universellen Verwendbarkeit aufzeigen. Die Machbarkeit wurde mit Hilfe eines entsprechenden Labormusters demonstriert.

*Teilziel 2: Aufbau eines Teststandes für die induktive Kopplung und Evaluation der entwickelten Labormuster und Prototypen*

Parallel zu den Untersuchungen im Bereich der gerätetechnischen Integration wurde in der Versuchshalle des Instituts ein Teststand für die induktive Ladetechnik aufgebaut. Mit Hilfe dieses Teststands kann eine Evaluation der induktiven Übertragungsstrecke sowie des höher integrierten Labormusters im Vergleich zum kabelgebundenen Laden stattfinden.

### **Paul Vahle GmbH**

Vahle ist zuständig für die magnetische Übertragungsstrecke und stellt sicher, dass die vereinbarte Leistung von dem stationären Teil zum Fahrzeug übertragen wird. Dazu gehören die Betrachtung der Randbedingungen hinsichtlich Elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) und den Grenzwerten für elektromagnetische Felder sowie die verschiedensten Konstellationen von mobiler und stationärer Ladeplatte.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Die Schnittstellen sind:

- auf der stationären Seite
  - die Anbindung an das Versorgungsnetz
  - die Anbindung an die Kommunikation
  - der mechanische Aufbau auf dem Boden
- auf der Fahrzeugseite (in Zusammenarbeit mit AEV und VW)
  - die elektrische Anbindung an das Ladegerät bzw. Batterie
  - die Anbindung an die Fahrzeugsteuerung zur Positionsermittlung
  - Vorbereitung zur mechanischen Anbindung an das Fahrzeug nach Absprache mit VW und AEV

Bei der netzseitigen Anbindung der Ladestation kann auf grundlegende Konzepte und Aufbauten der derzeitigen induktiven Lösung aufgebaut werden. Während aus leistungselektrischer Sicht die Ladestation lediglich einen normalen Verbraucher darstellt, ist von besonderer Bedeutung die Einbindung der Kommunikation mit dem Fahrzeug. Die bisher vorgesehene leitungsgebundene Kommunikation muss über eine Funkverbindung abgewickelt werden. Dabei sind alle bisher bereits definierten Daten die zur Abrechnung dienen, durchzureichen und um spezifische Informationen der berührungslosen Energieübertragung zu ergänzen. Neben der reinen auf physikalische Größen basierenden Lösung der induktiven Energieübertragung ist vor allem die Einbindung in die fahrzeugseitige Struktur zu lösen. Dies betrifft vor allem

- die funktionale elektrische Einbindung (Zusammenspiel mit dem Ladegerät),
- die Einbindung in das elektrische Sicherheitskonzept
- und die Ermittlung und Absicherung diverser Betriebszustände, die sich aus dem charakteristischen Verhalten der berührungslosen Energieübertragung ergibt.

Gerade auf der Fahrzeugseite ergeben sich im Detail eine Vielzahl an Schnittstellen und Sicherheitsaspekten, die bei ungenügender Beachtung eine ausreichende Kundenzufriedenheit gefährden können und daher sorgfältig gelöst werden müssen.

### **Volkswagen AG**

Für den Erfolg von Plug-In-Hybridfahrzeugen sind nicht nur die Batterie sondern auch die Fahrzeug/Netz-Kopplung und die Kundenakzeptanz von elementarer Bedeutung. Nur wenn es gelingt, Ladesysteme zu entwickeln, die alle Anforderungen sowohl technisch als auch wirtschaftlich erfüllen, als auch eine intelligente Fahrzeug/Netz-Schnittstelle darzustellen, können PlugIn-Hybridfahrzeuge erfolgreich in den Markt eingeführt werden.

Durch die im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführte Integration der Ladesysteme in Versuchsfahrzeuge wurden die technischen Randbedingungen intensiv beleuchtet, die fahrzeugseitig für einen Einsatz kontaktloser Ladesysteme in Serienfahrzeuge zu berücksichtigen sind. Darüber hinaus sollte die Handhabung derartiger Ladesysteme in Form einer feldversuchnahen Testumgebung erprobt werden.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

### 3 Ergebnisse

Innerhalb dieses Abschnitts werden die wichtigsten Ergebnisse des Vorhabens W-Charge vorgestellt. Dies geschieht in Bezug auf den Arbeitsplan und aufgeschlüsselt nach Projektpartnern. Der verantwortliche Verbundpartner ist jeweils aufgeführt.

Nach der Projektkoordination wird auf die von Vahle entwickelte fahrzeug- und netzseitige induktive Ladeinfrastruktur eingegangen. Hier werden die einzelnen Entwicklungsschritte und Ergebnisse erläutert. Anschließend werden der vom Fraunhofer IWES entwickelte höher integrierte Fahrzeugstromrichter sowie der Teststand zur Analyse induktiver Ladesysteme beschrieben. Als nächstes wird auf die Arbeitspakete der Fahrzeugintegration und Inbetriebnahme eingegangen. Hier erfolgt eine Aufschlüsselung nach Integration in ein rein batterieelektrisches Fahrzeug (AEV) sowie in ein PlugIn-Hybridfahrzeug (Volkswagen). Zusätzlich werden die Ergebnisse der von Audi durchgeführten Einparkstudien erläutert. Abschließend werden die Ergebnisse in einer Systembewertung vom Fraunhofer IWES zusammengefasst.

#### 3.1 Projektkoordination

Die vom Fraunhofer IWES durchgeführte Projektkoordination umfasste unter anderem die Koordination der Berichterstattung an den Auftraggeber (Zwischenbericht, Abschlussbericht etc.), die Organisation regelmäßiger Projekttreffen sowie die Sicherstellung des Informationsaustauschs und die Verbreitung der Projektergebnisse.

Für die fortwährende Abstimmung zwischen den Projektpartnern wurden regelmäßige Telefonkonferenzen etwa im zweiwöchentlichen Abstand durchgeführt. Die quartalsweise organisierten Konsortialtreffen fanden entsprechend des Projektstands wechselnd bei den Projektpartnern statt. Nach Bedarf wurden zusätzliche Arbeitstreffen zwischen einzelnen oder allen Verbundpartnern abgehalten, um den gezielten Informationsaustausch zu spezifischen Themen zu gewährleisten.

Die Einrichtung eines für alle Projektpartner zugänglichen Daten-Servers ermöglichte die zentrale Ablage und den Austausch von projektrelevanten Dokumenten. Dieser Server ist nur für autorisierte Personen zugänglich, so dass dort auch vertrauliche Projektinformationen abgelegt werden konnten.

Zur Verbreitung der Ergebnisse und Erkenntnisse wurden zudem verschiedene Veröffentlichungen initiiert und organisiert.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

### **3.2 Entwicklung der induktiven Ladeinfrastruktur**

In diesem Kapitel werden zunächst die Entwicklungsschritte sowie die Ergebnisse der von Vahle entwickelten fahrzeug- und netzseitigen induktiven Ladeinfrastruktur vorgestellt. In einem weiteren Unterkapitel wird das Konzept und die Funktionalitäten des vom Fraunhofer IWES entwickelten höher integrierten Fahrzeugstromrichters dargestellt sowie der Teststand zur Analyse induktiver Ladesysteme beschrieben.

#### **3.2.1 Fahrzeug- und netzseitige induktive Ladeinfrastruktur (Vahle)**

##### **3.2.1.1 Konzeptentwicklung (AP 1)**

In Zusammenarbeit mit den Konsortialpartnern wurde ein Lastenheft angefertigt, in dem die genauen Spezifikationen des zu entwickelnden Systems festgelegt sind. Die Mitarbeit einzelner Konsortialpartner in dem DKE-Arbeitskreis (DKE = Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE) GAK 353.0.1 „Berührungsloses Laden von Elektrofahrzeugen“ führte zu einer Verfeinerung vieler Systemdetails. Die Inhalte des Lastenheftes sind in Abbildung 1 dargestellt.

## Inhalt

<b>1 ORGANISATORISCHES</b> .....	<b>2</b>
1.1 GESCHICHTE DIESES DOKUMENTES .....	2
1.2 LISTE OFFENER PUNKTE.....	3
1.3 ZEITPLAN/ARBEITSPAKETE .....	3
<b>2 ALLGEMEINE KONZEPTIONELLE ÜBERLEGUNGEN</b> .....	<b>3</b>
2.1 BISHERIGER STATUS .....	3
2.2 ZUKÜNFTIGER STATUS.....	4
2.2.1 <i>berührungslose Ladung mit gegebenem Ladegerät</i> .....	4
2.2.2 <i>berührungslose Ladung mit integrierter Ladeelektronik</i> .....	5
2.2.3 <i>Vergleich der Ladekonzepte</i> .....	5
2.2.3.1 <i>Separates Ladegerät</i> .....	5
2.2.3.2 <i>Integriertes Ladegerät</i> .....	6
<b>3 ZENTRALE BEGRIFFSDEFINITION</b> .....	<b>6</b>
<b>4 SPEZIFISCHE ANFORDERUNGEN STATIONÄR</b> .....	<b>7</b>
4.1 ALLGEMEINE KONZEPTIONELLE ANFORDERUNGEN.....	7
4.1.1 <i>Definition Standby</i> .....	7
4.1.2 <i>Fahrzeugerkennung</i> .....	8
4.1.3 <i>Positionsüberwachung</i> .....	8
4.1.4 <i>Aktivierung des Feldes durch Datenkommunikation</i> .....	8
4.1.5 <i>Abschaltung des Feldes nach Ladeschluss</i> .....	8
4.2 ELEKTRISCHE ANFORDERUNGEN.....	8
4.2.1 <i>Allgemeine Angaben</i> .....	8
4.2.2 <i>Elektrische Schnittstellen</i> .....	9
4.2.3 <i>Rückspeisung</i> .....	9
4.2.4 <i>EMV/EMF</i> .....	10
4.3 ALLGEMEINE UMGEBUNGSBEDINGUNGEN .....	10
4.3.1 <i>Stationäre Elektronik</i> .....	10
4.3.2 <i>Umweltbedingungen Ladeplatte (Primärkomponente)</i> .....	11
4.3.3 <i>mechanische Anforderungen</i> .....	11
<b>5 SPEZIFISCHE ANFORDERUNGEN MOBILTEIL</b> .....	<b>12</b>
5.1 SYSTEM/KOMPONENTENBESCHREIBUNG .....	12
5.1.1 <i>Elektrische Randbedingungen Pick-Up</i> .....	12
5.1.2 <i>Elektrische Randbedingungen Regeleinrichtung</i> .....	12
5.1.3 <i>Elektrische Randbedingungen Ladegerät</i> .....	13
5.1.4 <i>Elektrische Schnittstellen</i> .....	13
5.1.5 <i>Elektrische und mechanische Sicherheitsanforderungen</i> .....	14
5.1.6 <i>Mechanische Randbedingungen Pick-Up</i> .....	14
5.1.7 <i>Mechanische Randbedingungen Regeleinrichtung</i> .....	14
5.1.8 <i>Umweltbedingungen mobile Komponenten</i> .....	15
<b>6 REFERENZEN</b> .....	<b>15</b>
6.1 ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	15

Abbildung 1: Inhaltsverzeichnis des W-Charge Lastenhefts zur Ladeinfrastruktur

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Die wichtigsten im Lastenheft festgelegten Randbedingungen für das induktive Ladesystem sind in Tabelle 1 dargestellt.

lfd. Nr.	Name/Beschreibung der Größe	Wert	Anmerkung
(1)	maximale Leistungsaufnahme	3,6 kW	230V/16A
(2)	Eingangstromaufnahme	16A/1PH	
(3)	Max. Flussdichte im Luftspalt	In Anlehnung an [VDE-AR-2011]	
(4)	Eingangsspannung	230V/1PH	
(5)	Primärdurchflutung	In Anlehnung an [VDE-AR-2011]	Zur Einhaltung der vorgegebenen max. Flussdichte
(6)	Primärspannung	lastabhängig	
(7)	EMF	gem. Norm	
(8)	EMV Störemission	EN55011 Funkstörspannung	
(9)	EMV Störfestigkeit	EN61000	
(10)	Wirkungsgrad	In Anlehnung an [VDE-AR-2011]	In Zusammenhang mit Gesamtwirkungsgrad
(11)	Betriebsfrequenz	140 kHz	gemäß [VDE-AR-2011]

Tabelle 1: Darstellung der wichtigsten Spezifikationen des induktiven Ladesystems

### 3.2.1.2 Aufbau der Laborumgebung

Ein separater Laborraum, der von dem übrigen Produktprogramm der Firma Vahle abgetrennt ist und die ausreichende Größe für Versuchsaufbauten bietet, wurde umgebaut und entsprechend ausgerüstet. Labortische in entsprechender Größe zur Aufnahme der stationären und mobilen Ladeplatte wurden aufgestellt.

Im Laufe des Projektes erhielt die Firma Vahle die Möglichkeit, sich räumlich zu erweitern. In folge dessen wurde auch dieser Test- und Versuchsraum mitsamt den Labor- und Arbeitstischen in direkte Nähe der neuen Büros und des Aufbauraums für Elektronik verlegt.

### 3.2.1.3 Entwicklung der Ladeinfrastruktur (AP2)

#### Labormuster

Ein erster Prototyp des induktiven Energieübertragungssystems wurde gefertigt und in dem umgebauten Laborraum aufgestellt. Die Abmessungen von stationärer und mobiler Ladeplatte sind gleich. Länge und Breite betragen jeweils 1000mm bei einer Plattenhöhe von 33mm. Für die mobile Ladeplatte wurde eine Tragevorrichtung gefertigt, mit der schnell unterschiedliche Versuchsabstände eingestellt werden können. Abbildung 2 zeigt beide Ladeplatten in der Laborumgebung.

Die für die Blindleistungskompensation notwendigen Kondensatoren sind direkt in die Ladeplatten integriert. Durch die Kompensation wird die

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Arbeitsfrequenz auf  $f=140$  kHz abgeglichen, was der in oben erwähnter Anwendungsregel festgelegten Nennfrequenz entspricht.

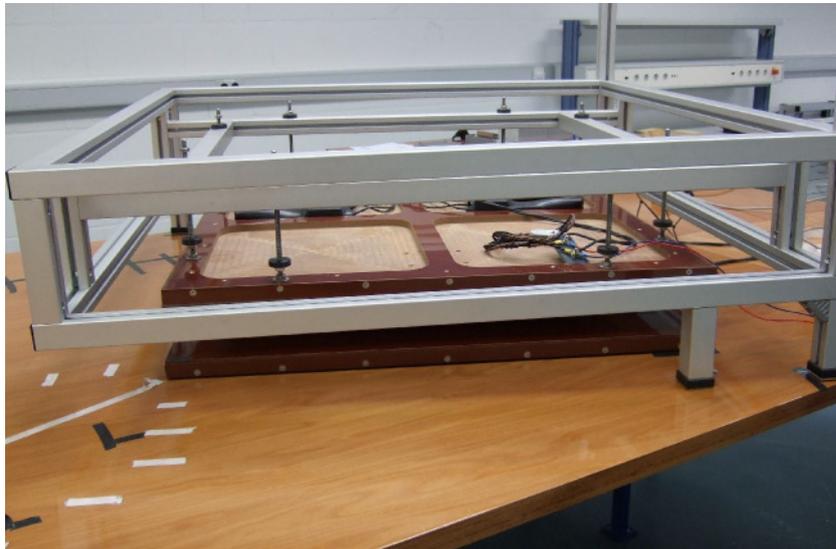


Abbildung 2: Prototyp 1 des induktiven Übertragungssystem

Für eine erste Inbetriebnahme des Systems wurde ein Wechselrichter mit fest eingestellter Frequenz, die der Arbeitsfrequenz entspricht, aufgebaut, der in seiner Funktionsweise stark der Vahle CPS®-Technologie ähnelt. Dieser Wechselrichter, auch Primärinverter genannt, wird unter Einbeziehung eines passiven Anpassnetzwerks (Gyrator) an die stationäre Ladeplatte angeschlossen. Die an den Klemmen der mobilen Ladeplatte induzierte Sekundärspannung wird durch einen Diodengleichrichter in B2-Topologie gleichgerichtet. Die gesamte Wirkungskette des Übertragungssystems wird in Abbildung 3 dargestellt.

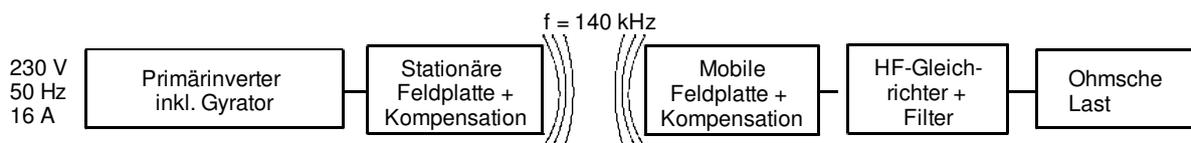


Abbildung 3: Wirkungskette Prototyp 1

Die Inbetriebnahme des Systems mit dem frequenzstabilen Wechselrichter hat gezeigt, dass unter Laborbedingungen auf diese Weise Leistungen von bis zu 3kW übertragen werden können. Die hohe Empfindlichkeit des Systems macht jedoch deutlich, dass zur Anpassung an die ständig schwankenden Randbedingungen ein frequenzvariabler Wechselrichter für einen dauerhaft stabilen Betrieb notwendig ist.

Der Aufbau eines die Frequenz nachführenden Inverters war eine hohe Herausforderung. Es galt, verschiedene sich zum Teil widersprechende Anforderungen und gegensinnige Beeinflussungen in ein stabiles System zu überführen. Hierzu bedurfte es, anders als zu Beginn des Projektes geplant, mehrerer Aufbauten, bis ein stabiles System für 3,3 kW und einem Frequenzbereich von  $140 \text{ kHz} \pm$  Toleranzbereich nach [VDE-AR-2011] stabil und effizient lief. Weiteres Optimierungspotential in der Leistungselektronik

konnte identifiziert werden. Die einzelnen Entwicklungsschritte sind in Abbildung 4 dargestellt.

Da der Inverter die Herzkomponente des Systems darstellt, hatte dessen Realisierung und Funktionsfähigkeit Priorität und Vorrang vor anderen Anforderungen. Dies führte bei den Aufbauten für die Fahrzeuge zu Kompromissen zu Lasten einer höheren Erwärmung von Metallteilen im Luftspalt (s.u. Messergebnisse).



Abbildung 4: Entwicklungsschritte des frequenznachführenden 140kHz-Inverters

Es wurden Untersuchungen an einem induktiven Datenübertragungssystem (DÜ-System) durchgeführt. Für das DÜ-System wurden spezielle Datenübertragungswicklungen in die stationäre und in die mobile Ladeplatte integriert, die nicht durch das elektromagnetische Feld der Leistungsübertragung erregt werden. Erste Messungen zeigten, dass mit diesem System eine ausreichende Übertragungsqualität erzielt werden kann. Dies gilt ebenfalls bei gleichzeitiger Energieübertragung, d.h. bei Überlagerung des Leistung übertragenden Feldes mit dem Feld der Datenübertragung.

### ***Demonstrationsmuster für den Fahrzeugeinsatz***

Zur Ermöglichung der Integration des Systems in die Versuchsträger bei den Firmen Volkswagen und AEV war es notwendig, den magnetisch aktiven Teil des Übertragungssystems, d.h. die stationäre und die mobile Ladeplatte, neu auszulegen (Prototyp 2). Hierbei sollten die Vorgaben aus [VDE-AR-2011], insbesondere die Vorgabe der Außenabmessungen, eingehalten werden. Die Außenabmessungen und das Gewicht der neu ausgelegten induktiven Komponenten sind in Tabelle 2 aufgelistet.

Stationäre Ladeplatte		Mobile Ladeplatte	
Länge	1.089 mm	Länge	825 mm
Breite	1.089 mm	Breite	825 mm
Höhe	24 mm	Höhe	16 mm
Gewicht	ca. 49 kg	Gewicht	ca. 30 kg

Tabelle 2: Abmaße und Gewicht der induktiven Komponenten

Im Projekt wurde der Fokus auf die elektrische und magnetische Funktionalität gelegt. Aus den aufgeführten Gewichten wird deutlich, dass ein weiterer Entwicklungsschritt vor allem auf der Fahrzeugseite zur Reduzierung des Gewichts notwendig ist.

Der Querschnitt durch die neu ausgelegten Ladeplatten ist in Abbildung 5 eine fotografische Ansicht in Abbildung 6 zu sehen.

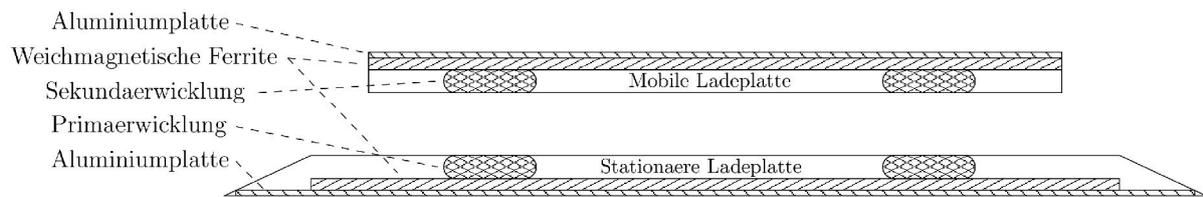


Abbildung 5: Prototyp 2 des induktiven Übertragungssystems im Querschnitt

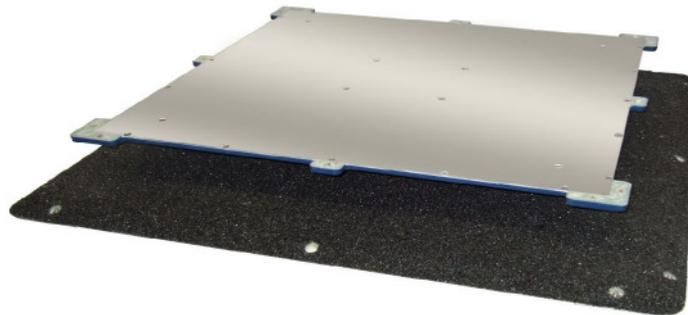


Abbildung 6: Prototyp 2 des induktiven Übertragungssystems, Fotografie

Für die Integration bei AEV, bei VW und bei Fraunhofer IWES wurden drei unterschiedliche Versionen der mobilen Ladeplatte entworfen. Der Unterschied ist hierbei bedingt durch die verschiedenen Einbauräumvorgaben. Insbesondere die Unterbringung der Sekundärkompensation und des Sekundärgleichrichters waren hier zu beachten.

