

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Universität Stuttgart, IVK / IEW	Förderkennzeichen: Fkz. 16N12344
Vorhabenbezeichnung: Berührungsloses, induktives und positionstolerantes Laden	
Laufzeit des Vorhabens: 4 Jahre bis Ende 2016	
Berichtszeitraum: 01.01.2013 – 31.12.2016	

### II. Eingehende Darstellung

1. der Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele,
2. der wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises,
3. der Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit,
4. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans,
5. des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen,
6. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11.

Wenn zur Wahrung berechtigter Interessen des ZE oder Dritter oder aus anderen sachlichen Gesichtspunkten bestimmte Einzelheiten aus dem Bericht vertraulich zu behandeln sind (z. B. Wahrung der Priorität bei Schutzrechtsanmeldungen), so hat der ZE den ZG ausdrücklich darauf hinzuweisen.

## Eingehende Darstellung

### 1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Die Gestaltung der Ladeinfrastruktur ist ein Schlüsselfaktor für den wirtschaftlichen Durchbruch der Elektromobilität und ermöglicht durch die Gesamtheit der technologieübergreifenden Innovationen eine signifikante Verbesserung der Kundenakzeptanz. Das direkte Einbinden des Fahrzeugs in eine globale Energie- und Informationsinfrastruktur ermöglicht neue Wertschöpfungsketten und bietet hohes Potential zur Markendifferenzierung der Fahrzeughersteller sowie die Optimierung von Kosten und Belegungen im öffentlichen, halböffentlichen und privaten Parkraum.

Im Projekt BIPoL<sup>plus</sup> wurde ein induktives Ladesystem für batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge mit einer nominalen Übertragungsleistung von bis zu 22 kW konzipiert und entwickelt. Die Einzelkomponenten wurden so ausgelegt, dass sie den hohen Anforderungen für Gewicht, Sicherheit und Wirkungsgrad genügen. Hinsichtlich der Sicherheit wurden die Spulen so konzipiert, dass die magnetischen Streufelder den magnetischen Grenzwert nach ICNIRP 1998 nicht überschreiten. Es wurde ein Wirkungsgrad von über 90% erreicht.

Damit das Induktivladen sicher und effizient ablaufen kann, hat das IVK ein Assistenzsystem konzipiert und entwickelt, das eine präzise Positionierung von Elektrofahrzeugen ermöglicht. Das Positionierungssystem nutzt zur Ortung der Ladespule ein niederfrequentes magnetisches Pulssignal, wodurch störende, im Fahrzeugunterboden induzierte Wirbelströme vermieden werden. Es erreicht eine Positionierungsgenauigkeit von wenigen Millimetern und weist aktuell einen Positionierungsradius von 3,5m auf. Dadurch können auch längere Fahrzeuge adäquat positioniert werden.

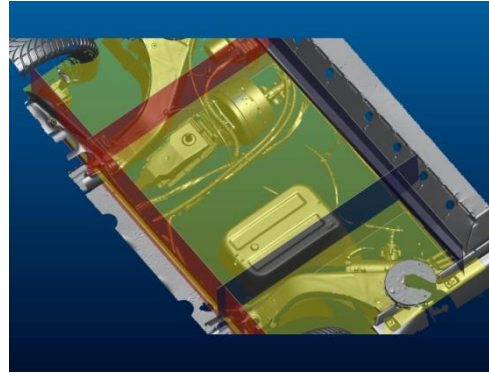
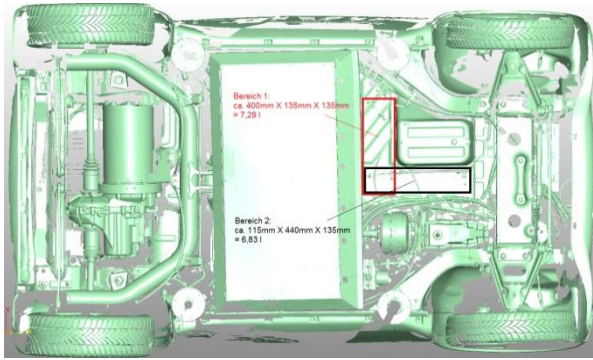
Das IEW hat sich hauptsächlich mit der analytischen Modellierung der Energieübertragungsstrecke beschäftigt. Daraus abgeleitet wurde ein Ansatz, welcher mit minimalem Eingriff in die Sekundärseite des 22 kW Systems eine Effizienzsteigerung im Teillastbetrieb ermöglicht, sowie zusätzlich eine dezidierte 3 kW Primäreinheit erlaubt, welche in Verbindung mit der 22 kW Fahrzeugeinheit einen Wirkungsgrad über 90% aufweisen kann. Im Rahmen der Aufstockung des Projektes wurden alternative Spulengeometrien für das 22 kW Ladesystem aufgebaut und vermessen.