**Version AEV:** Flache Ausführung der mobilen Ladeplatte mit externem Aufbaugehäuse in der Form eines Trapez-Prismas. Die flache Ausführung (16mm Höhe) verhindert eine zu starke Verringerung Abstandes zwischen Fahrzeugunterboden und Bodenoberfläche bei nachträglichem Anbau an ein Fahrzeug. Das Anbaugehäuse fügt sich exakt in einen am Fahrzeugunterboden des Audi A2 vorhandenen freien Raum. Abbildung 7 zeigt eine Darstellung des Systems mit mobiler Ladeplatte in flacher Ausführung.

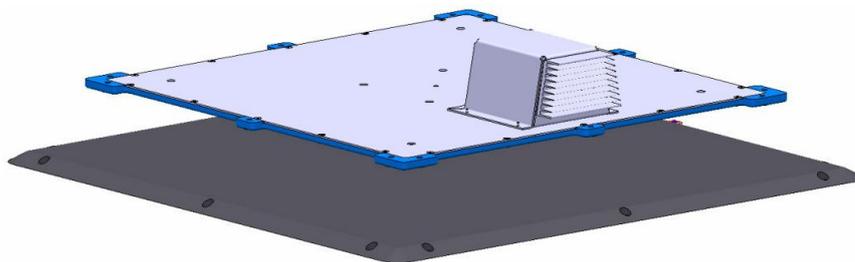


Abbildung 7: W-Charge System mit mobiler Ladeplatte in flacher Ausführung und externem Anbaugehäuse in Form eines Trapez-Prismas

**Version VW:** Flache Ausführung der mobilen Ladeplatte, gleich der AEV-Lösung, mit zwei externen Aufbaugehäusen in Form von Quadern (s. Kapitel 3.4.1, Abbildung 34). Diese Abwandlung in der Ausführungsform war auf Grund der anderen Bauraum Voraussetzungen des VW-Fahrzeugs notwendig.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

**Version Fraunhofer IWES:** Integrierte Ausführung der mobilen Ladeplatte, d.h. die Höhe der Ladeplatte entspricht rund 36mm. Die Kompensation und der Gleichrichter sind in die Ladeplatte integriert. Abbildung 8 zeigt eine Darstellung des Systems mit mobiler Ladeplatte in integrierter Ausführung.

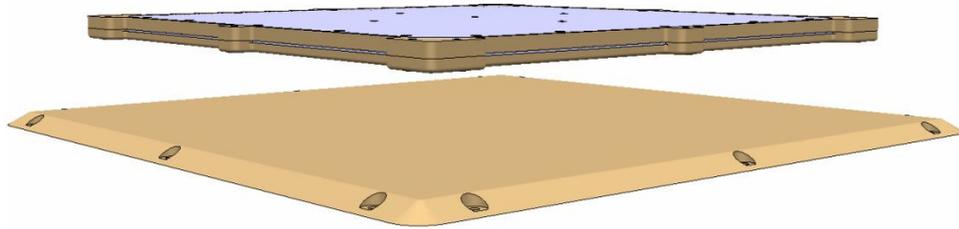


Abbildung 8: W-Charge System mit mobiler Ladeplatte in integrierter Ausführung

Die stationäre Ladeplatte wurde für den Prototyp 2 ebenfalls neu entworfen, um zum Einen die Kopplung mit der mobilen Ladeplatte zu optimieren und zum Anderen, um die zerstörungsfreie Überfahrbarkeit der Platte mit Kraftfahrzeugen zu gewährleisten.

Der Schwerpunkt der Entwicklungsarbeiten der Firma Vahle im Rahmen des W-Charge Projekts lag auf der Auslegung, Inbetriebnahme und Optimierung des frequenzvariablen Wechselrichters. Wie obenstehend dargelegt, war der Betrieb des Systems mit einem Wechselrichter mit konstanter Arbeitsfrequenz nicht sinnvoll möglich. Die Inbetriebnahme des frequenzvariablen Wechselrichters war jedoch auch nicht ohne weiteres möglich, da bei vielen Einzelfunktionen unerwartete Störungen auftraten. Insgesamt waren mehrere Optimierungszyklen notwendig um einen stabilen Systembetrieb gewährleisten zu können. Hierdurch verzögerte sich die Auslieferung an die Konsortialpartner.

### 3.2.1.4 Messergebnisse

Mit der ersten Ausführung, die einen stabilen Systembetrieb gewährleistete, wurden Messungen durchgeführt, die nachfolgend dargestellt sind.

Die Abbildungen 9 und 10 zeigen die Ergebnisse von Untersuchungen der übertragenen Leistung. Der Einbruch der übertragenen Leistung bei Versatz ist direkt abhängig von der magnetischen Kopplung zwischen stationärer und mobiler Ladeplatte und lässt daher Rückschlüsse auf diese zu.

Abbildung 9 zeigt den Einfluss einer seitlichen Verschiebung der mobilen Ladeplatte in x-Richtung. Es ist zu sehen, dass die Ausgangsleistung im Verhältnis zur Leistung bei einem Versatz gegenüber der mittigen Position  $x=0$  nicht nennenswert einbricht. D.h. mindestens bis zu einem Versatz von  $x=\pm 100\text{mm}$  (oder  $y=\pm 100\text{mm}$ ) ist lediglich mit geringen Auswirkungen auf das Systemverhalten zu rechnen. Gleichzeitig zeigt das Diagramm den Einfluss des Plattenabstandes  $h$ . Der Auslegungsabstand liegt bei  $h=60\text{mm}$ , was der Einbausituation im Versuchsfahrzeug von AEV entspricht. Die auf der Sekundärseite induzierte Spannung sinkt mit höherem Abstand durch die geringere Flussverkettung. Da das System lediglich mit einem passiven Brückengleichrichter betrieben wird, sinkt damit bei konstanter Last (hier z.B.  $R=40\Omega$ ) auch die übertragene Leistung.

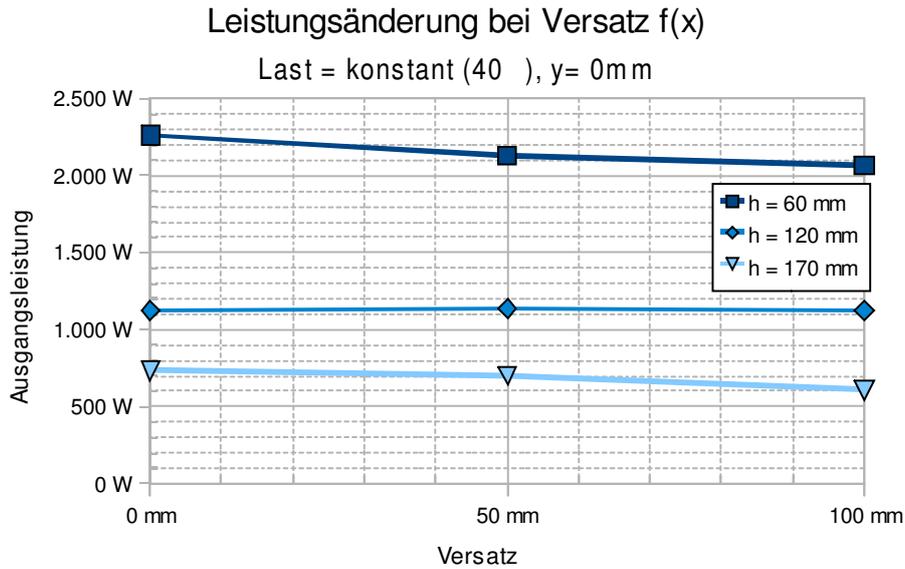


Abbildung 9: Einfluss des seitlichen Versatzes in eine Richtung (x) auf die übertragene Leistung

Abbildung 10 zeigt den Einfluss des seitlichen Versatzes in x- und gleichzeitig in y-Richtung. Hier ist der Einfluss auf die übertragene Leistung höher. Es ist jedoch zu sehen, dass der Einbruch insbesondere bei geringen Plattenabständen h zur Geltung kommt. Das Ziel, bei einem Versatz von  $x = \pm 100$  mm und  $y = \pm 100$  mm, die volle Leistung zu übertragen ist hierdurch aber nicht gefährdet, da zukünftig eine sekundäre Anpassschaltung die Spannung auf einen konstanten Wert setzen soll.

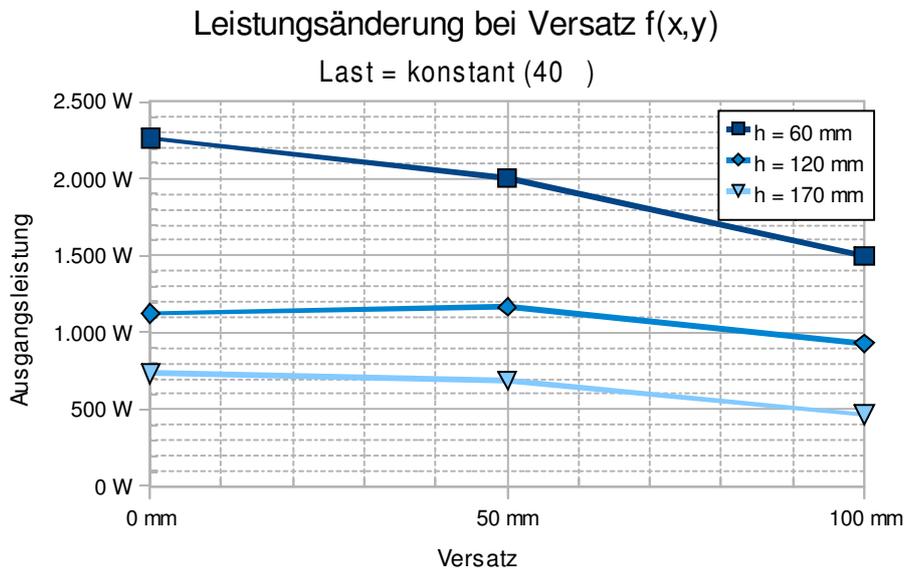


Abbildung 10: Einfluss des seitlichen Versatzes in zwei Richtungen (x und y) auf die übertragene Leistung

In der einfachsten Konfiguration wird die Wechselrichterbaugruppe über einen Netzgleichrichter versorgt, der eine Zwischenkreisspannung von 320 VDC zur Verfügung stellt. Die maximale Ausgangsleistung, die damit darstellbar ist, beträgt  $P = 2250$  W.

Um eine höhere Leistung ( $P > 3000\text{W}$ ) zu übertragen und außerdem die gesetzlichen Vorschriften für Verbraucherprodukte am Stromnetz einzuhalten muss eine PFC-Schaltung (Power Factor Correction, Leistungsfaktorkorrektur) in den Wechselrichter integriert werden. Diese soll für die netzseitige Kompensation von Verschiebungs- und Verzerrungsblindleistung sorgen und erzeugt auf ihrer Sekundärseite eine Gleichspannung von  $U_{dc} = 400\text{V}$ . Nach Sicherstellung des stabilen Wechselrichterbetriebs und nach Auslieferung der W-Charge-Systeme an AEV, VW und Fraunhofer IWES wurde eine PFC-Schaltung in einen Primärwechselrichter integriert. Der gemessene Leistungsfaktor am Netz lag bei  $\cos\phi \approx 98\%$ . Der gemessene Wirkungsgrad bei einer übertragenen Leistung von  $P = 3000\text{W}$  lag, gemessen von Primärgleichspannungszwischenkreis bis zum ohmschen Verbraucher auf der Sekundärseite, bei  $\eta = 90,5\%$ .

Die Eigenerwärmung des Wechselrichters wurde ermittelt. Der Einfluss auf die Systemstabilität wurde analysiert und durch Gegenmaßnahmen (Kühlung) kompensiert. Damit ist ein sicherer und stabiler Betrieb über den gesamten Einsatztemperaturbereich unabhängig von der abgegebenen Leistung gesichert.

Zusätzlich zu den Funktionstests wurde die Erwärmung des in der [VDE-AR-2011] beschriebenen Prüfkörpers (ST37 Vollmaterial) auf der stationären Ladeplatte systematisch getestet. Im Maximum wurden hier Temperaturen von  $T = 158\text{°C}$ , bei einer Ausgangstemperatur von  $T_0 = 23\text{°C}$ , erreicht. Dieser Temperaturanstieg von  $\Delta T = 135\text{K}$  liegt weit über dem in der Anwendungsregel definierten Maximalwert. Anhand der Ergebnisse dieser Temperaturmessung wurde ein Neuentwurf der stationären und der mobilen Ladeplatte durchgeführt. Erste Versuche führen zu dem Ergebnis, dass der Temperaturanstieg, bei gleichbleibender Leistungsübertragung, hier im Extremfall lediglich  $\Delta T = 30\text{K}$  beträgt. Ausführliche Messungen und Versuche mit den neu ausgelegten induktiven Elementen konnten im Rahmen des Projekts W-Charge aus Zeitgründen nicht mehr durchgeführt werden. Abbildung 11 zeigt eine Gegenüberstellung vergleichbarer Temperaturverläufe des Prüfkörpers auf der stationären Ladeplatte in alter und in neuer Auslegung.

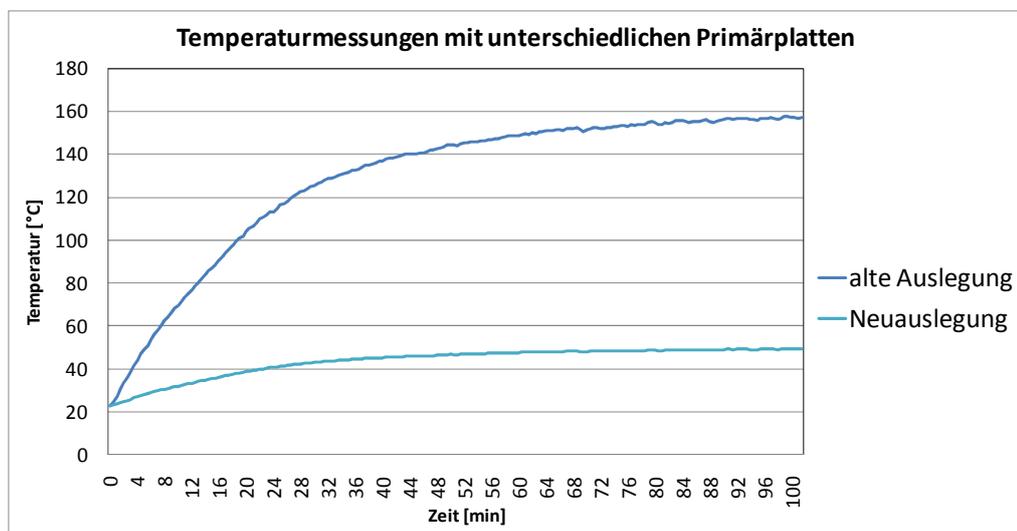


Abbildung 11: Erwärmung des Prüfkörpers gemäß [VDE-AR-2011]

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

### 3.2.2 Höher integrierter Fahrzeugstromrichter (IWES)

Im Zuge der zukünftig geplanten NetZRückspeisung (z.B. aus zuvor mit erneuerbaren Energien geladenen Batterien), zur Netzunterstützung bzw. als Zwischenspeicherung wird eine bidirektionale und intelligente 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. Hierfür kommen derzeit bis zu vier gesonderte Ladegeräte zur Anwendung.

#### 3.2.2.1 Konzeptentwicklung

Im Folgenden werden die Spezifikationen für den höher integrierten Stromrichter dargestellt, die innerhalb eines Pflichtenheftes niedergeschrieben wurden.

Der höher integrierte Stromrichter stellt eine fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur dar. Hierbei werden alle bisher separaten Komponenten zur Ladung und Rückspeisung vereint. D.h. es kann sowohl 1-phasig und 3-phasig als auch induktiv unter Nutzung der gleichen Leistungselektronik und Drosseln geladen werden. Zusätzlich ist eine 3-phasige Rückspeisung möglich. Diese Mehrfachnutzung von Komponenten führt zu einer Gewichts-, Größen- und Kostenersparnis.

Folgende grundlegende Randbedingungen waren für den höher integrierten Stromrichter vorgesehen:

- Ladung mittels induktiver Energieübertragung (max. 3kW)
- 3-phasige Ladung vom Netz (max. 10kW kabelgebunden)
- 3-phasige Rückspeisung ins Netz (max. 10kW kabelgebunden)
- 1-phasige Ladung vom Netz (max. 3kW kabelgebunden)
- Minimum an verwendeten Komponenten
- Entwicklung hinsichtlich geltender Standards und Richtlinien
- Bereitstellung der notwendigen Batterieladespannungen bzw. -ströme
- Kommunikation mit Batteriemanagementsystem und Pick-up bzw. übergeordnetes Lademanagement

Auch eine Rückspeisung über die Schnittstelle zur induktiven Übertragungstrecke ist von der Topologie her möglich. Innerhalb des Vorhabens wurde dieser Leistungsfluss jedoch nicht näher untersucht.

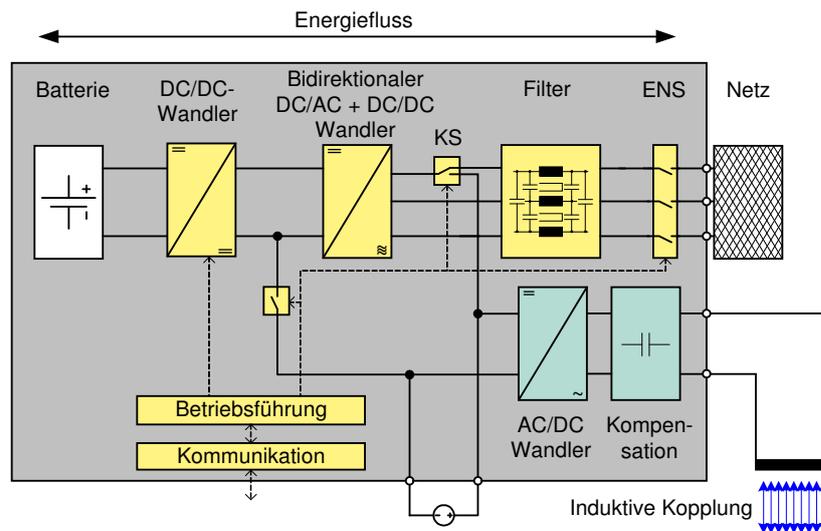


Abbildung 12: Konzept induktives und kabelgebundenes Laden und kabelgebundener Rückspeisung, Komponenten des höher integrierten Stromrichters sind gelb dargestellt

Abbildung 12 zeigt das Konzept zur 1-phasigen und 3-phasigen kabelgebundenen sowie kabellosen, induktiven Ladung der Fahrzeugbatterie. Außerdem ist eine 3-phasige Rückspeisung möglich. Die Netztrennstelle (ENS) beinhaltet alle notwendigen Komponenten bezüglich der Netztrennung sowie der Aufschaltung. Der nachfolgende Filter dient zur Einhaltung der entsprechenden Netzkopplungsnormen und ermöglicht eine konforme Ankopplung an das öffentliche Niederspannungsnetz. Durch die Koppelstelle (KS) kann die Betriebsführung entscheiden, ob die Energie direkt kabelgebunden dem öffentlichen Netz entnommen, oder ob die Energie der induktiven Übertragungsstrecke verwendet werden soll. Der bidirektionale DC/AC oder wahlweise DC/DC-Wandler beinhaltet alle Komponenten zur Anpassung der Wechselspannung vom Netz und der Gleichspannung der induktiven Strecke auf das vorgeschriebene Niveau für den darauffolgenden DC/DC-Wandler sowie umgekehrt. Der DC-DC-Wandler stellt den erforderlichen Ladestrom für die Batterie und den entsprechenden Rückspeisestrom zur Verfügung.

### 3.2.2.2 Die Betriebsführung

Die Betriebsführung beinhaltet alle Steuer- und Regeleinrichtungen, die Generierung der PWM sowie die komplette Sensorik. Außerdem sind die Betriebszustände hinterlegt. Zur Kommunikation mit der „Außenwelt“ ist eine CAN-Schnittstelle vorgesehen.

Abbildung 13 beschreibt den Betriebsablauf. Nach dem Zustand „Aus“ erfolgt zunächst die „Initialisierung“ und nach erfolgreichem Systemstart der Zustand „Standby“. Nur nach Anforderung des Fahrzeugmanagements kann einer der Ladezustände bzw. der Rückspeisenzustand eingenommen werden. Tritt kein Fehler auf, wechselt die Betriebsführung automatisch nach Beendigung der Zustandsanforderungen in den Zustand „Standby“.

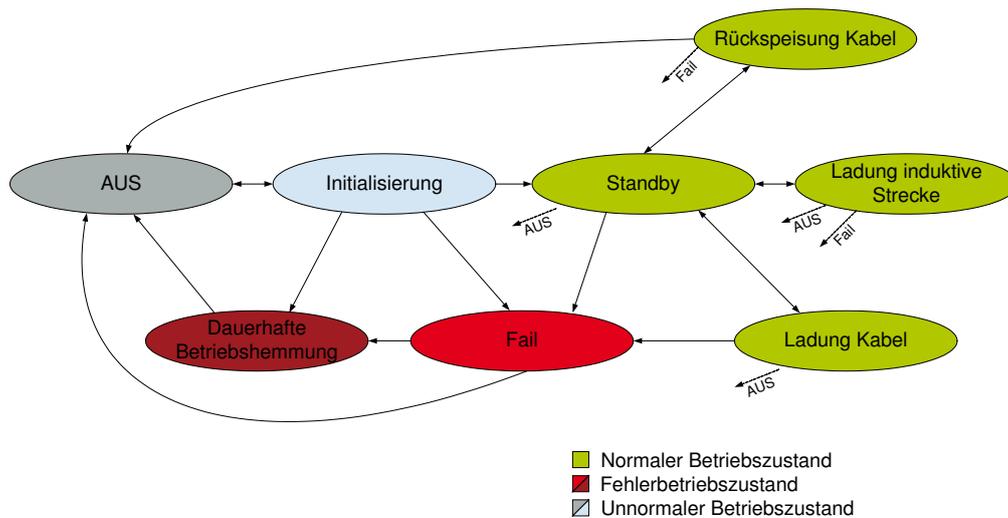


Abbildung 13: Betriebsablauf

Im Folgenden werden die Betriebszustände genauer erläutert.

### **AUS**

Zustand tritt ein, wenn Batterie nicht genügend Energie zur Versorgung des Labormusters zur Verfügung stellen kann und keine kabelgebundene Verbindung zum Netz besteht.

→ Keine Taktung der Halbleiterstufen, alle Relais auf Ausgangszustand, Zwischenkreise entladen

### **Initialisierung**

Folgezustand von „AUS“. Die Batterie stellt genügend Energie zur Verfügung oder das Auto ist mit dem Netz verbunden. Das System wird automatisch gestartet und Testroutinen werden abgearbeitet.

→ Keine Taktung der Halbleiterstufen, alle Relais auf Ausgangszustand, Zwischenkreise entladen

### **Standby**

Der höher integrierte Stromrichter wartet auf Anweisung vom überlagerten Managementsystem des Fahrzeugs.

→ Keine Taktung der Halbleiterstufen, alle Relais auf Ausgangszustand, Zwischenkreise entladen

### **Ladung Kabel**

Der höher integrierte Stromrichter erhält Anweisung Energie vom Netz in die Batterie über das Kabel einzuspeisen (1-phasig oder 3-phasig).

→ Netztrennstelle geschlossen, Koppelstelle auf Position „Netz“, Halbleiterstufen werden entsprechend getaktet, Zwischenkreise geladen

### **Ladung induktive Strecke**

Der höher integrierte Stromrichter erhält Anweisung, Energie vom Netz in die Batterie über die induktive Strecke einzuspeisen.

→ Netztrennstelle offen, Halbleiterstufen werden entsprechend getaktet, Koppelstelle auf Position „induktive Strecke“, Zwischenkreise geladen

**Rückspeisung Kabel**

Der höher integrierte Stromrichter erhält Anweisung, Energie von der Batterie ins Netz einzuspeisen.

→ Netztrennstelle geschlossen, Halbleiterstufen werden entsprechend getaktet, Koppelstelle auf Position „Netz“, Zwischenkreise geladen

**Fail**

Im Fehlerfall wird der sicherere Zustand hergestellt und Fehlerroutrinen abgearbeitet. Im Anschluss geschieht ein Systemneustart.

→ Keine Taktung der Halbleiterstufen, alle Relais in Ausgangsposition, Zwischenkreise entladen

**Dauerhafte Betriebssthemmung**

Bei Zerstörung oder wiederholtem Fehler wird das System dauerhaft außer Betrieb genommen.

→ Keine Taktung der Halbleiterstufen, alle Relais in Ausgangsposition, Zwischenkreise entladen

**3.2.2.3 Entwicklung des höher integrierten Fahrzeugstromrichters (AP2)**

Abbildung 14 zeigt die Hardwaretopologie des fahrzeugseitigen höher integrierten Wechselrichters. Über den Schalter S1 kann die Batterie an- bzw. abgekoppelt werden. Die Schalter T1 bis T6, die Drosseln L1 bis L3, und die Kapazitäten C1 bis C3 bilden den DC/DC-Wandler, der abhängig der Energieflussrichtung als Hoch- bzw. als Tiefsetzsteller wirkt. Die Schalter T7 bis T12 bilden den Wechselrichter. Die Snusfilterdrosseln L4 bis L6 bereiten gemeinsam mit den Kondensatoren C4 bis C6 die Ausgangsspannung des Wechselrichters zu einer 50Hz netzkonformen Wechselspannung auf. Wird die Energie von der induktiven Strecke bezogen, wirken die Schalter T11 und T12, die Drossel L6 und die Eingangskapazität abhängig von der Energieflussrichtung als Hoch- bzw. Tiefsetzsteller. Über die Relais K1 bis K3 und S1 werden die Quellen zugeschaltet bzw. getrennt.

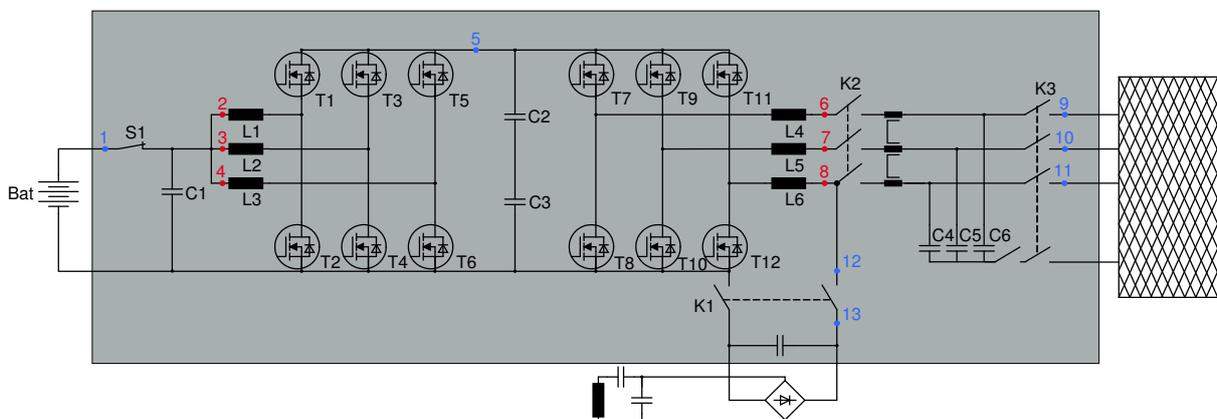


Abbildung 14: Hardwaretopologie höher integrierter Wechselrichter

An den rot markierten Stellen (Punkte 2-4 und 6-8) werden die notwendigen Strom- und Spannungsmessungen für die Steuer- und Regelung durchgeführt. An den blauen (Punkte 1, 5, 9-13) werden nur die Spannungen gemessen

Die aufgebauten und in Betrieb genommenen Platinen sind in Abbildung 15 dargestellt.

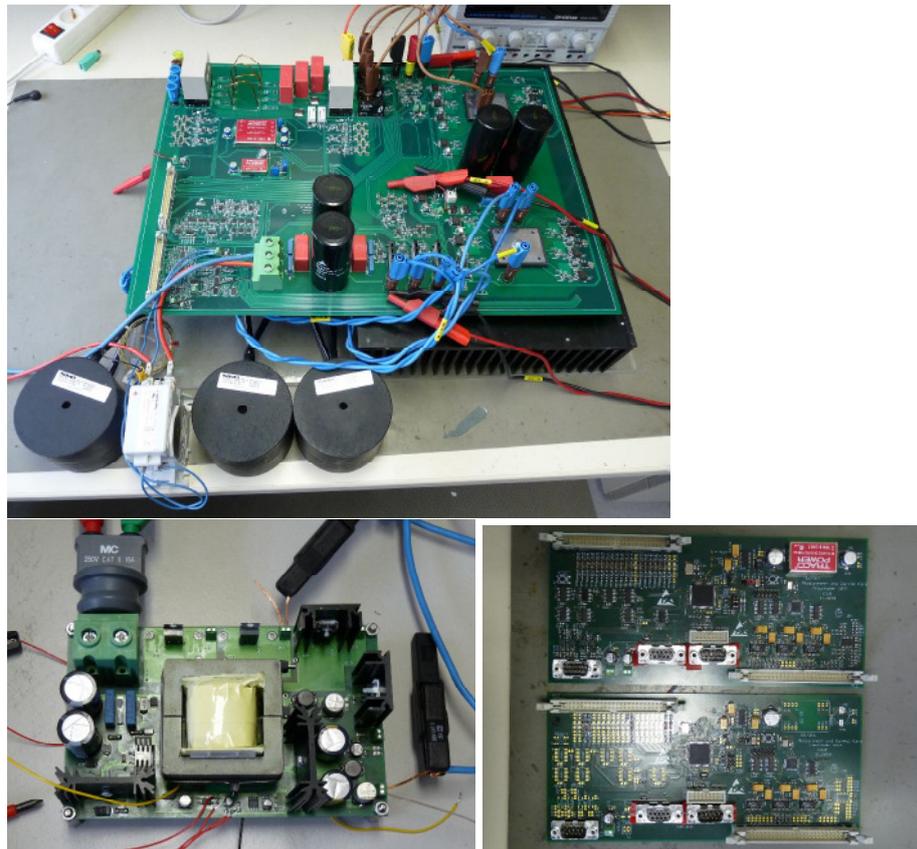


Abbildung 15: oben: Hauptplatine des Labormusters; unten links: Sperrwandler zur Spannungsversorgung; unten rechts: Control-Platine

Mit der dargestellten Hardware konnten die folgenden Leistungsflüsse messtechnisch erfasst werden:

- 3-phasige Ladung kabelgebunden
- 3-phasige Rückspeisung kabelgebunden
- Induktive Ladung mit Weiteingangsspannungsbereich

Somit wurden beim 3-phasigen kabelgebundenen Laden und Rückspeisen sowie beim kabellosen Laden ausreichend hohe Leistungen übertragen.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

### 3.2.3 Teststand (IWES)

Zur Durchführung von Untersuchungen am induktiven Energieübertragungssystem wurde am Fraunhofer IWES ein Teststand entwickelt und aufgebaut. Er ermöglicht das Anfahren von verschiedenen Punkten des Pick-up über der Primärspule im 3-dimensionalen Raum und bietet somit die Erstellung von reproduzierbaren Messergebnissen.

Zudem besteht die Möglichkeit der Weiterentwicklung des Teststands hin zu einem automatisierten Anfahren von Punkten und der automatisierten Messwertaufnahme von Spannungen, Strömen und Leistungen. Hierdurch wird eine einfache Verifizierung der induktiven Ladetechnologie gewährleistet.

In Abbildung 16 ist der beschriebene Teststand abgebildet. Der Pick-up ist an dem Rahmen des Teststandes direkt über der Primärspule angebracht. Zur Positionierung im 3-dimensionalen Raum wurde eine entsprechende Steuerung entwickelt, die die entsprechenden Aktoren (Einphasenmotor für die z-Richtung und Schrittmotoren für die x- und y-Richtung) steuert. Hierzu mussten entsprechende Hardwaremodule und Softwarepakete sowie der mechanische Aufbau entwickelt und in Betrieb genommen werden.

Das induktive Übertragungssystem von Vahle konnte erfolgreich in den Teststand integriert und in Betrieb genommen werden. Als Last wurden aus Funktionalitätsgründen zunächst Schiebewiderstände eingesetzt.

Eine Vergleichsmessung mit einem Pick-up, der nur mit Abstandshaltern (also ohne Teststand und Rahmen) über der Primärplatte positioniert wurde, hat gezeigt, dass der Teststand keinen messbaren Einfluss auf die übertragbare Leistung und den Wirkungsgrad hat.

Die Energieübertragung wurde mit zwei Versionen des Primärinverters getestet, die erste ohne und die zweite mit PFC. In der ersten Version wurde nur eine maximal übertragbare Leistung von 2,4 kW gemessen, mit PFC-Schaltung konnte jedoch die anvisierte Leistung von 3 kW übertragen werden.

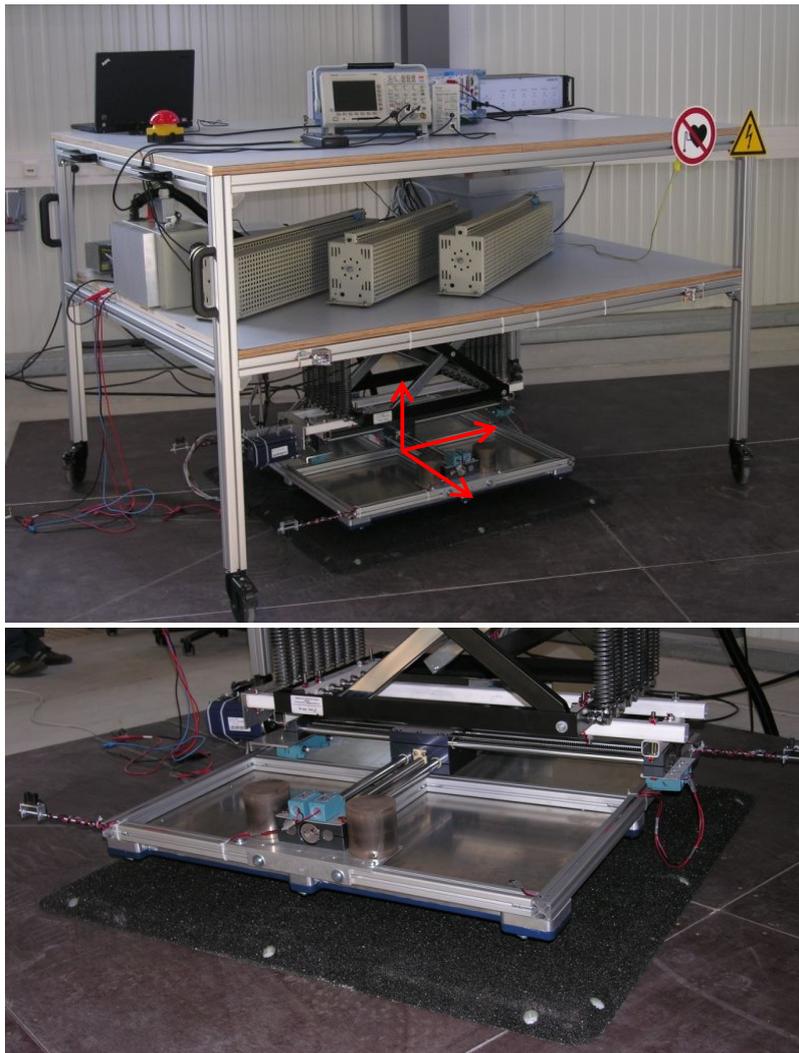


Abbildung 16: Teststand zur Verifizierung und Analyse der induktiven Übertragungsstrecke

### 3.3 Integration in ein rein batterieelektrisches Fahrzeug (AEV)

Der folgende Abschnitt ist gegliedert in eine Kurzbeschreibung des eingesetzten Fahrzeugs (im folgenden Demonstrator genannt), in einer Darstellung der Integration aller Komponenten und in eine ausführliche Beschreibung inklusive Schlussfolgerungen der Einparkstudien Teil 1 und Teil 2.

#### 3.3.1 Audi Demonstrator

Bei dem eingesetzten Demonstrator handelt es sich um ein reines batteriebetriebenes Elektrofahrzeug (BEV). Die technischen Daten des Fahrzeugs vor Umbau mit dem induktiven Ladesystem sind in Tabelle 3 angegeben. Abbildung 17 zeigt eine Seitenansicht des Fahrzeugs. Es handelt sich bei dem Demonstrator nicht um ein Audi Serienfahrzeug, also nicht um ein e-tron Fahrzeug.

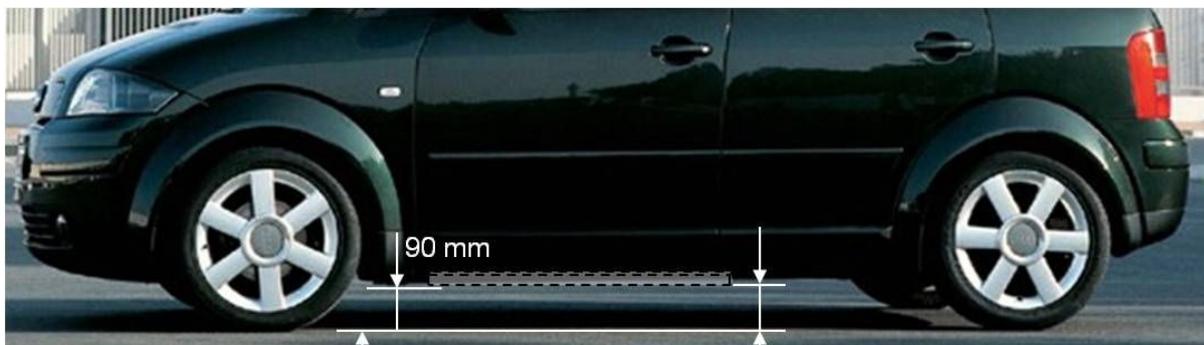


Abbildung 17: Demonstrator im W-Charge Projekt

Tabelle 3: Technische Eigenschaften des Demonstrators und der Elektronik-Komponenten

Bezeichnung	Wert
Fahrzeug	Audi A2
Typ	Elektrofahrzeug
Leistung E-Maschine	37 kW (peak)
Rekuperation	Elektrisches Rekuperation auf Fahrpedal
Getriebe	Schaltgetriebe, voll funktionsfähig
Ladearten	Konduktiv AC (3-phasig) mit ca. 10 kW
Isolationsüberwachung	IR423, Fa. Bender
Batterie	
Zellentyp	Thundersky TS-LFP60AHA, LiFePO4
Energiegehalt pro Zelle	60 Ah bei 4,25 V
Anzahl Zellen insgesamt	109
Energiegehalt Gesamtbatterie	20 kWh
Batteriespannung	U <sub>min</sub> = 278 V
	U <sub>max</sub> = 414 V
	U <sub>nominal</sub> = 360 V

### 3.3.2 Mechanische Integration

Die mechanische Auslegung von Sekundärspule und Gleichrichter ist in Abbildung 18 dargestellt. Da der verwendete Demonstrator ursprünglich über einen Abgasstrang verfügte, ergibt sich ein großer Package-Bereich an der Unterseite der Fahrzeugs in Längsrichtung. Dieser Bereich wurde verwendet, um die Gleichrichterkomponenten in ein Gehäuse mit trapezoid-prismatischer Form zu integrieren. Der Vorteil dieser Ausführung liegt daran, dass die Spule selbst sehr dünn ausgeführt werden kann. Es handelt sich um die zuvor in Kapitel 3.2.1.3 beschriebene flache Ausführungsform.

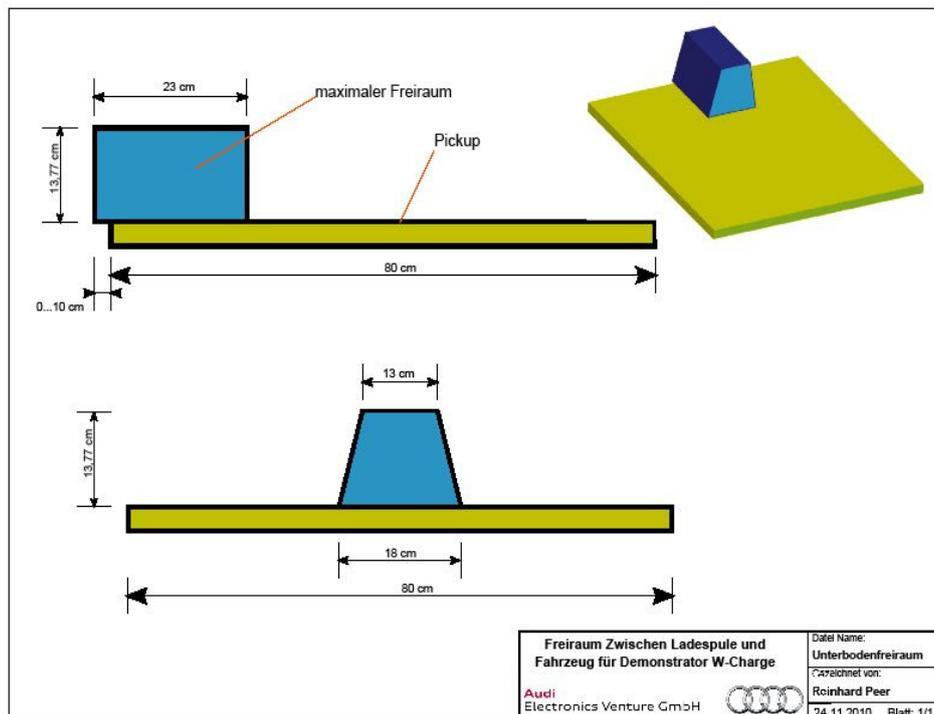


Abbildung 18: Abmessungen von Sekundärspule mit aufgesetztem Gleichrichter

In Abbildung 19 ist die fertige Integration der Sekundärspule in den Demonstrator dargestellt. Das Spulengehäuse selbst ist auf einen Aluminium-Trägerrahmen montiert, der fest mit der Karosserie verschraubt ist. Dadurch kann die Spule vom Fahrzeug abgenommen werden, ohne die Verschraubungen an der Karosserie lösen zu müssen.

Hauptvorteil dieser Bauvariante ist die dünne Ausführungsart der sekundärseitigen Platte. Diese Platte kann mit nur geringen Modifikationen in anderen Fahrzeugmodellen oder –derivaten wiederverwendet werden, auch wenn das Package für den Gleichrichter dem jeweiligen Fahrzeugtyp angepasst werden muss. Genau dies wurde auch im Projekt umgesetzt, da sich bei dem Demonstrator von Volkswagen nicht der Mitteltunnel, sondern andere Package-Positionen ergeben haben.



Abbildung 19: Foto des Unterbodens inklusive Sekundärplatte, mit einer Trägerstruktur aus Aluminium fixiert

### 3.3.3 Elektrische Integration

Die Hochvolttopologie des Elektrofahrzeuges ist in Abbildung 20 dargestellt. Es sind dabei die Komponenten gekennzeichnet, die für das kontaktlose Laden modifiziert beziehungsweise integriert werden mussten.

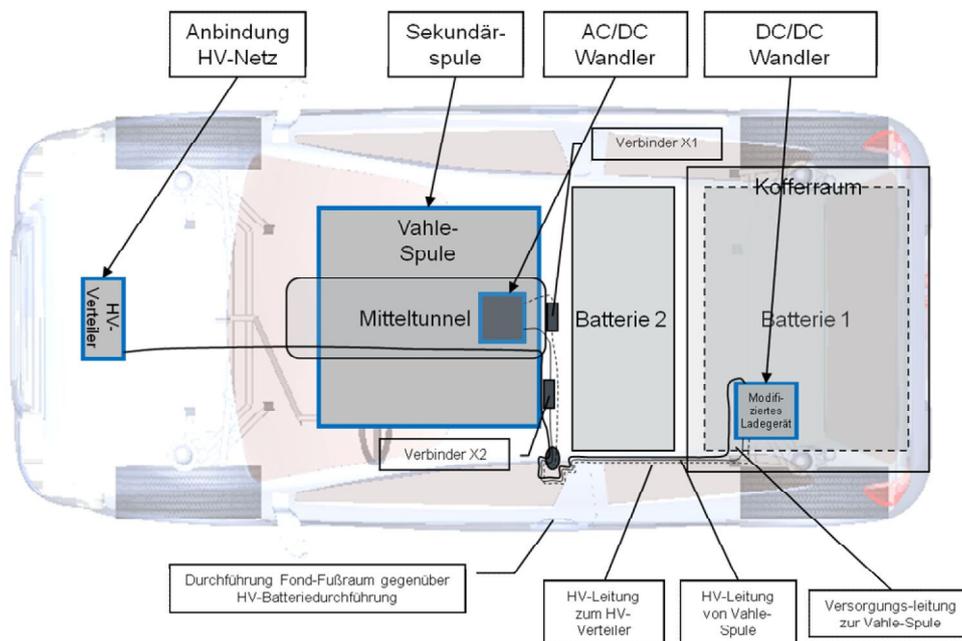


Abbildung 20: HV-Topologie des Demonstrators (nur Batterie, Spule, Ladegerät und HV-Verteiler)

Eine zentrale Komponente stellt das Onboard-Ladegerät dar. Es wurde ein modifiziertes Ladegerät eingesetzt, das zusätzlich über einen DC-Eingang verfügt. Da es sich bei dem Ladegerät nicht um ein Steuergerät handelt, das von den Konsortialpartnern hergestellt wurde, werden keine weiteren technischen Angaben des Ladegeräts beschrieben.

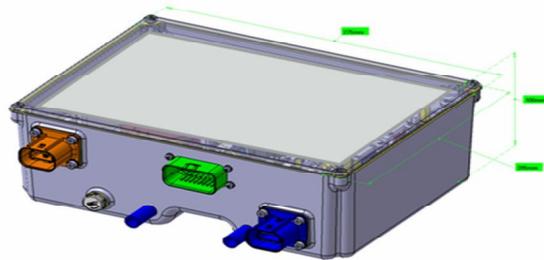


Abbildung 21: Onboard-Ladegerät mit DC-Eingang (Steuergerät ist nicht von den Konsortialpartner hergestellt und modifiziert worden.)

In Abbildung 22 sind die Einbauten dargestellt, die zusätzlich zur Sekundärspule und zum Gleichrichter in den Demonstrator integriert werden mussten. Links unten ist das Onboard-Ladegerät aus Abbildung 21 zu erkennen. Dieses ist an eine Wasserkühlung angeschlossen. Da es sich beim Demonstrator um ein rein luftgekühltes Fahrzeugkonzept handelt, mussten separate Kühlaggregate eingesetzt werden. Dies ist bei einem späteren Einsatz in weiteren Fahrzeugen mit wassergekühlten HV-Komponenten nicht mehr notwendig.

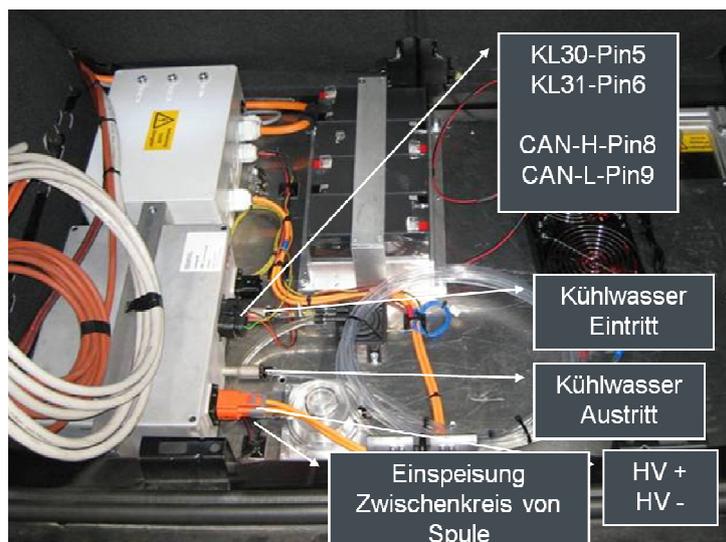


Abbildung 22: Einbauten im Demonstrator, zu sehen sind das modifizierte Ladegerät, eine Sicherungsbox zur Trennung von Ladegerät und Batterie und das Kühlsystem

### 3.3.4 Kommunikationsanbindung

Grundsätzlich sollte eine Anbindung des kontaktlosen Ladesystems an das Batteriemanagementsystem (BMS) erfolgen. Dies kann in zwei Schritten erfolgen. Zum Einen ist eine separate Kommunikation (zum Beispiel über CAN) zwischen dem AC/DC-Wandler und dem Onboard-Ladegeräte notwendig. Zum Anderen kann die in Elektrofahrzeugen bereits bestehende Kommunikation zwischen dem Onboard-Ladegerät und dem BMS verwendet werden. Dies ist vor allem dann sinnvoll, wenn es sich bei dem kontaktlosen Ladesystem um eine Zusatzfunktionalität handelt, die das im Fahrzeug integrierte kabelgebundene Laden ergänzt.

Die Kommunikationsanbindung zwischen dem AC/DC-Wandler und dem Onboard-Ladegerät ist in diesem Projekt jedoch nicht umgesetzt worden. Dies war für den Einsatz und Test des Systems auch nicht notwendig.

### 3.3.5 Einparkstudien

#### 3.3.5.1 Einparkstudie Teil 1

Um das Einparkverhalten, die erzielbaren Einparkgenauigkeiten und den zeitlichen Ablauf des Einpark- und des Ladevorgangs zu analysieren, wurde eine Probandenstudie mit 28 Teilnehmern durchgeführt. Jeder Teilnehmer hat alle Einparkversuche ohne Wiederholung durchgeführt. In der Studie wurden die Einparkvorgänge aus drei unterschiedlichen Anfahrtsrichtungen durchgeführt. Diese sind in Abbildung 23 dargestellt.

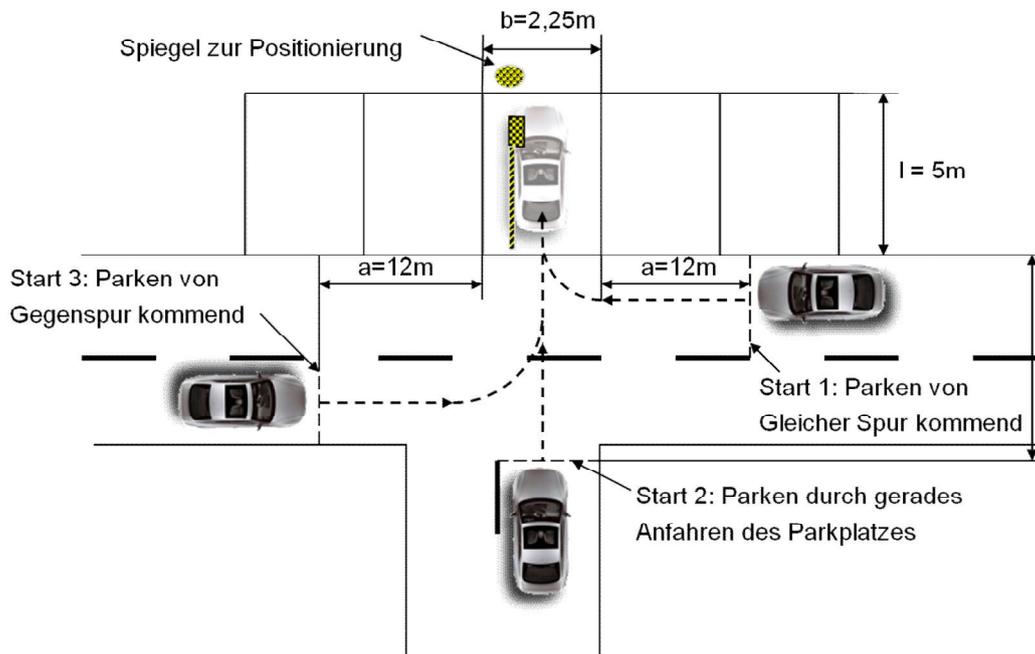


Abbildung 23: Darstellung der Einparkvarianten bei der Einparkstudie Teil 1

Der eigentliche Vorgang der Positionierung wurde in folgende Kategorien unterteilt:

- *Nicht unterstützt* (nur Bodenmarkierung, die für den Fahrer während der Positionierung nicht sichtbar sind) und
- *Unterstützt durch nicht-elektronische Einparkhilfen* (Spiegel im Außenbereich, Bodenkühle für die Vorderachsräder und auch die Kombination aus beidem)

Die im Folgenden beschriebenen Ergebnisse sind also immer in Hinblick auf die Anfahrtsrichtung und das verwendete Positionierungssystem zu unterscheiden.



Abbildung 24: Detailfoto der Kuhle als nicht-elektronische Positionierungsunterstützung



Abbildung 25: Versuchsträger für Einparkstudie Teil 1 und Parkplatz mit Bodenmarkierung und Spiegel

Für eine Worst-Case Betrachtung der Einparkvorgänge wurden die folgenden Kriterien festgelegt.

- Anfahrrichtung *von gleicher Spur kommend*
- Analyse *ohne Einparkhilfe* (nur Markierung) und *mit Einparkhilfen* (Spiegel, Kuhle, Spiegel + Kuhle)
- Streichung der schlechtesten 10% der Probanden (einzeln betrachtet in jeder Analyse)
- Betrachtung der jeweils schlechtesten Werte der übrigen 90% der Probanden
- Unterscheidung zwischen zwei Spulenpositionen
  - Fahrzeugmitte
  - vorne (eine um 100cm gegenüber der Fahrzeugmitte nach vorne verschobenen Spulenposition)

Es ergibt sich also, dass 90% der Probanden eine Positionierungsgenauigkeit erreichen, deren Versatz (jeweils radial, seitlich oder in Längsrichtung) besser

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

oder gleich dem in Tabelle 4 angegebenen Wert ist. Zusätzlich ist jeweils noch die Standardabweichung angegeben.

<b>Einparkhilfe</b>	<b>Spulenposition Mitte</b> (schlechtester Wert / Standardabw.)	<b>Spulenposition vorne</b> (schlechtester Wert /Standardabw.)
Markierung	83 cm / 21 cm	82 cm / 20 cm
Markierung + Spiegel	15 cm / 3 cm	12 cm / 3 cm
Markierung + Kuhle	21 cm / 5 cm	17 cm / 4 cm
Markierung + Spiegel + Kuhle	8 cm / 2 cm	7 cm / 2 cm

Tabelle 4: Erreichte Positionsgenauigkeit von 90% der Probanden, radiale Abweichung

Es zeigt sich, dass nur mit Hilfe der Kombination von *Spiegel und Kuhle* eine ausreichend hohe Positionierungsgenauigkeit im Bereich von < 10 cm erreicht werden konnte.

Wenn man davon ausgeht, dass die Positionierung in Längsrichtung durch ein ausreichend präzises Sensorsystem oder durch eine mechanische Positionierungshilfe mit hoher Genauigkeit auf nahezu 0 cm erfolgen kann, so bleibt jedoch eine Ungenauigkeit in Querrichtung. Diese ist deshalb als interessant zu betrachten, da diese Querabweichung nur durch ein Rangieren (mit mindestens 2 Zügen) korrigiert werden kann. Der dadurch entstehende zeitliche Nachteil würde aber einen großen Teil des zeitlichen Vorteils des kontaktlosen Ladens kompensieren. Zusätzliche Rangierzüge zur Korrektur des Querversatzes sind somit unattraktiv und sollten vermieden werden. Tabelle 5 zeigt die erreichte Quergenauigkeit, wiederum zunächst den schlechtesten Wert der besten 90% der Probanden und deren Standardabweichung.

<b>Einparkhilfe</b>	<b>Spulenposition Mitte</b> (schlechtester Wert / Standardabw.)	<b>Spulenposition vorne</b> (schlechtester Wert / Standardabw.)
Markierung	27 cm / 7 cm	22 cm / 5 cm
Markierung + Spiegel	11 cm / 2 cm	6 cm / 1 cm
Markierung + Kuhle	21 cm / 5 cm	17 cm / 4 cm
Markierung + Spiegel + Kuhle	7 cm / 2 cm	5 cm / 1 cm

Tabelle 5: Erreichte Positionsgenauigkeit, seitliche Abweichung

Es ist zu erkennen, dass der vordere Teil des Fahrzeugs (also die z. B. die Vorderachse) eine deutlich bessere Genauigkeit beim seitlichen Versatz erreicht als die Fahrzeugmitte. Dies ist vor allem dadurch zu erklären, dass die Winkel, die sich durch das Einparken von gleicher Spur kommend ergeben, nicht vernachlässigbar klein sind.

Die erreichten Verdrehwinkel der Fahrzeuge bei der gleichen Probandenauswahl ergaben die in Tabelle 6 gezeigten Werte.

<b>Einparkhilfe</b>	<b>Spulenposition Mitte</b>	<b>Spulenposition vorne</b>
Markierung	5°	5°
Markierung + Spiegel	3°	3°
Markierung + Kuhle	4,5°	4,5°
Markierung + Spiegel + Kuhle	2,5°	2,5°

Tabelle 6: Erreichte Verdrehwinkel

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Es zeigt sich, dass die Verdrehwinkel für alle Varianten relativ gering sind. Somit können sie für die reine Energieübertragung vernachlässigt werden, nicht jedoch für die Bestimmung der Position der Sekundärspule am Fahrzeug. Hier hat sich gezeigt, dass eine Position der Sekundärspule in der Mitte des Fahrzeugs zu leicht schlechteren Positionierungseigenschaften führt als eine um 100cm vom Mittelpunkt nach vorne verschobene Integrationsposition.

Die Probanden wurden befragt, welche der 4 Einparkhilfen sie bevorzugen würden. Dabei haben sich 85% der Probanden für die Kombination aus Spiegel und Kuhle entschieden. Die übrigen 15% wären auch mit einer Unterstützung zufrieden, die lediglich den Spiegel beinhaltet. Kein einziger Proband hat sich für die Unterstützung ausgesprochen, die nur aus einer Kuhle besteht. Die Tatsache, dass trotz der Ablehnung der Kuhlen-Lösung die Einparkergebnisse dort nur geringfügig schlechter ausgefallen sind, lässt sich damit erklären, dass während des Einparkvorgangs zwar eine Auswirkung auf das Fahrzeug zu spüren ist (Kräfte wirken auf das Fahrzeug und führen zu leichten Veränderungen in der Längsbewegung), dies jedoch gleichzeitig die Unsicherheit beim Fahrer erhöht. Dieser kann nicht mit Sicherheit feststellen, ob diese Krafteinwirkungen von der Kuhle kommen, oder ob sie eine andere Ursache haben. Dieses Ergebnis bestätigt (aber lediglich), dass die Unsicherheit in der Abschätzung des Fahrers über die Position des Fahrzeugs innerhalb der Parkfläche zu groß ist.

Die Befragung nach der persönlichen Einschätzung bzw. Akzeptanz des kontaktlosen Ladens zeigte ein überwiegend positives Bild. Auf die Frage „Wie empfinden Sie das kabellose Laden gegenüber dem kabelgebundenen Laden“ haben über 70% mit „viel besser“ geantwortet. Knapp 25% haben mit „besser“ oder „leicht besser“ geantwortet.

Um den zeitlichen Aufwand zu bewerten, wurde zunächst ein kompletter Durchgang für das kabelgebundene Laden für jeden Probanden durchgeführt und der zeitliche aufgezeichnet. Diese Zeiten beinhalten den normalen Einparkvorgang, das Herausholen des Ladekabels aus dem Kofferraum, das Einstecken, das Ausstecken und Verstauen des Ladekabels im Kofferraum. Dabei wurde das Kabel ohne zusätzlichen Aufwand auf den Boden des Kofferraums gelegt, es musste also keine zusätzliche Mechanik oder Ähnliches bedient werden. Ebenso wurden die einzelnen Einparkvorgänge für das genaue Einparken zeitlich erfasst. Diese Zeiten beinhalten den genauen Einparkvorgang. Alle Einsteige- und Aussteigevorgänge wurden nicht betrachtet, da sie zunächst unabhängig von der Ladeart stattfinden. Es hat sich gezeigt, dass im Schnitt ein zeitlicher Mehraufwand von 43 Sekunden für das kabelgebundene Laden im Vergleich zum kabellosen Laden notwendig ist. Gegenüber dem Nichtladen ist der zeitliche Mehraufwand bei 55 Sekunden. Das kabellose Laden – also der in diesem Versuch durchgeführte genaue Einparkvorgang mit nicht-elektronischen Hilfsmitteln – hat im Schnitt 12 Sekunden Mehraufwand erfordert. Eine Aussage über den zeitlichen Unterschied zwischen den beiden Ladearten bei Audi Serienfahrzeugen kann hieraus jedoch nicht unmittelbar abgelesen werden, da sowohl die Positionen von Ladedosen und Ladekabel sowie die komplette Bedienphilosophie einen maßgeblichen Einfluss auf den zeitlichen Aufwand des kabelgebundenen Ladens hat. Ebenso kann der zeitliche Aufwand für das kabellose Laden variieren, je nach Art der Anzeige beziehungsweise nach Art der

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Parkunterstützung, die das Fahrzeug dem Fahrer bereitstellt. Dennoch lässt sich aus dieser Studie heraus abschätzen, dass ein kabelloses Laden einen geringeren zeitlichen Aufwand bedeutet als die Nutzung eines Ladekabels, das im Fahrzeug mitgeführt werden muss. Die genaue Größe dieses zeitlichen Vorteils kann man jedoch nicht auf Audi Serienfahrzeuge übertragen.

### 3.3.5.2 Einparkstudie Teil 2

Die finale Auswertung der Einparkstudie Teil 1 und Einbindung des fertig gestellten und fertig integrierten Übertragungssystems der Firma Vahle führte zur Einparkstudie Teil 2. Ziel dieses Teils der Studie war es, zunächst einen sogenannten *akzeptablen Versatz* zu definieren. Dieser soll dann sowohl mit den real erzielten Versatzwerten aus Einparkstudie Teil 1 als auch mit den real gemessenen Wirkungsgraden<sup>1</sup> des in den Demonstrator integrierten Übertragungssystems verglichen werden. Daraus ließ sich eine Schlussfolgerung über die Akzeptanz des bisher erreichten Toleranzbereiches ableiten. Zusätzlich kann der in [VDE-AR-2011] geforderte Toleranzbereich überprüft und kommentiert werden.

Zunächst sind noch einmal die für die Einparkstudie Teil 2 relevanten Ergebnisse aus der Einparkstudie Teil 1 in Tabelle 7 aufgelistet. In dieser Tabelle sind die Ergebnisse für das gerade Anfahren der Parkposition beschrieben. Sie zeigen, im Vergleich zum Anfahren von gleicher Spur kommend, geringere Abweichungen von der Sollposition und können somit nicht als worst-case Positionierungstoleranzen bezeichnet werden. Sie liefern aber einen realistischen Anhaltspunkt für Einparkvorgänge in Garagen oder großen Parkplätzen, bei denen das Fahrzeug vor Erreichen der Parkbucht bereits die richtige Orientierung aufweist.

<i>Einparkgenauigkeiten</i>	<i>Seitlich</i> (schlechtester Wert / Standardabw.)	<i>Längsrichtung</i> (schlechtester Wert / Standardabw.)
Markierung	15 cm / 4 cm	59 cm / 17 cm
Markierung + Spiegel	3 cm / 1 cm	11 cm / 3 cm
Markierung + Kuhle	10 cm / 3 cm	2 cm / 1 cm

Tabelle 7: Erreichte Positionsgenauigkeiten von 90% der Probanden bei Parken durch gerades Anfahren und mittiger Spulenposition

Schaut man nun in [VDE-AR-2011], so findet sich dort eine erste Definition über den akzeptablen Versatz. Dieser ist wie folgt beschrieben.

*„Im praktischen Betrieb ergibt sich eine relative Position der mobilen zur stationären Feldplatte, der vom System abgedeckt werden muss. Die maximale Positioniertoleranz des Gesamtsystems ist definiert durch einen gleichzeitigen Versatz:*

*In Fahrtrichtung von [...] ± 100 mm und*

*quer zur Fahrtrichtung von [...] ± 100 mm*

<sup>1</sup> Die hier vorgestellten Werte sind nicht verallgemeinerbar auf das kontaktlose Laden in einem Serienfahrzeug. Dies liegt unter anderem am Abstand zwischen Primär- und Sekundärspule, der bei diesem Demonstrator geringer ist als bei einem vergleichbaren Serienfahrzeug. Die Vorgehensweise zur Bewertung eines Systems und der Systemintegration ist jedoch allgemeingültig und somit sehr wohl anwendbar.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Anmerkung 1: Die Systeme müssen einen Versatz von 100 mm in jeder Achse darstellen können.“

Im Laufe der Überarbeitung von [VDR-AR-2011] ist eine weitere Anmerkung als Kommentar ergänzt worden:

„In einer künftigen Version des Dokumentes müssen zum Positionier-Toleranzfeld auch Anforderungen an Mindestwerte zu Leistungsübertragung und Wirkungsgrad an den Toleranzgrenzen [...] und zur Einhaltung der Schutzziele [...] spezifiziert werden“

Genau diese Mindestwerte sind in dieser Einparkstudie Teil 2 beschrieben, siehe am Ende dieses Abschnitts.

Geht man von idealen Übertragungseigenschaften bei voller Überdeckung aus, so können diese Werte als Basiswerte mit 100% definiert werden. Wird ein Wirkungsgradverlust von 5% und eine Leistungseinbuße von 10% durch ungenaue Positionierung toleriert, so müssen 95% des maximal möglichen Wirkungsgrades und 90% der maximal möglichen Leistung erreicht werden. Durch Messungen mit diesen Grenzwerten ergeben sich die Toleranzgrenzen eines realen Systems.

Die Wirkungsgrad- und Leistungsmessungen mit dem in den Demonstrator integrierten Übertragungssystem ergaben einen definierten Wirkungsgrad und eine definierte maximale Leistung bei voller Überdeckung beider Spulen. Diese Werte sind also als Basiswerte mit 100% definiert. Die Messungen der Wirkungsgrade bis 95% und Leistungen bis 90% bei unterschiedlichen horizontalen Verschiebungen führte zu den in Tabelle 8 beschriebenen Werten<sup>2</sup>.

Einparkhilfe	Wirkungsgrad (Verlust um 5%)	Leistung (Verlust um 10%)
Seitliche Verschiebung	[-6 cm; 13 cm]	[-4 cm; 11 cm]
Längsverschiebung	[-7 cm; >10 cm]	[-7 cm; >10 cm]

Tabelle 8: Angabe der gemessenen Toleranzbereiche des integrierten Übertragungsystems

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine seitliche Toleranz von insgesamt 19 cm in Bezug auf den Wirkungsgrad und 15 cm in Bezug auf die Leistung erreicht wurde. Die Längstoleranz erstreckt sich über einen Bereich von mehr als 17 cm für den akzeptablen Wirkungsgradbereich und mehr als 17 cm für den akzeptablen Leistungsbereich. Eine Zusammenfassung aller Werte ist in Tabelle 9 gegeben.

<sup>2</sup> Dieser Werte unterscheiden sich von den Labormessungen der Firma Vahle. Hauptgrund dafür liegt in dem (freiwillig) gewählten Luftspalt, der deutlich kleiner ist als der nominale, reale Luftspalt eines zukünftigen Serienfahrzeugs. Messungen der Firma Vahle haben gezeigt, dass bei einem größeren Luftspalt auch größere Toleranzbereiche zu erwarten sind. Diese könnten in einem Bereich liegen, der den Anforderungen aus [VDE-AR-2011] entspricht.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

<i>Verschiebung</i>	<i>[VDE-AR-2011]</i>	<i>Übertragungssystem im Fahrzeug</i>	<i>Notwendig ohne Hilfsmittel</i>	<i>Notwendig mit Markierung und Kuhle</i>
seitliche	[-10 cm; 10 cm]	[-4 cm; 11 cm]	[-15 cm; 15 cm]	[-10 cm; 10 cm]
In Längsrichtung	[-10 cm; 10 cm]	[-7 cm; >10 cm]	[-59 cm; 59 cm]	[-2 cm; 2 cm]

Tabelle 9: Vergleich der definierten, gemessenen und benötigten Toleranzgrenzen

In zukünftigen Diskussionen sollte also eine genaue Definition der Toleranzgrenzen verwendet werden. Diese Definition könnte lauten:

„Der akzeptable Versatz ist durch eine zusätzliche Wirkungsgradeinbuße von 5% und ein Leistungsabfall auf 90% der Maximalleistung definiert.“

Diese Werte konnte unter Zuhilfenahme einer Bodenkuhle als nicht-elektronische Einparkhilfe mit dem Demonstrator bereits erreicht werden. Ohne Unterstützung durch eine Einparkhilfe sind die real erzielten Einparktoleranzbereiche jedoch deutlich größer als die Toleranzen des Übertragungssystems. Die Vorgaben aus [VDE-AR-2011] sind mit dem getesteten Übertragungssystem und den in diesem Abschnitt definierten Mindestanforderungen (maximal 5% Wirkungsgradverlust und maximal 10% Leistungsabfall) jedoch noch nicht im vollem Umfang erreicht.

### **3.3.6 Inbetriebnahme und Test des Demonstrators**

#### **3.3.6.1 Inbetriebnahme**

Die Inbetriebnahme des Demonstrators konnte erfolgreich durchgeführt werden. Durch die Begrenzung des maximal zulässigen Stroms im modifizierten Onboard-Ladegerät ist jedoch eine maximale Leistungsübertragung von 2,1 kW möglich.

#### **3.3.6.2 Testspezifikation**

Im Rahmen des Förderprojektes wurde eine Testspezifikation entwickelt, die eine genaue Beschreibung von Tests enthält, die zu einer Bewertung eines Übertragungssystems aus elektrotechnischer Sicht notwendig sind. Die Testspezifikation ist nicht notwendigerweise hinreichend umfangreich, sie bietet aber in jedem Fall eine solide Basis zur Beschreibung eines Übertragungssystems und zum Vergleich unterschiedlicher Übertragungssysteme. Die Testspezifikation beinhaltet einen allgemeinen Teil und die Detailbeschreibung der Tests. Die Detailbeschreibungen enthalten einige Angaben, die dem Handbuch entnommen werden müssen, die also den Herstellerangaben entsprechen. Wenn nicht explizit erwähnt, sind aber eigene Messungen durchzuführen, mit denen eine grundsätzliche Vergleichbarkeit zwischen den Systemen unterschiedlicher Hersteller gegeben ist. Die Inhalte der Testspezifikation sind im Folgenden beschrieben.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

## Allgemeiner Teil

- Zu verwendendes Koordinatensystem mit Ursprung an der Unterseite der Sekundärspule
- Beschreibung der fünf Bereiche (Spulenzwischenraum (1), Übergang zwischen Spulenzwischenraum und Außenbereich (2), Außenbereich außerhalb des Footprints des Fahrzeug (3), Fahrzeuginnenraum (4) und gegebenenfalls unter der Primärspule (5))
- Blockdiagramm aller Komponenten inklusive der Verschaltung

## Detailbeschreibung der Tests:

- Designparameter mit Beschreibung der Abmessungen, der Gewichte, Bildern aller Komponenten und Beschreibung aller verwendeten Steckern und Kabel
- Designparameter mit Beschreibung des Versuchsaufbaus
- Herstellerangaben zu den empfohlenen Spulenabständen
- Herstellerangaben zu den empfohlenen Spulenverschiebungen
- Größe des Bereiches (2), der als Sicherheitsabstand zu den Spulen während der Durchführung von Messungen eingehalten werden sollte
- Herstellerangaben zur Winkeltoleranz der Spulen zueinander
- Betriebstemperaturen aller Komponenten, Umgebungstemperatur, gegebenenfalls jeweils mit Angabe der minimalen und maximalen Werte
- Beschreibung des Kühlsystems
- Beschreibung der Geräuschemission aller Komponenten
- Beschreibung der Geräte zur Leistungsmessung
- Messung der Leistungsaufnahmen aller Geräte in Standby Modus und im Betriebsmodus
- Angabe des Wirkungsgrades
- Minimale, maximale und nominale Spulenabstände
- Maximaler Spulenversatz, bei dem noch ein ausreichend hoher Wirkungsgrad erreichbar ist
- Maximaler Spulenversatz, bei dem noch eine ausreichend hohe Leistung erreichbar ist
- Erwartete Versorgungs- und Anschlussarten aller Geräte (Spannung, Strom, Anzahl Phasen, ...)
- Übertragungsleistung bei unterschiedlichen Spulenabständen
- Beschreibung der Güte der Ausgangsspannung am Gleichrichter (Spannungsverlauf, AC-Anteile, Oberwellen, ...)
- Messung der z-Komponente des magnetischen Feldes in Bereich (1) in einem feinen Raster mit Angabe der Position des höchsten Wertes, Grafik der Feldverteilung
- Messung aller Feldkomponenten des elektrischen und magnetischen Feldes in den Bereichen (2), (3), (4) und gegebenenfalls (5), dabei sind jeweils anzugeben
  - die Koordinate der Feldsonde in x, y und z Richtung
  - der Effektivwert des magnetischen Flusses
  - der Effektivwert des elektrischen Feldes
  - Abbildung des Spektrums des magnetischen Flusses
  - Abbildung des Spektrums des elektrischen Feldes
  - 3D Feldsimulation des magnetischen Feldes zu Vergleichszwecken mit den gemessenen Werten
- Beschreibung der Größe des Bereiches (2), der die Grenze zu geltenden ICNIRP Richtwerten darstellt

### 3.3.6.3 Messgeräte

Im Folgenden sind Abbildungen und Beschreibungen von einem Teil der Messsysteme gegeben, die im Rahmen der Feldmessungen entsprechend der Testspezifikation aus Abschnitt 3.3.6.2 angewendet wurden.



Abbildung 26: Narda Feldsonde zur Messung von E- und B-Feldern außerhalb des Spulenzwischenraumes

Gerät	Narda EHP-200
Delta f	9 kHz / 30 MHz
B-Feld	0,756 $\mu$ T / 378 $\mu$ T
E-Feld	0,02 V/m / 1 kV/m
Anmerkung	Verarbeitung am PC

Tabelle 10: Eigenschaften der Narda Feldsonde EHP-200



Abbildung 27: Feldspulen zur Bestimmung einer 2D-Ansicht aller z-Komponenten der Feldverteilung im Spulenzwischenraum

### 3.3.6.4 Prüfkörper

Im Folgenden sind Abbildungen und Beschreibungen der Prüfkörper gegeben, die im Rahmen der Temperaturmessungen entsprechend der Testspezifikation aus Abschnitt 3.3.6.2 Anwendung finden. Abbildung 28 zeigt die wohldefinierten (eher künstlichen) Prüfkörper, Abbildung 29 zeigt alltägliche (eher realistische) Gegenstände, die jedoch durch leichte Veränderung in ihrer Zusammensetzung zu sehr unterschiedlichen Messergebnissen führen. Die Eigenschaften der Prüfkörper sind in Tabelle 11 beschrieben.

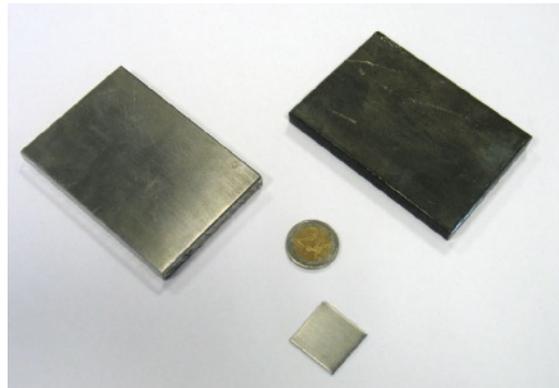


Abbildung 28: Prüfkörper Nummer 1, 2 und 3 für Temperaturmessungen



Abbildung 29: Prüfkörper Nummer 4, 5 und 6 für Temperaturmessungen

Prüfkörper	Material / Beschreibung
1	Metallplatte Baustahl S235JR+AR (ST37, warmgewalzt, Zunderoberfläche), Größe 100mm x 70mm x 10mm
2	Metallplatte Edelstahl WNr. 1.4301-X5CrNi18-10, Größe 100mm x 70mm x 10mm
3	2 EUR Münze (Ring: 75% Kupfer, 25% Nickel, Kern: Schichtung aus Messing und Nickel)
4	Kaugummipaper
5	Zigarettenschachtel (Hardpack bzw. Softpack mit aluminiumbeschichteter Folie)
6	Getränkedose aus Aluminium, Weißblech (Stahlblech mit Zinn-Oberfläche)

Tabelle 11: Eigenschaften der Prüfkörper

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

### 3.3.6.5 Testergebnisse

Die unter dem Abschnitt 3.3.6.2 beschriebene Testspezifikation wurde für das im Demonstratorfahrzeug integrierte Übertragungssystem durchgeführt. In diesem Bericht werden jedoch nicht alle Ergebnisse veröffentlicht, sondern nur die Ergebnisse, die eine Abweichung zu den in [VDE-AR-2011] beschriebenen Eigenschaften von Übertragungssystemen bedeuten.

Zum Einen ist das Ergebnis der Eigenschaften der Positionierungstoleranz relevant. Wie bereits in Abschnitt 3.3.5 zur Einparkstudie präsentiert, zeigt sich, dass die geforderte Toleranz von  $\pm 10$  cm aus [VDE-AR-2011] in jede horizontale Richtung (also 20 cm in Längsrichtung und 20 cm in Querrichtung) nicht eingehalten werden konnte. Mit Hilfe einer Definition zur Messung der Toleranz, wie sie in der Testspezifikation beschrieben ist, ergibt sich stattdessen, dass eine seitliche Toleranz von insgesamt 19 cm in Bezug auf den Wirkungsgrad und 15 cm in Bezug auf die Leistung erreicht wurde. Die Längstoleranz erstreckt sich über einen Bereich von mehr als 17 cm für den akzeptablen Wirkungsgradbereich und mehr als 17 cm für den akzeptablen Leistungsbereich. Eine Erklärung dafür ist in dem geringen Luftspalt zu finden, der zu einem kleineren Toleranzbereich führt. Da der geringe Luftspalt nur in diesem Demonstrator auftritt und in Serienfahrzeugen ein deutlich größerer Luftspalt angewendet wird, ist damit zu rechnen, dass der geforderte Toleranzbereich eingehalten werden kann.

Zum Anderen wurde bei der Temperaturmessung eine laut [VDE-AR-2011] definierte Grenztemperatur für Prüfkörper im Zwischenraum überschritten. Dies wurde mit Prüfkörper 1 (magnetischer Stahl S235 JR der Größe von 100 x 70 x 10 mm) erreicht. Dabei hat der Prüfkörper die Grenztemperatur von 60 °C nach einem Zeitraum von 5 Minuten überschritten, ausgehend von einer Umgebungstemperatur von 30 °C. Eine neue Auslegung von Primär- und Sekundärplatte und der positive Effekt auf die Temperaturmessungen wurde bereits von der Firma Vahle in Abschnitt 3.2.1.4 erläutert. Es scheint wahrscheinlich, dass für zukünftige Auslegungen ein Bestehen der Temperaturtests möglich ist.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

### 3.4 Integration in ein PlugIn-Hybridfahrzeug (Volkswagen)

Dieser Abschnitt umfasst die Ergebnisse des von der Volkswagen Konzernforschung bearbeiteten Arbeitspakets 3:

- AP3.1: Mechanische Integration
- AP3.2: Elektrische Integration
- AP3.3: Kommunikationsanbindung
- AP3.4: Inbetriebnahme der Demonstratoren.

#### 3.4.1 Mechanische Integration

Im Rahmen des Projektes hat die Konzernforschung der Volkswagen AG ein bestehendes Plug-In Hybridfahrzeug mit einer kontaktlosen Ladeeinrichtung ausgerüstet. Es handelt sich hierbei um ein Fahrzeug, dargestellt in Abbildung 30, dessen Antriebstechnologie im Rahmen des „Flottenversuch Elektromobilität“ zum Einsatz kommt.



Abbildung 30: PlugIn-Hybridfahrzeug

Die Antriebstechnologie dieses PlugIn-Hybridfahrzeugs ermöglicht sowohl rein elektrischen Betrieb als auch verbrennungsmotorischen Betrieb. Daraus ergeben sich gegenüber einem reinen batterieelektrischen Fahrzeug zusätzliche Randbedingungen, die beachtet werden müssen. Das sind im Wesentlichen Temperatureinflüsse der Abgasanlage und mechanische Beanspruchung durch Vibration vom Verbrennungsmotor übertragen durch die Karosserie.

Im Rahmen des Projekts wurde sowohl für das batterieelektrische Fahrzeug (Audi) als auch für das PlugIn-Hybridfahrzeug das gleiche Konzept für das kontaktlose Übertragungssystem angewendet, dargestellt in Abbildung 31. Bereit im Rahmen der Spezifikation der zum kontaktlosen Laden nötigen Komponenten wurden die magnetischen und elektrischen Randbedingungen diskutiert. Hierbei wurde sich auf eine Anlehnung an die Prämissen des DKE/VDE Arbeitskreises (AK 353.0.1) und der dort entstandenen Anwendungsregel geeinigt.

Damit ergibt sich für die am Fahrzeugunterboden zu montierende Sekundärspule, genannt Pick-up, eine Fläche von 800 mm x 800 mm, welche zu einer Überdeckung des Abgasstrangs führt und somit die thermischen Randbedingungen stark beeinflusst.

Neben dem Pick-up war die thermische, mechanische und elektrische Integration der erforderlichen Komponenten Kompensation, Gleichrichter und Ladegerät zu realisieren. Da der im Fahrzeug vorhandene Bauraum für diese Komponenten sehr begrenzt ist und diese zusätzliche systembedingte Anforderungen mit sich bringen, musste hier ein Kompromiss zwischen technischer Machbarkeit und Sicherheit gefunden werden.

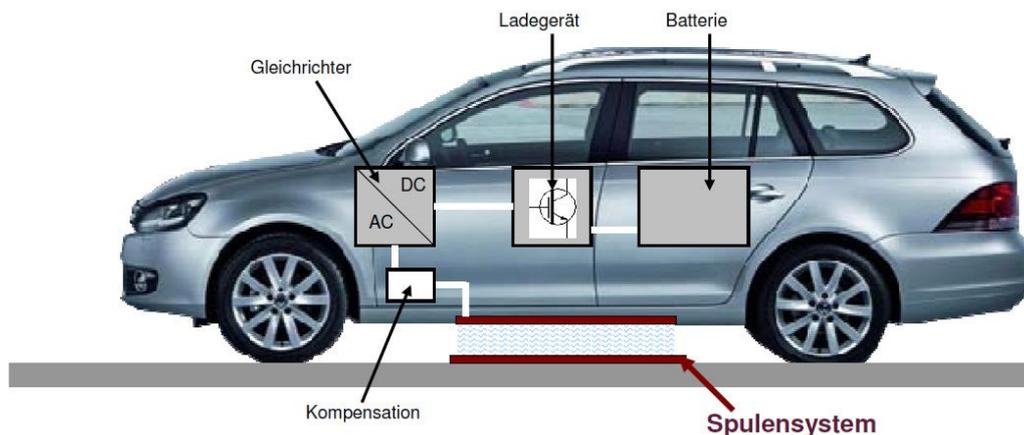


Abbildung 31: Konzept für die Fahrzeugintegration inklusive der im Fahrzeug erforderlichen Komponenten

Hierzu wurden zunächst die elektrischen Parameter des Ladesystems festgelegt, so dass unter Einhaltung geltender Standards die geforderte Ladeleistung ins Fahrzeug übertragen werden kann. Anschließend wurden umfangreiche Bauraum- und Packageuntersuchungen durchgeführt, um eine geeignete Platzierung und Montage des Sekundärteils sicherzustellen.

Dazu wurden nach der Spezifikation der thermischen Randbedingungen, hauptsächlich hervorgerufen durch die Abgasanlage, und der mechanischen Randbedingungen, mechanische Schwingungen und mechanische Schocks, die z. B. beim Überfahren von Randsteinen auftreten können, in Frage kommende Bauräume identifiziert und beurteilt. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist in Abbildung 32 dargestellt.

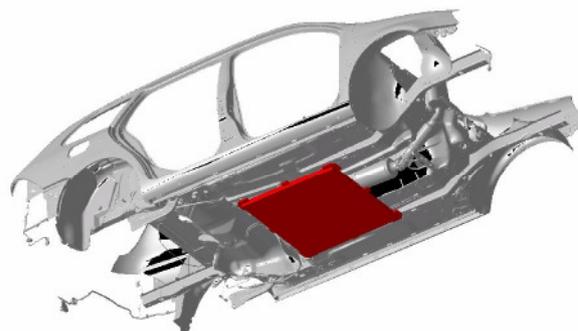


Abbildung 32: Einbausituation für den Pick-up am Unterboden des PlugIn-Hybridfahrzeugs

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Der Pick-up wurde, konform zur Anwendungsregel, bezüglich Längs- und Querrichtung in der Mitte des Fahrzeugs angeordnet. Unter Berücksichtigung einer möglichen Erwärmung der Abgasanlage auf über 100 °C und der im Fahrbetrieb auftretenden Bewegung der Abgasanlage wurde ein Mindestabstand zwischen Abgasanlage und Pick-up definiert.

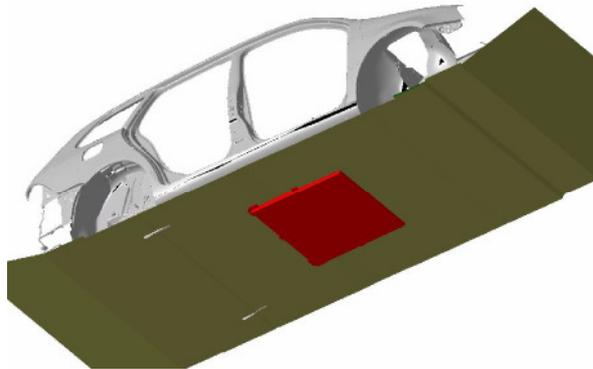


Abbildung 33: Verletzung der Bodengrenzfläche

Daraus ergibt sich für die Bodenfreiheit eine nicht zu vernachlässigende Einschränkung, siehe Abbildung 33. Die Bodengrenzfläche wird verletzt. Dies ist im Rahmen einer prototypischen Darstellung durchaus vertretbar, für ein Serienfahrzeug jedoch nicht zulässig. Zukünftige Konzepte für kontaktlose Energieübertragungssysteme sollten diese Voraussetzungen in der Unterbodengeometrie berücksichtigen.

Für die Komponenten Gleichrichter und Kompensation gelten die gleichen Randbedingungen bezüglich Temperatur und Mechanik, wie für den Pick-up auch. Genau wie dort war ein ausreichender Abstand zur Abgasanlage vorzusehen. Zusätzlich ergeben sich aufgrund der Unterbodengeometrie und der dort bereits vorhandenen Komponenten, wie z. B. die Kraftstoffleitung weitere Bauraumbedingungen.

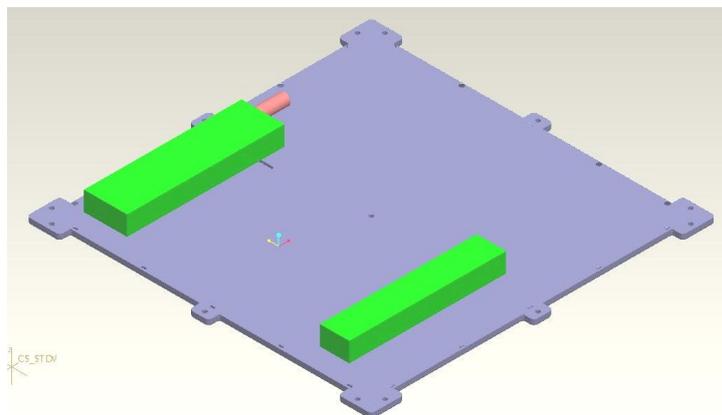


Abbildung 34: CAD-Modell des Pick-ups mit aufgesetzten Gehäusen für Gleichrichter und Kompensation

Daher wurde für die mechanische und elektrische Integration der Komponenten Kompensation und Gleichrichter eine Variante gewählt, bei der diese Bauräume aufgeteilt und seitlich neben der Abgasanlage zwischen den

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Längsträgern auf der Oberseite des Pick-ups angebracht werden. In Abbildung 34 ist ein CAD-Modell der gewählten Lösung dargestellt.

Mit dieser Variante wird eine unter den gegebenen Randbedingungen gute Anpassung an die Unterbodenstruktur des Fahrzeugs und an die dort vorherrschenden thermischen Randbedingungen erreicht. Der definierte Bauraum befindet sich in einem ausreichenden Abstand zur Abgasanlage des PlugIn-Hybridfahrzeugs, so dass die für die elektronischen Bauteile die maximal zulässigen Temperaturen eingehalten werden. Weiterhin wird durch diese Anordnung sichergestellt, dass der Abstand zwischen Pick-up und Gleichrichter die das hochfrequente Signal führenden Leitungen so kurz wie möglich gehalten und somit EMV-Emissionen reduziert werden.

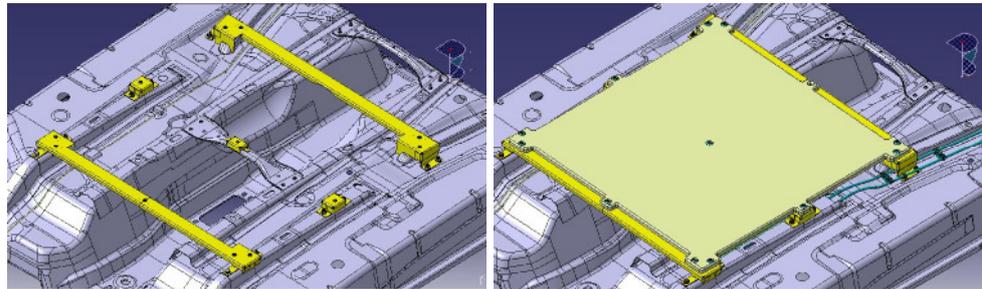


Abbildung 35: Konstruktion der mechanische Halter und Befestigung des Pick-up am Fahrzeugunterboden

Die Konstruktion der mechanischen Halter wurde unter Ausnutzung der bestehenden Unterbodengeometrie ausgeführt. Hierbei waren hauptsächlich mechanische Randbedingungen wie mechanische Schwingungen und Schock zu berücksichtigen. Dieses einfache Konzept, dargestellt in Abbildung 35, lässt sich auch auf andere Fahrzeugplattformen übertragen. Der Pick-up wird mittels Schraubverbindungen an diesem Halter befestigt.

### 3.4.2 Elektrische Integration

Zur elektrischen Integration des kontaktlosen Batterieladesystems gehört neben der Verlegung der HV-Leitungen und der Sicherstellung der geltenden Vorschriften auch die Integration weiterer elektronischer Komponenten.

Für die elektrische Integration des induktiven Ladestrangs wird ein Laderegler benötigt, der Strom und Spannung an den jeweiligen Arbeitspunkt der Batterie anpasst. Dieser Laderegler dient als Schnittstelle zwischen dem kontaktlosen Energieübertragungssystem und dem Fahrzeug.

Hierzu wurde ein herkömmliches Ladegerät gewählt und für das kontaktlose Laden adaptiert. Es handelt sich hierbei um einen A-Musterstand.

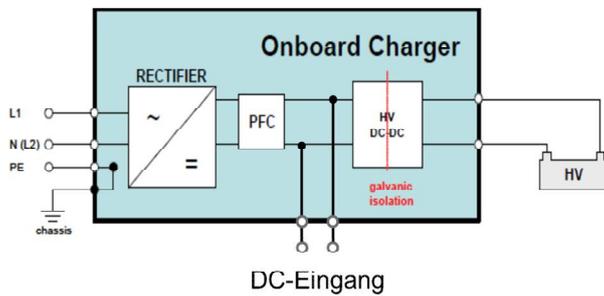


Abbildung 36: Laderegler mit zusätzlichem DC-Eingang für den Anschluss des kontaktlosen Energieübertragungssystems

Abbildung 36 zeigt dieses Ladegerät bestehend aus Gleichrichter, PFC-Stufe und Gleichspannungswandler. Für diesen Laderegler wurde ein zusätzlicher Eingang geschaffen, um direkt hinter der PFC-Stufe in den Gleichspannungszwischenkreis des Ladegeräts einzukoppeln. Damit umgeht man den Gleichrichter und die PFC-Stufe und spart an dieser Stelle die Verluste.

Dieser Laderegler wurde mechanisch und elektrisch in das Fahrzeug integriert. Da er über eine Wasserkühlung verfügt, wurde eine entsprechende Leitung an den bestehenden Kühlkreislauf des PlugIn-Hybridfahrzeugs angeschlossen. Darüber hinaus wurden eine Ansteuerung der Kühlwasserpumpe bei Stillstand des Fahrzeugs und die nötige Versorgung dieser Pumpe aus dem 12V-Bordnetz umgesetzt.

### 3.4.3 Kommunikationsanbindung

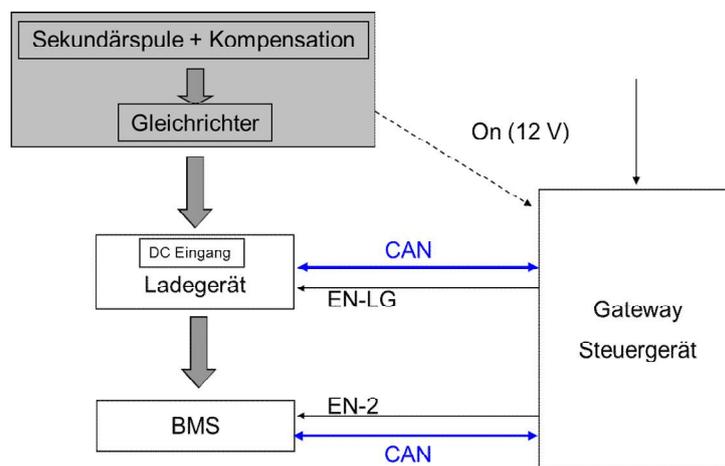


Abbildung 37: Realisierte Ladestruktur des PlugIn-Hybridfahrzeugs unter Einbindung des Kontaktlosen Ladesystems

Das Konzept zur Anbindung des kontaktlosen Ladesystems an das Batteriemangementssystem (BMS) des Fahrzeugs wird in Abbildung 37 dargestellt. Die Spannungsregelung wird von dem Ladegerät, welches einen von außen zugänglichen DC-Zwischenkreis bereitstellt, realisiert. Des Weiteren beinhaltet das Kommunikationskonzept die Steuerung der Ladeschütze (EN2), eine vom Ladegerät zu realisierende Überwachung der HV-Bordnetzspannung und die Initialisierung des Ladevorgangs On(12V). Ursprünglich sollte dieses Signal durch das kontaktlose Ladesystem bereitgestellt werden. Realisiert ist es im Fahrzeug durch einen vom Fahrer zu

bedienenden Schalter, so dass es sich hier nicht um einen vollautomatischen Prozess handelt. Der Ladevorgang selbst wird durch Vorgaben vom BMS gesteuert.

Die Anbindung der CAN-Kommunikation dieses Ladereglers an die Kommunikationsstruktur des Fahrzeugs erfolgte nach VW- Standard. Die Inbetriebnahme wurde über Software-Tools durchgeführt. Dazu wurde die bestehende Software um die CAN-Kommunikation zum BMS und die erforderlichen Diagnose- und Sicherheitsfunktionen erweitert. Die Definition der CAN Matrix wurde auf die Erfordernisse des Ladesystems angepasst.

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation ist in AP1 nicht spezifiziert worden, da die Diskussionen im DKE Arbeitskreis noch nicht abgeschlossen sind und die Ergebnisse erst vorliegen sollten. Aus diesem Grund ist keine technische Umsetzung erfolgt und ein Nachweis im Fahrzeug nicht möglich.

### 3.4.4 Inbetriebnahme und Test des Demonstrators

Die Inbetriebnahme des im Fahrzeug verbauten Systems beinhaltet die Sicherstellung der Grundfunktionalität der Ladekomponente und die Prüfung des Ladesystems. Sie wurde in zwei Schritten durchgeführt.

Im ersten Schritt wurde eine Inbetriebnahme ohne Ladegerät durchgeführt. Die Messungen dienten der Klärung der Fragestellung welchen Einfluss das Fahrzeug und insbesondere die Unterbodengeometrie des Fahrzeugs auf Ausgangsspannung und Ausgangsleistung des kontaktlosen Energieübertragungssystems nehmen. Abbildung 38 zeigt den Versuchsaufbau für diese Messungen.

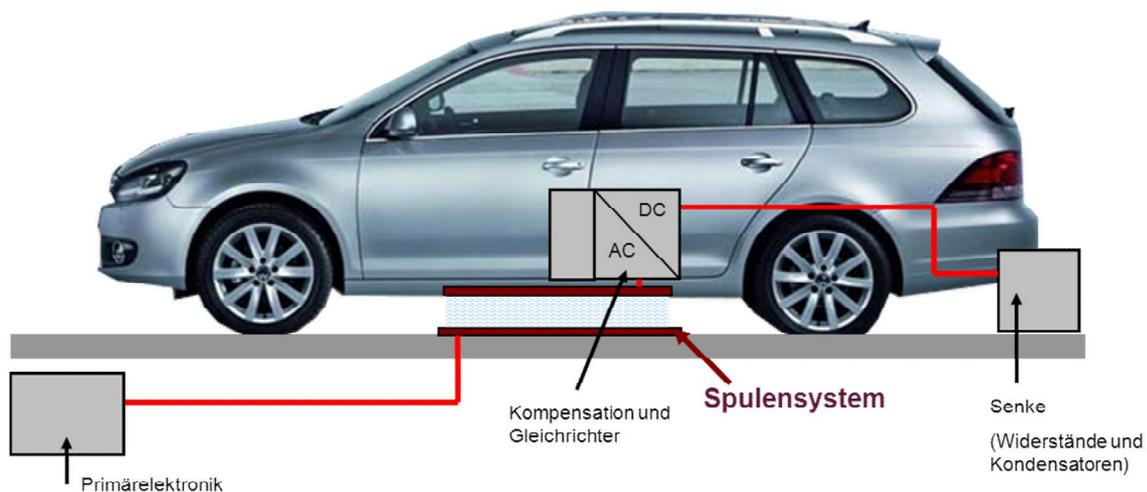


Abbildung 38: Erste Inbetriebnahme ohne Ladegerät – Versuchsaufbau

Das im Fahrzeug verbaute Spulensystem inklusive Kompensation und Gleichrichter wurde über die Primärelektronik mit Spannung versorgt. Als Senke diente eine Kombination aus Widerständen und Kondensatoren.

Die erste Messung wurde bei „Normluftspalt“ zwischen den Spulen durchgeführt. Für den PlugIn-Hybrid entspricht dieser 95 mm bis 100 mm

ohne Zuladung und 80 mm bei voller Beladung. Diese Messung ergab eine zu geringe Spannung von weniger als 200 V an der Senke. Daher wurde die Versuchsanordnung um eine Hebebühne erweitert und so der Luftspalt im Spulensystem variabel eingestellt.

Die Ergebnisse dieser Messungen sind:

- Luftspalt im Spulensystem < 70 mm
  - maximal übertragbare Leistung ohne PFC:  $P \approx 2,3 \text{ kW}$
  - maximal übertragbare Leistung mit PFC:  $P \approx 2,7 \text{ kW}$
- Luftspalt im Spulensystem > 90 mm
  - maximal übertragbare Leistung :  $P < 1 \text{ kW}$

Das zeigt, dass die übertragbare Leistung sehr stark luftspaltabhängig ist. Bei einem Luftspalt kleiner 90 mm sinkt die Spannung am Ausgang des Gleichrichters ( $U_{ZK}$ ) unter Last sehr stark. Nachfolgende Messungen werden dies noch einmal bestätigen. Die sich daraus ergebende mögliche Luftspaltvarianz für dieses System beträgt maximal +/- 20 mm.

Weiterhin zeigte sich bei diesen Messungen, dass der Einfluss des Fahrzeugunterbodens signifikant und höher als erwartet ist. In der Peripherie ergibt sich eine lastpunktabhängige Verlustleistung von bis zu 500 W.

Im zweiten Schritt erfolgte eine Inbetriebnahme mit Ladegerät. Aufgrund der Ergebnisse aus dem ersten Versuch wurde die Fahrzeugbatterie durch einen Batteriesimulator ersetzt (s. Abbildung 39). Dieser kann wahlweise als Quelle oder Senke eingesetzt werden. Für diesen Versuch wurde der Simulator als Senke mit einer konstanten Spannung von  $U_{HV} = 250 \text{ V}$  betrieben. Die Vorgabe des Sollstromes  $I_{HV}$  erfolgte über die Software des Ladegeräts.

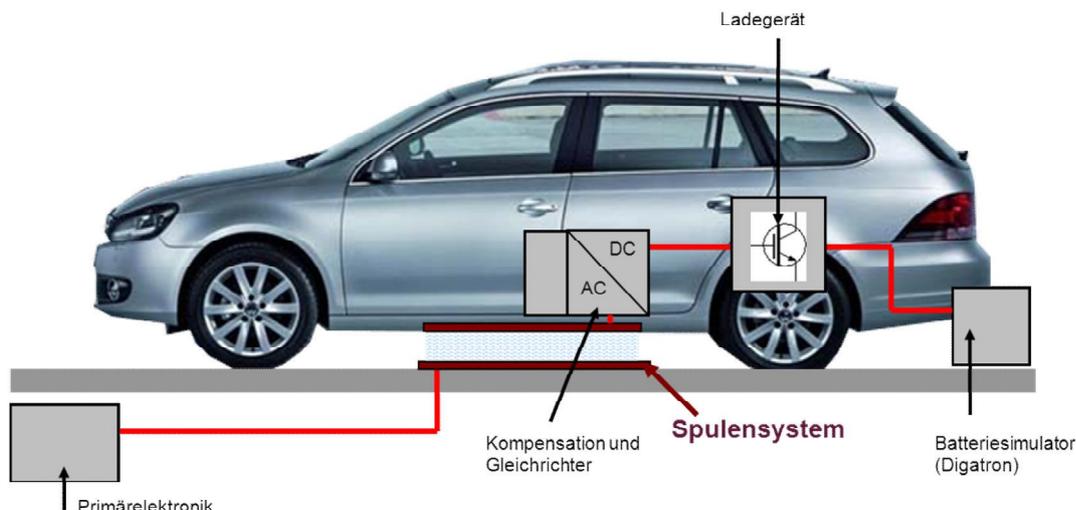


Abbildung 39: Inbetriebnahme mit Ladegerät - Versuchsaufbau im Batterielabor

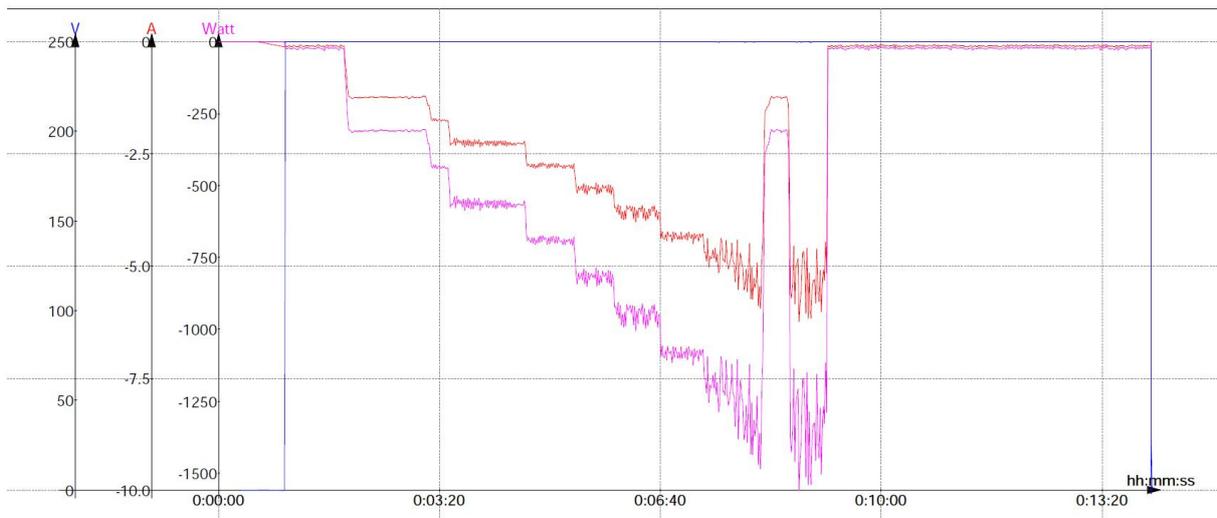


Abbildung 40: Messdatenprotokoll des Batteriesimulators: Spannung / V (blau); Strom / A (orange); Leistung / W (pink)

Abbildung 40 zeigt beispielhaft das Messdatenprotokoll des Batteriesimulators. Dargestellt sind Spannung, Strom und Leistung an der Schnittstelle zwischen Ladegerät und Batteriesimulator. Der Strom wurde stufenweise von 1 A bis auf 5 A erhöht. Somit konnte kurzzeitig eine Ladeleistung von etwa 1,2 kW erreicht werden.

Diese Leistung ist jedoch nur im kalten Zustand erreichbar. Sobald sich das System erwärmt hat, zeigt das kontaktlose Ladesystem das in Tabelle 12 dargestellte Verhalten.

Ausgangsstrom I <sub>HV</sub>	Ausgangsleistung P	Zwischenkreis- spannung am LG U <sub>ZK</sub>
0	0	195 V
0,75 A	190 W	175 V
1,25 A	300 W	160 V
2 A	0	< 50 V

Tabelle 12: Ausgangsstrom, Ausgangsleistung und Zwischenkreisspannung des erwärmten Systems

Nach Eingabe eines Sollstroms von  $I_{HV} = 2 \text{ A}$  sinkt die Zwischenkreisspannung am DC- Eingang des Ladegerät unter 50 V und der Laderegler schaltet ab.

Das im Projekt W-Charge umgesetzte Konzept des kontaktlosen Energieübertragungssystems über eine am Fahrzeugunterboden montierte Platte ist damit nach dem heutigen Stand für PlugIn-Hybridfahrzeuge nicht geeignet. Es zeigt zwar das Wirkprinzip, erreicht aber nicht alle gesteckten Ziele.

### 3.5 Systembewertung (IWES)

Insbesondere wenn Elektrofahrzeuge aus erneuerbaren Energien gespeist werden, können sie signifikant zu einer Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen beitragen. Zusätzlich können sie dazu genutzt werden die fluktuierende Energieerzeugung von Erneuerbaren Energien zu speichern und auszugleichen. Hierfür muss allerdings eine hohe Verfügbarkeit der elektrischen Fahrzeuge am Versorgungsnetz gewährleistet sein.

Aktuelle Feldversuche zeigen jedoch, dass viele Nutzer ihr Fahrzeug nur einstecken, wenn es für die nächste Fahrt notwendig ist und dass öffentliche Ladestationen nur selten genutzt werden [Weber2010]. Im Gegensatz dazu, kann beim kontaktlosen Laden erwartet werden, dass eine Netzanbindung immer hergestellt wird, wenn die dafür notwendige Ladeinfrastruktur zur Verfügung steht.

Abbildung 41 zeigt den Anteil ans Netz angeschlossener Fahrzeuge unter verschiedenen Ladeszenarien. Es wird jeweils unterschieden zwischen kabelgebundenem und kabellosen Laden sowie zwischen Laden nur zu Hause sowie Laden zu Hause und auf der Arbeit. Als Referenz (schwarz) ist das maximale Potential dargestellt, wenn die Fahrzeuge bei jedem Parken ans Netz angeschlossen würden.

Die Kurvenverläufe zeigen deutlich, welche Potentiale durch ein seltenes Anschließen ans Netz verloren gehen. Die maximale Verfügbarkeit von rund 50% aller Fahrzeuge beim kabelgebundenen Laden entspricht in etwa der minimalen Verfügbarkeit beim induktiven Laden. Wird bei jedem Parken zu Hause und auf der Arbeit geladen, kann stet eine Verfügbarkeit von mindestens 80% erreicht werden.

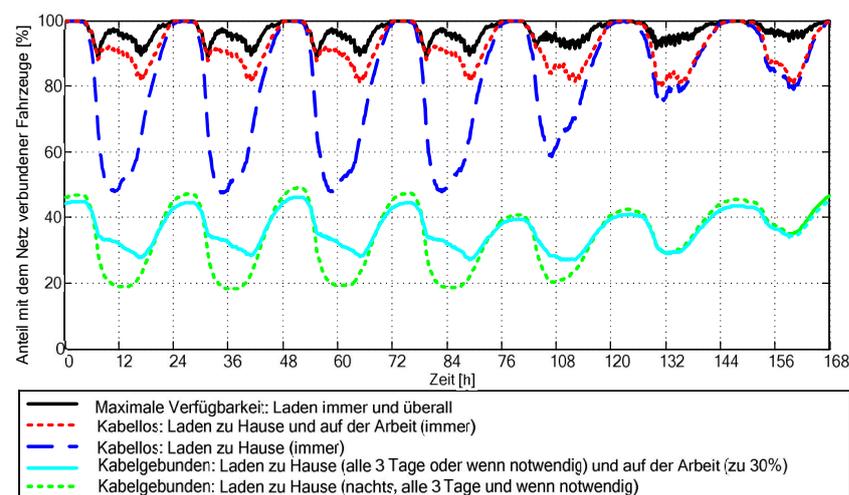


Abbildung 41: Anteil mit dem Netz verbundener Fahrzeuge unter verschiedenen Annahmen zur Ladehäufigkeit (basierend auf Mobilitätsdaten [MiD2008])

Im Folgenden wird ein zusammenfassender Vergleich zwischen kabelgebundenen und kabellosen Ladesystemen unter Berücksichtigung der wesentlichen Systemeigenschaften aufgestellt. Das induktive bzw. kabellose Laden wird bewertet aufgrund der Erkenntnisse aus diesem Projekt, den

Spezifikationen aus [VDE-AR-2011] sowie weiteren Informationen zum allgemeinen Entwicklungsstand des induktiven Ladens (vgl. hierzu Kapitel 5).

### Ladeleistung

Kabelloses Laden	Kabelgebundenes Laden
<p>maximale Anschlussleistung gemäß [VDE-AR-2011] und aktuellem Entwicklungsstand:</p> <p>AC 1-phasig (230 V, 16 A): 3,7 kW</p>	<p>mögliche Anschlussleistungen nach [VDE-AR-2009]:</p> <p>AC 1-phasig (230 V, 16 A): 3,7 kW</p> <p>AC 3-phasig (400 V, 16 A/ 32 A/ 63 A):</p> <p style="padding-left: 40px;">11,1 kW / 22,2 kW / 43,6 kW</p> <p>zusätzlich ist auch eine DC Schnellladung möglich, im Gespräch sind hier Ladeleistungen</p> <p>ab 40 kW bis zu 240 kW [CHADEMO] [IEC62196]</p> <p>bis 240 kW (600V, 400A) [IEC62196-1]</p>

Tabelle 13: Vergleich der Anschlussleistung von kabellosen und kabelgebundenem Laden

Kabelgebunden ist, abhängig von der Anschlussart (1-phasig, 3-phasig, DC) und der Absicherung, ein sehr weiter Ladeleistungsbereich möglich.

Induktives Laden ist vor allem aus sicherheitstechnischen Gründen (Zusammenhang: Baugröße-Frequenz-Felddichte) derzeit an eine verhältnismäßig niedrige Ladeleistung gebunden. Die Anschlussleistung entspricht hier der niedrigsten über Kabel. Von den technischen Möglichkeiten ist jedoch auch induktiv eine höhere Übertragungsleistung realisierbar. Eine Ladeleistung in Größenordnung der DC-Schnellladung ist allerdings nicht zu erwarten.

Um die Potentiale für eine höhere Ladeleistung über ein induktives Ladesystem zu erschließen, ist es notwendig, in zukünftigen Vorhaben genauer zu untersuchen, ob die elektromagnetischen Felder bei höherer Leistung bzw. kleinerer Primärspule und Pick-up in einem für Mensch und Umwelt kritischen Bereich liegen.

Eine niedrigere Ladeleistung ist zudem nicht zwingend als negativ zu bewerten. Zurzeit wird bspw. eine hohe Leistung auch als nachteilig für die Batteriebensdauer erachtet. Außerdem bedeuten hohe Ladeleistungen auch eine stärkere Belastung für das Stromnetz.

### Wirkungsgrad

Induktive Übertragungssysteme weisen (insbesondere im derzeitigen Prototypenstadium) einen deutlich geringeren Wirkungsgrad als das konduktive Laden auf. Nach derzeitigem Stand haben induktive Ladesysteme ca. 10% mehr Ladeverluste als kabelgebundenes Laden. Auch bei Ausschöpfung der noch vorhandenen Optimierungspotentiale ist ein vollständiges Erreichen der kabelgebundenen Effizienz nicht zu erwarten.

### Ladedauer

Die Ladedauer ist abhängig von der Ladeleistung und dem Wirkungsgrad der Ladeinfrastruktur.

	<i>Kabelloses Laden</i>	<i>Kabelgebundenes Laden</i>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Da häufiger geladen wird, ist jeweils eine geringere Lademenge und damit auch Ladezeit notwendig. Dies kann wegen der niedrigeren Entladetiefe einen positiven Einfluss auf die Batterielebensdauer haben.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abhängig von Netzanschluss, auch deutlich „schnelleres“ Laden möglich</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bei gleichem Ladebedarf ist wegen der geringeren Anschlussleistung und des Wirkungsgrads eine längere Ladedauer als mit Kabel notwendig (in etwa vergleichbar mit 1-phasigem kabelgebunden Laden)</li> </ul>	

Tabelle 14: Vor- und Nachteile des kabellosen sowie kabelgebundenen Ladens in Bezug auf die Ladedauer

Da Fahrzeuge in der Regel über ihre Nutzungsdauer nur 5% der möglichen Fahrtzeit bewegt werden [Wietschel2009] und somit potentiell 95% des Tages am Netz angeschlossen sein können, ist eine längere Ladezeit durch geringere Ladeleistung als nicht stark negativ zu erachten.

Einen deutlich positiven Effekt hätte lediglich eine Ladedauer entsprechend der DC-Schnellladung, so dass man auch längere Strecken mit nur einer kurzen Unterbrechung zum Laden überbrücken könnte.

### Sicherheit

	<i>Kabelloses Laden</i>	<i>Kabelgebundenes Laden</i>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine freiliegenden Kontakte</li> <li>Unabhängig von Witterungsbedingungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Keine signifikanten elektromagnetischen Felder</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Feldstärke muss Sicherheitskriterien entsprechen und validiert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herumhängende Kabel im (halb-)öffentlichen Raum</li> <li>Möglichkeit von freiliegenden Kontakten (z.B. bei defekten Kabeln)</li> <li>Kriechströme bei Nässe</li> <li>Vandalismus</li> </ul>

Tabelle 15: Vor- und Nachteile des kabellosen sowie kabelgebundenen Ladens in Bezug auf die Sicherheit

Die Sicherheit des induktiven Ladens bezüglich freiliegender Kontakte (durch z.B. defekte Kabel, Vandalismus) und Stolperfallen ist als stark vorteilhaft gegenüber dem kabelgebundenen Laden einzuschätzen.

Die Sicherheitsaspekte sind im Fall des induktiven Ladens jedoch noch nicht abschließend einzuschätzen und bedürfen insbesondere hinsichtlich der Einflüsse der elektromagnetischen Felder grundlegender Untersuchungen in weiteren Vorhaben.

### **Komfort und Nutzerfreundlichkeit**

	<b>Kabelloses Laden</b>	<b>Kabelgebundenes Laden</b>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automatischer Ladebeginn ohne Eingriff des Nutzers</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hohe Enparkgenauigkeit nicht relevant</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genaueres Einparken notwendig</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zeitaufwändige Steckvorgänge (insbesondere lästig bei Zeitdruck und schlechten Witterungsverhältnissen)</li> <li>• Verschmutzte, nasse und eingefrorene Kabel</li> </ul>

Tabelle 16: Vor- und Nachteile des kabellosen sowie kabelgebundenen Ladens in Bezug auf den Komfort und die Nutzerfreundlichkeit

Hinsichtlich des Komforts und der Nutzerfreundlichkeit ist eindeutig eine positive Bilanz des induktiven Ladens zu ziehen, allerdings unter der Voraussetzung, dass ein geeignetes Enparkassistenzsystem vorliegt, welches ein einfaches und genaues Einparken ermöglicht. Alternativ wäre auch ein induktives Übertragungssystem hilfreich, welches toleranter gegen stärkeren Spulenversatz ist.

### **Kompatibilität**

Beim induktiven wie auch beim kabelgebundenen Laden sind noch keine Standards zur Sicherstellung der Kompatibilität der Systeme verschiedener Hersteller abschließend definiert worden. In beiden Fällen ist die Standardisierung jedoch in Arbeit. Da das kabelgebundene Laden schon länger im Fokus steht, sind hier die Arbeiten bereits weiter fortgeschritten.

Ohne Kompatibilität zwischen Systemen unterschiedlicher Hersteller sind höhere Investitionskosten in die Infrastruktur, Verunsicherung der Kunden und damit keine weite Verbreitung zu erwarten (bestenfalls Nischenanwendungen).

Die Standardisierung der Steckerlösung (Kabel), die immer noch nicht abgeschlossen ist, zeigt, dass dies ein langwieriger und schwieriger Prozess ist, welcher daher frühzeitig und zielgerichtet von allen Beteiligten geführt werden muss.

### Netzintegration

	<i>Kabelloses Laden</i>	<i>Kabelgebundenes Laden</i>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Netzanbindung unabhängig vom Nutzerverhalten</li> <li>• Netzkopplung kann immer bei Verfügbarkeit des Ladesystems angenommen werden</li> </ul>	
<b>Nachteile</b>		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Netzanbindung abhängig von Nutzerverhalten (z.B. nur wenn Laden für nächste Fahrt notwendig ist)</li> <li>• Geringere Verfügbarkeit am Netz (unvorteilhaft für Lade- und Rückspeisemanagement)</li> </ul>

Tabelle 17: Vor- und Nachteile des kabellosen sowie kabelgebundenen Ladens in Bezug auf die Netzintegration

Mit der Zielsetzung, dass Elektrofahrzeuge möglichst aus erneuerbaren Energien geladen werden sollen und zukünftig Aufgaben wie Speicherung und Glättung der fluktuierenden Erzeugung übernehmen sollen, ist eine möglichst häufige und lange Netzanbindung notwendig.

Aufgrund des höheren Ladekomforts und der größeren Unabhängigkeit vom Nutzerverhalten kann bei kabellosem Laden eine deutlich höhere Verfügbarkeit der Elektrofahrzeuge am Stromnetz erwartet werden.

### Kosten

	<i>Kabelloses Laden</i>	<i>Kabelgebundenes Laden</i>
<b>Vorteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufgrund des geringeren Verschleiß und der Vandalismussicherheit ist eine höhere Lebensdauer der Ladeinfrastruktur zu erwarten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bei Ladung an der haushaltsüblichen Steckdose sind keine zusätzlichen Investitionskosten für die Infrastruktur (ohne Berücksichtigung von Kommunikationstechnik) notwendig.</li> </ul>
<b>Nachteile</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eine genaue Abschätzung der Herstellungskosten für ein induktives Ladesystem in großen Stückzahlen ist im jetzigen Prototypenstadium noch nicht möglich. Es ist jedoch zu erwarten, dass die Investitionskosten deutlich höher liegen als bei kabelgebundenem Laden (vgl. [Kley2011]).</li> <li>• Höhere Ladeverluste führen zu geringfügigen Mehrkosten im Betrieb.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Insbesondere im (halb-) öffentlichen Raum fallen neben den Infrastrukturkosten (Ladesäule etc.) zusätzliche Betriebskosten durch Vandalismus und Verschleiß an.</li> </ul>

Tabelle 18: Vor- und Nachteile des kabellosen sowie kabelgebundenen Ladens in Bezug auf die Kosten

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Beim einfachen Laden an der Haushaltssteckdose fallen für das Kabel nur geringfügige Investitionskosten an (für gesteuertes Laden ist allerdings eine Ladebox notwendig). Hier kann das induktive Laden aus wirtschaftlicher Sicht nicht mithalten.

Im (halb-)öffentlich Raum hingegen ist für das kabelgebundene Laden die Errichtung von Ladeinfrastruktur in Form von Ladesäulen notwendig. Hinzu kommen Erdarbeiten und der Anschluss an das lokale Versorgungsnetz. Durch Vandalismus und Verschleiß entstehen über die Betriebsdauer zusätzliche Mehrkosten. Mit diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass sich hier die Mehrkosten für ein induktives Übertragungssystem rechnen können.

Das Kosten aus Sicht des Nutzers/Verbrauchers nicht immer der ausschlaggebende Grund für eine Kaufentscheidung sind, zeigen beispielsweise Sonderausstattungen von Fahrzeugen wie Sitzheizung, Standheizung, Tempomat etc. die trotz zusätzlicher Investitionskosten von vielen Nutzern rein aus Komfortgründen gewählt werden.

### ***Abschließende Betrachtung***

Dieser Vergleich zeigt, dass beide Technologien ihre Vor- und Nachteile aufweisen. Ein viel diskutierter Aspekt ist der Wirkungsgrad. Dieser liegt beim kabellosen noch deutlich unter dem vom konduktiven Laden. Insbesondere hinsichtlich der allgegenwärtigen Forderung nach immer effizienteren Technologien scheint dies zunächst ein Rückschritt. Das Optimierungspotential zur Effizienzsteigerung beim induktiven Laden ist jedoch noch nicht ausgeschöpft.

Außerdem: Erreicht man durch die kabellose Ladetechnologie eine stärkere Verbreitung und Marktdurchdringung von Elektrofahrzeugen, hat dies auch einen positiven Einfluss auf die Unabhängigkeit von fossilen Energieträgern und führt beim Laden aus erneuerbaren Energiequellen zu einer stärkeren Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Neben diesem Aspekt bestehen auch Unwägbarkeiten, die derzeit noch nicht vollständig abgeschätzt werden können, wie bspw. die Kosten sowie der Einfluss der elektromagnetischen Felder auf Mensch und Umwelt.

Entscheidende Vorteile des kabellosen Ladens liegen in der komfortablen und einfachen Netzanbindung ohne notwendigen Nutzereingriff. Dies ermöglicht eine häufige Kopplung mit dem Stromnetz für ein gezieltes Lademanagement. Für den Einsatz im (halb-)öffentlichen Raum ist zudem der Wegfall von Ladesäulen und Kabeln aus sicherheitstechnischen Gründen ein wichtiger Schritt.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

### 3.6 Zusammenfassung

#### ***Audi Electronics Venture***

Im Rahmen des Förderprojektes W-Charge wurde ein Demonstrator mit einem kontaktlosen Energieübertragungssystem ausgestattet. Mit diesem System ist es möglich, eine Leistung von über 2 kW in die Batterie zu laden, und zwar ohne Verwendung eines Ladekabels. Es konnte gezeigt werden, dass mit dem kontaktlosen Laden eine komfortable Kundenfunktion ermöglicht wird, die einen Komfortgewinn im Vergleich zum kabelgebundenen Laden bedeutet.

Zusätzlich konnten Messverfahren erarbeitet und eingesetzt werden, die eine Performance-Analyse und eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systeme ermöglicht. Ebenso wurden Studien zum Einparkvorgang durchgeführt, deren Ergebnisse Anforderungen an Übertragungssysteme und notwendige, zukünftige Entwicklungsschwerpunkte aufzeigen.

#### ***Fraunhofer IWES***

Das kontaktlose Laden stellt neue Anforderungen an die fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur. Der im Projekt W-Charge entwickelte Prototyp für die fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur ermöglicht neben der 1-phasigen und 3-phasigen Ladung über Kabel auch das Laden durch Anbindung einer induktiven Übertragungsstrecke. Zusätzlich kann die Energie ins Niederspannungsnetz zurückgespeist werden. Durch die Nutzung der gleichen Leistungshalbleiter und Induktivitäten für die unterschiedlichen Energiewandlungen, lassen sich Platzbedarf, Gewicht und Kosten reduzieren.

Zusätzlich wurde ein Teststand entwickelt, der die Durchführung reproduzierbarer Messungen an einem induktiven Energieübertragungssystem bei Versatz des Pick-ups über der Primärspule im 3-dimensionalen Raum ermöglicht.

Als Projektkoordinator hat das Fraunhofer IWES zudem regelmäßige Konsortialtreffen organisiert und Telefonkonferenzen zur Abstimmung durchgeführt. Zusätzlich wurde die Verbreitung der Projektergebnisse durch verschiedene Publikationen veranlasst.

#### ***Paul Vahle GmbH***

Seit mehr als 12 Jahre liefert VAHLE industrietechnische Anlagen auf Basis einer Festfrequenz von 20 kHz. Der Schritt von dieser Technik hin zu einem die Frequenz nachführenden System gekoppelt mit einer 7-fach höheren Systemfrequenz war deutlich größer als bei Start des Projektes abzusehen war.

Die prinzipiellen Schwierigkeiten konnten aber überwunden werden. Somit steht am Ende eine speisende Leistungselektronik für den erforderlichen Frequenzbereich zur Verfügung, die im Labor nachgewiesener Maßen einen effizienten Betrieb gewährleistet. Der magnetische Kreis mit seinen primären und sekundären Komponenten konnte umgesetzt werden. Sein Einfluss auf die Ausgangsseite als auch die Rückwirkung auf die speisende Elektronik konnten ermittelt werden.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

Im Projekt konnte aus verschiedenen Gründen, die nicht alle bei den beteiligten Projektpartnern lagen, nicht alle geplanten Maßnahmen an den Fahrzeugen umgesetzt werden. Die Einbauten zeigten aber verschiedene Punkte auf, die in die Weiterführung der Entwicklung einfließen werden. Dies betrifft die mechanische Anordnung am Fahrzeug, den Einfluss der Fahrzeugkarosserie auf den magnetischen Kreis, die elektrische und steuerungstechnische Schnittstelle zum Ladegerät sowie das Systemverhalten als Gesamtes.

Letztlich bewiesen die praktischen Aufbauten, dass der im DKE-Arbeitskreis zu Grunde gelegte Ansatz, durch große Flächen und hohe Frequenz die Sicherheitsfrage von unzulässiger Erwärmung ohne Einsatz von Überwachungssensorik zu lösen, umsetzbar und realistisch ist.

### **Volkswagen AG**

Es wurde ein PlugIn-Hybridfahrzeug mit einem kontaktlosen Ladesystem ausgerüstet.

Das im Projekt W-Charge umgesetzte Konzept des kontaktlosen Energieübertragungssystems über eine am Fahrzeugunterboden montierte Platte ist nach dem heutigen Stand für PlugIn-Hybridfahrzeuge nicht geeignet. Es zeigt zwar das Wirkprinzip, erreicht aber nicht alle gesteckten Ziele:

- Verletzung der Bodengrenzfläche (thermische und mechanische Randbedingungen resultierend aus der Abgasanlage)
- Einfluss der Unterbodengeometrie führt zu zusätzlichen Verlusten von bis zu 500 W
- Wirkungsgrad und übertragbare Leistung (max. 2 kW) der dargestellten Lösung genügen nicht den Anforderungen
- die Kommunikation zwischen Ladestation und Fahrzeug ist nicht realisiert

Die Anwendungsrichtlinien aus dem DKE – GAK sind zu diskutieren. Spezifische Anforderungen, die Streufelder und Unterbodengegebenheiten berücksichtigen sind zu erarbeiten.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

## 4 Darstellung wesentlicher Abweichungen zum Arbeitsplan

Die Zuwendungsbescheide zum Vorhaben W-Charge gingen Ende März 2010 bei den Projektpartnern ein und galten rückwirkend zum offiziellen Projektstart am 1. Januar 2010. Das Vorhaben unterlag aus diesem Grund bereits in der Anfangsphase einer Zeitverzögerung von ca. drei Monaten gegenüber der Antragsstellung.

Bezogen auf den vorgesehenen Arbeitsplan ist das Projekt dennoch in den überwiegenden Arbeitspaketen erfolgreich zum Ziel gebracht worden.

Aufgrund von Verzögerungen in der Hardwareentwicklung der induktiven Ladeinfrastruktur haben sich jedoch die darauf aufbauenden Meilensteine zusätzlich nach hinten verschoben. Dies betraf insbesondere den Zeitpunkt der Integration in die Fahrzeuge und den Teststand. Damit ergab sich eine verkürzte Zeitspanne zur Erprobung des gesamten Systems.

Die grundlegenden Funktionalitäten wurden zwar in Laborumgebung sowie auch im Fahrzeug integriert gezeigt, allerdings konnte die Erprobung und Messungen speziell unter praxisnahen Bedingungen nicht vollständig im Rahmen des Vorhabens durchgeführt werden.

## 5 Vergleich der Projektergebnisse zum internationalen Stand der Technik

Internationaler Stand der Technik für das Laden von Elektrofahrzeugen ist die Verwendung von Stromkabeln mit entsprechenden Stecksystemen, wofür die Standardisierung schon in sichtbare Reichweite gerückt ist. Das kontaktlose Laden von Elektrofahrzeugen hingegen ist erst in jüngster Vergangenheit in die Forschungs- und Entwicklungsthemen im Bereich der Elektromobilität aufgenommen worden.

Die induktive Energieübertragung wird heute bereits kommerziell im industriellen Bereich eingesetzt. Hier ist sie bei Anwendungen in der Automatisierungstechnik und Fabrikausstattung standardmäßig weit verbreitet. Aber auch im Personentransport, insbesondere im ÖPNV beim Einsatz von Elektrobussen, gibt es bereits erste Umsetzungen und Erfahrungen im öffentlichen Raum.

Für den privaten PKW Bereich bestand insbesondere zu Beginn des Vorhabens W-Charge noch keine kommerzielle Umsetzung des kontaktlosen Ladens. Verschiedene Unternehmen und Forschungsinstitute führten jedoch in den letzten Jahren Untersuchungen und Entwicklungen in diesem Bereich durch. Derzeit werden bereits die ersten Produkte für die kontaktlose Energieübertragung zum Laden von Elektrofahrzeugen beworben [Witricity] [SEW] [Plugless-Power].

Eine Übersicht aktueller Umsetzungen des kontaktlosen Ladens im Personenverkehr im Vergleich zu der in W-Charge entwickelten Lösung ist in Tabelle 19 dargestellt.

Ältere Entwicklungen im Einsatz von Bussen basieren vorwiegend auf einer niedrigeren Übertragungsfrequenz von 20 kHz und sind mit absenkbaaren Pick-up-Spulen ausgestattet, um den Luftspalt zu reduzieren. Bei den neueren Entwicklungen wird gezielt auf eine Vermeidung von mechanischen Komponenten zur Minimierung der Verschleißanfälligkeit geachtet. Die Arbeitsfrequenz liegt hier bei rund 140 kHz.

Die auffälligen Gemeinsamkeiten der Lösungen im Pkw-Bereich liegen insbesondere in der übertragbaren Leistung von rund 3 kW sowie dem angegebenen Wirkungsgrad von etwa 90%. Jedoch liegt gerade beim Wirkungsgradvergleich der unterschiedlichen Systeme eine Schwierigkeit vor: Es ist in keinem der Beispiele angegeben, in welchem Arbeitspunkt dieser Wert erreicht wird und über welchen Teil der Ladestrecke er gemessen wurde (bspw. vom Netzanschluss bis Batterieklemme oder nur über den Luftspalt von Eingang Primärspule bis Ausgang Sekundärspule). Aus diesem Grund lassen sich die angegebenen Effizienzen nicht sinnvoll miteinander vergleichen. Zusätzlich sind manche Informationen mit Vorsicht zu genießen, da es sich bei den Quellen teilweise um Werbebroschüren handelt, welche unter Umständen beschönigende Angaben machen. Es kann daher keine fundierte Aussage darüber getroffen werden, wie gut das W-Charge System

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

gegenüber anderen abschneidet. Insgesamt scheint es jedoch mindestens dem aktuellen internationalen Entwicklungsstand zu entsprechen.

Hinsichtlich der fahrzeugseitigen Infrastruktur zur Netzanbindung sind aktuell die meisten Elektrofahrzeuge mit einer kabelgebundenen 1-phasigen oder 3-phasigen Ladeelektronik ausgestattet. Weitere Entwicklungen und Forschungen bezüglich einer höheren Netzintegration und autarken Stromversorgung sollen zukünftig auch eine Rückspeisung ins öffentliche Niederspannungsnetz ermöglichen [Zeltner2011].

Die bisherigen Ladekonzepte bieten allerdings keine effektive Ankopplungsmöglichkeit von induktiven Energieübertragungssystemen. Im Vergleich dazu ermöglicht das in W-Charge entwickelte Labormuster für die fahrzeugseitige Ladeinfrastruktur eine kabelgebundene 1-phasige und 3-phasige Ladung sowie eine Ankopplung an eine induktive Energieübertragungsstrecke zur Laden der Fahrzeugbatterie. Außerdem ist auch eine Rückspeiseoption integriert. Hierbei werden für alle Leistungsflüsse dieselbe Leistungselektronik und Drosseln verwendet, was zu einer Reduzierung von Bauraum, Gewicht und Kosten führt.

System	Hersteller	Entwicklungsstand	Leistung/ Nennfrequenz	Wirkungsgrad	Abstand	achsiale Verschiebung	Abmaße Primär/Sekundär	sonstige Merkmale (Angaben laut Hersteller)
Busse mit Trailer „People Mover“ [Covic2000]	Univ. Auckland; Conductix- Wampfler	in Betrieb: Whakarewa- rewa, NZ Rotorua Nationalpark, 2000	20-30 kW/ 12,9 kHz	kA	50 mm	bis 5 cm	kA	erhöhte Primärspule
Busse zur Personenbeför- derung, IPT® [UniTennessee] [Wampfler]	Conductix- Wampfler	in Betrieb: Genua, 2003 Turin, 2003 Luzern 2004 Lörrach 2005	30 kW pro Spule/ 20 kHz	95%	3 cm max	kA	kA	absenkbarer Pick-up Ladung an Haltestellen, während Passagiere ein-/ aussteigen
Nissan [Techon]	Nissan, Showa Aircraft Industry, Japan	in Entwicklung, Testphase	1/10/30 kW/ 20 kHz	92%	10 cm	bis 5 cm	Spulengröße abhängig von Leistung	bereits in Elektrobussen getestet, Einsatz zukünftig in ZEV von Nissan
Plugless Power [Evatran]	Evatran, Virginia USA	4. Q. 2011: bis zu 10 Systeme in Fahrzeugtest geplant 2012: 20-30 weitere Testsysteme geplant	3,3 kW	90%	kA	kA	kA	erhöhte Primärspule, Parking-guidance für die letzten 3m
SEW [SEW]	SEW	„erhältlich ab Werk“	3 kW	> 90%	kA	kA	kA	konform zu [VDE-AR-2011]
WiT-3300 [Witricity]	WiTricity, USA	als Deployment Kit erhältlich	3,3 kW/ 145 kHz	90% bei 18 cm	10-20 cm	±20 cm seitlich ±10 cm längs	50x50x3,75 cm/ 50x50x3,75 cm	
W-Charge	Vahle, VW, AEV, IWES	Entwicklungssta- dium	3 kW/ 140 kHz	bis zu 90%	d=10 cm ± 5 cm	± 10 cm	100x100x2,5 cm/ 80x80x1,6 cm	in Anlehnung an [VDE-AR-2011]

Tabelle 19: Aktuelle Umsetzungen zur stationären kontaktlosen Ladung von Elektrofahrzeugen im Vergleich

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

## 6 Zukunftsaussichten und weiterer F&E-Bedarf

### 6.1 Verwertbarkeit und Nutzen

Im Rahmen des Förderprojektes W-Charge war es möglich, zwei Demonstratoren (ein rein batterieelektrisches Fahrzeug sowie ein PlugIn-Hybridfahrzeug) mit kontaktloser Energieübertragung auszustatten. Maßgeblich zur Zielerreichung hat die im GAK 353.0.1 zuvor geleistete Arbeit beigetragen, da die technische Umsetzung des Übertragungssystems an den in [VDE-AR:2011] beschriebenen Eigenschaften angelehnt ist. Ohne diese Vorarbeit wäre ein Konsens über die Eigenschaften des Übertragungssystems in der Spezifikation unter Umständen erst später erzielt worden. Mit dem entstandenen Konzept, welches unter der Prämisse der Interoperabilität mit Systemen anderer Hersteller und Einhaltung abgestimmter Schutzziele für den öffentlichen Raum entwickelt wurde, konnte erfolgreich das Wirkprinzip dargestellt werden. Die Erkenntnisse aus dem Projekt, auch bezüglich des Einflusses des Fahrzeugs auf das magnetische und elektrische Verhalten kontaktloser Energieübertragungssysteme, werden wesentlich dazu beitragen, hier die Entwicklung und Standardisierung voranzutreiben.

Besonderen Wert für die beteiligten OEMs hat die Testspezifikation, die zum Teil im Rahmen des Förderprojektes, zum Teil im Rahmen eigener Vorentwicklungsaktivitäten entstanden ist. Die Anwendung dieser Testspezifikation ermöglicht es mit relativ geringem Aufwand, eine Aussage über die Grundeigenschaften eines Übertragungssystems und über dessen erwartete Zulassungsfähigkeit zu bekommen. Weiterhin ermöglicht sie, verschiedene Systeme, zum Beispiel vergleichbar zu machen. Ergebnisse sind reproduzierbar und nachvollziehbar, was für ein Serienprojekt natürlich von essenzieller Bedeutung ist.

Eine Aussage über den Einsatz der hier entwickelten Technologie in Serienfahrzeugen ist aktuell noch nicht möglich. Zum Einen steht das kontaktlose Laden einer Vielzahl von alternativen Batterieladekonzepten gegenüber, und es bleibt trotz der nachvollziehbaren und offensichtlichen Vorteile des damit möglichen automatisierten Ladevorgangs unklar, ob Kosten und Nutzen in einem ausgewogenen Verhältnis zueinander stehen. Zum Anderen haben sich im Rahmen des Förderprojektes und auch im Rahmen der Normierungsarbeit Fragen beziehungsweise Fragestellungen ergeben, zu denen es noch keine ausreichend zufriedenstellende Antwort beziehungsweise technische Lösungen gibt. Dies bezieht sich vor allem auf die Positionstoleranz von Übertragungssystemen und das erforderliche fahrzeugseitige Mehrgewicht. Darüber hinaus wurde Optimierungspotential hinsichtlich des Bauraums für zukünftige Systeme identifiziert. Folgeprojekte werden sich intensiv mit diesen Themen beschäftigen.

Durch die Entwicklung des höher integrierten Stromrichters konnte eine Lösung aufgezeigt werden, die es ermöglicht Komponenten im Elektrofahrzeug einzusparen. Dadurch werden wesentliche Anforderungen der OEM erfüllt, da Kosten- sowie ein Gewichtersparnis und die Bauraumreduktion im Vordergrund stehen. Außerdem konnte aufgezeigt

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

werden, dass trotz der Reduktionen für den Nutzer eine hohe Flexibilität in der Nutzung von unterschiedlicher Ladeinfrastruktur erreicht werden kann.

Der entwickelte Teststand dient zur reproduzierbaren Validierung eines induktiven Energieübertragungssystems. Dieses Laborequipment bietet damit die Möglichkeit, durch Messungen und Tests zur Interoperabilität der Systeme maßgeblich beitragen und durch die Ergebnisse Empfehlungen an die Hersteller und den Arbeitskreis aussprechen zu können.

Die in den USA gestarteten Aktivitäten bei der Society of Automotive Engineers (SAE) zielen, genauso wie nationalen Aktivitäten bei der Deutschen Kommission Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik (DKE), auf eine Standardisierung der kontaktlosen Ladens ab. Weiterhin sind internationale Aktivitäten angelaufen, die bei der International Organization for Standardization (ISO) und der International Electrotechnical Commission (IEC) organisiert sind. Ziel aller Parteien ist unter Anderem die Scherstellung einer einheitlichen und interoperablen Schnittstelle. Ob dies tatsächlich in einer weltweit identischen Normierung mündet, kann heute noch nicht vorhergesagt werden. Für den langfristigen Erfolg des kontaktlosen Ladens ist aber eine möglichst stark verbreitete Interoperabilität sinnvoll. Eine zu frühe Festlegung auf Eckbereiche der Technologie kann aber unter Umständen dazu führen, dass suboptimale Lösungen definiert werden, die eine derart nachteilige Auswirkung auf die Eigenschaften der Übertragungssysteme haben, dass sich diese in der alltäglichen Anwendungen gegenüber dem konduktiven Laden nicht durchsetzen. Um die Erfolgsaussicht weiter zu erhöhen, sind eine regelmäßige und gute Kommunikation notwendig, sowohl bei den Standardisierungsorganisationen als auch bei den beteiligten Unternehmen und Instituten. Eine Möglichkeit für solch eine Kommunikationsplattform ist die in Utah, USA, geplante Conference on Electric Roads & Vehicles (<http://cervconference.org/index>). Hier hat das W-Charge Konsortium bereits erfolgreich ein Abstract eingereicht und wurde zur Vorstellung der Projektergebnisse eingeladen.

## 6.2 Weiterer F&E-Bedarf

Auf Grundlage der im Projekt erzielten Ergebnisse und der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurde entsprechender Entwicklungsbedarf in den folgenden Themenschwerpunkten festgestellt:

- **Technische Aspekte zur Gewährleistung der Interoperabilität**
  - Kompatible Komponentenauslegung und Systemparameter (z.B. Frequenz, Abmaße, Kompensationsstrategie etc.)
  - Kompatible Regelungsverfahren (z.B. primär- oder sekundärseitig; Frequenz oder Zwischenkreisspannung)
  - Datenübertragung, Kommunikation, Use Cases (zum Zweck der Positionserkennung, Identifikation und Abrechnung, interne Regelungsaufgaben, Ein-Ausschaltregime etc.)
  - Betrieb bei allen Arbeitspunkten gemäß Anwendungsregel (Luftspalt- und Versatzbereich des Energieübertragungssystems)

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

- ***Fahrzeugseitige Entwicklung und Optimierung***
  - Schnittstelle zum Batterie-Management-System
  - Verringerung der Spulenabmaße und Gewicht (Aspekte: Fertigung, Kosten etc.)
  - Alternative magnetische Materialien (Aspekte: Gewichtsreduzierung, Lebensdauer, Kosten, Metamaterialien etc.)
- ***EMV/EMVU***
  - Leitungsgeführte und gestrahlte Störaussendung
  - Störfestigkeit
  - Geeignete Messtechnik und Messverfahren zur Erfassung der Felder
  - Personensicherheit im öffentlichen und halböffentlichen Bereich
- ***Infrastrukturseitige Entwicklung und Optimierung***
  - Mechanische Ausführung der Feldplatten und der Elektronik (z.B. Gehäuse, Schutzgrad, elektrische Betriebssicherheit, Normkonformität etc.)
  - Bodenintegration der stationären Feldplatte und der Elektronik
- ***Systeme (Sensorik) zur Erkennung von Fremdkörpern im Luftspalt (Schutz vor Erwärmung und Entzündung)***
- ***Positionserfassung***
  - Stufe 1: Gewährleistung der geforderten Positioniertoleranz durch Auslegung des Spulensystems
  - Stufe 2: Bereitstellung von Informationen/Signalen (z. B. Absolutposition) als „Enparkhilfe“ für den Fahrer
  - Stufe 3: Nutzung dieser Signale für eine automatische Enparkmechatronik
- ***Höher integrierter Fahrzeugstromrichter***
  - Untersuchungen zur Interoperabilität mit unterschiedlichen induktiven Energieübertragungssystemen
  - Weiterentwicklung hin zur Automotive-Fähigkeit
  - Erhöhung der kabelgebundenen Ladeleistung (20kW) bzw. Rückspeiseleistung
  - Erweiterung Regelung für Splitphase-Netze (zur Netzanbindung in Nordamerika)
- ***Einspeisen der technischen Projektergebnisse und -erkenntnisse in Normierungsgremien***
  - auf nationaler Ebene (DKE-Arbeitskreis 353.0.1)
  - auf internationaler Ebene (SAE, ISO, IEC)

## 7 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU)

Das Projekt W-Charge wurde auf Grundlage der BMU-Ausschreibung „Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“ vom 22. April 2009, welche explizit die „Entwicklung und Erprobung von Verfahren zum kabellosen Laden“ als Fördergegenstand nennt, durchgeführt.

Das übergeordnete Ziel ist die Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Reduktion der Klimaerwärmung. Zwei wesentliche Einflussgrößen sind der Ausbau erneuerbarer Energien und die Steigerung der Energieeffizienz im Verkehrssektor. Neben dem optimierten Fahrzeugenergiemanagement durch Hybridantriebe unter Verwendung eines elektrischen Motors und Speichers ist die externe Ladung des Speichers aus dem elektrischen Stromnetz (Plug-In Hybrid) eine Möglichkeit, neben der erhöhten Energieeffizienz gezielt umweltfreundliche erneuerbare Energien für den Fahrzeugantrieb einzusetzen. Wird der Verbrennungsmotor vollständig durch einen elektrischen Antrieb ersetzt, ist es sogar möglich, zu 100% mit erneuerbaren Energien zu fahren. Neben der Erhöhung der Energieeffizienz und der Nutzung erneuerbarer Energien im Verkehrssektor wird durch diese Umstellung darüber hinaus eine Reduktion der Schadstoff- und Schallemissionen erreicht, welche zu einer besseren Umweltqualität in Verkehrsnähe wesentlich beiträgt.

Neben dem Ziel der CO<sub>2</sub>-Reduktion ist ein weiterer wichtiger Grund für den Ausbau erneuerbarer Energien die Reduktion der Schadstoffemissionen, die Diversifizierung des Energiemix und die Reduktion der Abhängigkeit von Energieimporten. Der Ausbau ist jedoch mit einigen Herausforderungen verbunden. Die wichtigste Herausforderung ist dabei der Ausgleich der primärenergieabhängigen Schwankungen der Einspeisung von Wind- und Solarstrom durch Last- und Erzeugungsmanagement, aber auch Speichereinsatz. Die Elektromobilität kann dabei einen wichtigen Beitrag leisten, wenn beim Laden ein geeignetes Lademanagement eingesetzt wird.

Die kontaktlose Energieübertragung für das Laden hat zwar zunächst den Nachteil, dass die gesamtenergetischen Verluste im Vergleich zur Verknüpfung mit Stromkabeln steigen, allerdings hat diese Option elementare Vorteile, da die Sicherheit, Nutzerakzeptanz und das Integrationspotenzial deutlich höher ausfallen können. Die Kopplung mit heute in den Fahrzeugen verfügbaren Fahrerassistenzsystemen wie z. B. Einparkhilfen etc. vereinfacht die Nutzung des hohen Automatisierungspotenzials der kontaktlosen Energieübertragung. Durch diese Automatisierung ist eine häufigere Kopplung mit dem Stromnetz zu erwarten womit auch eine Netzstützung durch geeignetes Lademanagement häufiger zur Verfügung steht. Damit ist ein schnellerer Ausbau der Elektromobilität und der Nutzung erneuerbarer Energien möglich.

## 8 Veröffentlichungen

Das Projekt W-Charge und die erzielten Ergebnisse wurden während der Projektlaufzeit in vielfältiger Weise der Öffentlichkeit und dem interessierten Fachpublikum vorgestellt und zugänglich gemacht. Auch nach Projektende soll dies in geringerem Maße weitergeführt werden. Im Folgenden sind die wichtigsten Veröffentlichungen dargestellt.

- **Homepage**

Auf der W-Charge Homepage ([www.w-charge.de](http://www.w-charge.de)) wurden die Projektziele und Zwischenergebnisse einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

- **Messe**

Auf der Hannover Messe im April 2011 wurden aktueller Status und Ziele des Projekts W-Charge auf dem BMU-Messestand präsentiert (Abbildung 42).

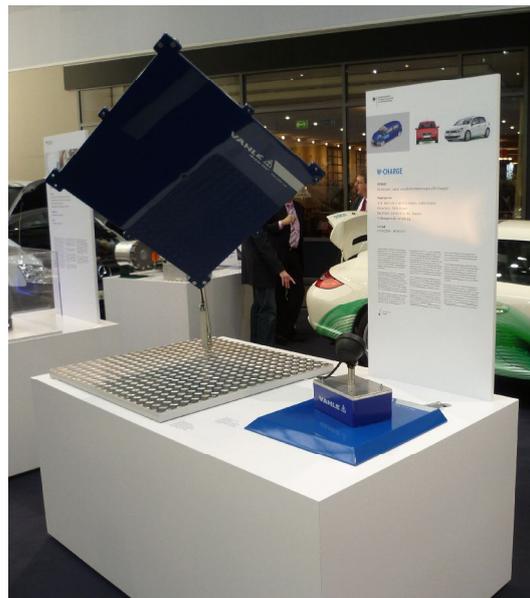


Abbildung 42: W-Charge Stand auf der Hannover Messe 2011

- **Konferenzen**

- 3rd European Conference SmartGrids & E-Mobility, München, 17.-18. Oktober 2011:

H. Barth, M. Jung, M. Braun, B. Schmülling, U. Reker: „Concept Evaluation of an Inductive Charging System for Electric Vehicles“

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

- ETG-Kongress, Fachtagung: Leistungselektronik in Netzen, Würzburg, 8.-9. November 2011:  
M. Jung, H. Barth, M. Braun: „Höher integrierter Stromrichter – Kombiniert kabelgebundenes und induktives Laden von Elektrofahrzeugen“
- Conference on Electric Roads & Vehicles (CERV), Park City, Utah USA, 27.-28. Februar 2012  
„W-Charge – Inductive Charging of Electric Vehicles with High Efficiency“ (Status: Abstract angenommen)

Zusätzlich wurde das Projekt W-Charge in weiteren allgemeinen Präsentationen durch die Projektpartner bekannt gemacht.

- **Presse**

- dpa-Veröffentlichung: Sommerserie Elektromobilität „Nahe Zukunftsmusik: Elektroauto beim Fahren laden“ ; veröffentlicht: 23.08.2011

Zusätzlich fand das Projekt W-Charge in weiteren Presstexten Erwähnung. Insbesondere im Zuge der Einweihung der SysTec (Testzentrum für intelligente Netze und Elektromobilität) des Fraunhofer IWES, wo der in Betrieb genommene Teststand vorgestellt wurde, ist das Projekt W-Charge in viele Pressemitteilungen aufgenommen worden.

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

## 9 Literaturverzeichnis

- [CERV2012] W-Charge – Inductive Charging of Electric Vehicles with High Efficiency CERV Conference on Electric Roads and Vehicles, Wireless Power Transfer and Vehicle Integration; <http://cervconference.org/> (letzter Zugriff: 05.10.2011)
- [CHADEMO] Internetseite des CHAdeMO-Industriekonsortiums: <http://www.chademo.com> (letzter Zugriff: 25.10.2011)
- [Covic2000] G. A. Covic, G Elliott, O. H. Stielau, R. M. Green, J. T. Boys; The design of a contact-less energy transfer system for a people mover system, Proceedings IEEE International Conference on Power System Technology, PowerCon 2000
- [Evatran] Evatran – Plugless Power Brochure. Internet: [http://www.pluglesspower.com/unleash/images/Plugin\\_2011\\_brochure.pdf](http://www.pluglesspower.com/unleash/images/Plugin_2011_brochure.pdf) (letzter Zugriff: 11.10.2011)
- [IEC62196] IEC 62196-1: Plugs, socket-outlets, vehicle couplers and vehicle inlets – Conductive charging of electric vehicles, Part 1: Charging of electric vehicles up to 250 A a.c. and 400 A d.c.; Ausgabedatum: April 2003
- [Kley2011] F. Kley: Ladeinfrastrukturen für Elektrofahrzeuge – Entwicklung und Bewertung einer Ausbaustrategie auf Basis des Fahrverhaltens, Dissertation, Fraunhofer Verlag 2011
- [MiD2008] Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH (infas); Institut für Verkehrsforschung am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR): Mobilität in Deutschland 2008
- [SEW] SEW-Eurodrive; Mobilität weitergedacht, Broschüre 2011. Internet: <http://www.sew-eurodrive.de/download/pdf/17058406.pdf> (letzter Zugriff: 11.10.2011)
- [Techon] Nikkei Business Publications Inc., [Techno-Frontier] Showa Aircraft Displays Contactless Charger for Electric Buses (Stand: 20.04.2009). Internet: [http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS\\_EV/20090420/169018/](http://techon.nikkeibp.co.jp/english/NEWS_EV/20090420/169018/) (letzter Zugriff: 11.10.2011)
- [UniTennessee] Bailey, Ronald; Kazemersky, Philip. Inductive Power Transfer Project – Final Report. Internet: <http://www.utc.edu/Academic/EngineeringProjects/SmartCart/Reports.php> (letzter Zugriff: 11.10.2010)
- [VDE-AR-2009] VDE e.V. Anwendungsregel VDE-AR-E 2623-2-2, Oktober 2009 Stecker, Steckdosen, Fahrzeugsteckvorrichtungen und Fahrzeugstecker – Ladung von Elektrofahrzeugen – Teil 2-2: Anforderungen und Hauptmaße für die Austauschbarkeit von Stift und Buchsensteckvorrichtungen)

Kontaktloses Laden von Elektrofahrzeugen – W-Charge	
Gemeinsamer Schlussbericht	

- [VDE-AR-2011] VDE e. V. Anwendungsregel VDE-AR-E2111-4-2, März 2011  
Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen – Induktive Ladung von Elektrofahrzeugen – Teil 4-2: Niedriger Leistungsbereich  
*ICS 43.120, VDE-Vertr.-Nr. 0122013, VDE Verlag GmbH, 10625 Berlin*
- [Wampfler] Conductix Wampfler, E-Mobility - Wampfler Group. Internet:  
<http://www.wampfler.com/index.asp?id=345&e1=11&vid=12&lang=D> (letzter Zugriff: 11.10.2010)
- [Weber2010] Weber Andreas: Flottenversuch MINI E Berlin, 4. Salzgitter Forum Mobilität, 2010
- [Wietschel2009] M. Wietschel, F. Kley, D. Dallinger: Eine Bewertung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge, Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft (Heft 03/2009)
- [Witricity] WiTricity, WiT-3300 Deployment Kit, Datenblatt. Internet:  
[http://www.witricity.com/pdfs/WiT-3300\\_data\\_sheet.pdf](http://www.witricity.com/pdfs/WiT-3300_data_sheet.pdf) (letzter Zugriff: 11.10.2011)
- [Zeltner2011] Zeltner, S.: Actual and Advanced Converter Technologies for On-Board Chargers. Valencia: ECPE-Workshop, „Power Electronics for Charging Vehicles“, 2011