#### a. Darstellung des Projektpartners IVK:

##### AP 1200: Bauraumanalyse für die Sekundärspule 1/13-4/13 (IVK)

In diesem Arbeitspaket sollten die am FKFS vorhandenen Elektrofahrzeuge bezüglich möglicher nutzbarer Bauräume für induktive 22 kW Ladesysteme untersucht werden, um Erkenntnisse für die Spezifikation des Ladesystems zu gewinnen.

- Es wurde ein Lastenheft erstellt.
- Umfangreiche CAD-Daten der Unterböden der Elektrofahrzeuge eSmart ED, eSmart 450, EleNa Sprinter, eCitroen und eWolf wurden erstellt.
- Anhand dieser CAD-Daten wurden Einbaumöglichkeiten für die Sekundärspule (Durchmesser 600mm) identifiziert. Dabei wurden sowohl runde als auch quadratische Wicklungen betrachtet.
- Einbaumöglichkeiten der Leistungselektronik wurden untersucht. Hieraus ergaben sich wichtige Rückschlüsse für die Abmessungen.



**Abbildung 1: CAD Bilder, Bauraum LE (links) und Sekundärspule (rechts) im Falle des eSmart 450.**

AP 3300 + AP 3400: Entwicklung eines Positionierungsverfahrens 5/13-12/15 (IVK)

In diesem Arbeitspaket sollte das IVK eine Funktion zur Positionsbestimmung der Spulen zueinander in Längsrichtung des Fahrzeugs entwickeln. Die Funktion sollte hierbei über den Wirkungsgrad auf die Position schließen. Der Austausch der hierzu verwendeten Messdaten von der Primärseite sollte über eine Funkstrecke erfolgen. Da in den meisten Fällen jedoch auch noch ein Winkel bzw. die Position in Querrichtung benötigt wird und die Datenübertragung per Funk unzuverlässig ist, wurde der Ansatz verworfen und am IVK im Rahmen einer Promotion von Grund auf neu konzipiert, erforscht und entwickelt.

*Konzeption 5/13-7/13 (IVK):*

Aktuelle Positionierungssysteme, Positionierungskonzepte und mögliche Messtechniken wurden hinsichtlich zuvor festgelegter Kriterien bewertet. Die wichtigsten Kriterien waren hierbei die Positionierungsgenauigkeit, Hardwareunabhängigkeit (z.B. Fahrzeug, Spule etc.), Eignung für öffentliche Parkplätze, Zuverlässigkeit. Die wichtigsten bewerteten Verfahren im Überblick:

- Mechanische bzw. mechatronische Systeme wie z.B. Fangvorrichtungen oder bewegliche Spulen.
- Systeme basierend auf elektromagnetischen Wellen: RFID, WLAN und UWB Geräte.
- Optische Systeme wie Kameras oder basierend auf Infrarot.
- Positionierung mittels positionstoleranter Spulensysteme.
- Ortung der Ladespule anhand ihres magnetischen Feldes.

Magnetfeldbasierte Positionierungssysteme haben die beste Bewertung bekommen, weil Magnetfelder keiner Dämpfung beim Durchdringen von Materialien unterworfen sind und die Systeme dadurch unabhängig von Witterungsbedingungen und Verschmutzungen sind. Zudem ist keine Sichtverbindung zur Ladespule notwendig. Sie können sowohl im Innen- als auch im Außenbereich eingesetzt werden. Auf dieser Basis wurde ein Konzept vorgestellt [1], bei dem ein quasi-statisches alternierendes Magnetfeld (magnetisches Pulssignal) mittels Primärspule erzeugt wird. Genutzt wird hierbei nur die zum Parkplatzboden senkrechte Feldkomponente. Spezielle Magnetfeldsensoren am Fahrzeugunterboden messen diese. Aus den Daten kann anschließend die Ladespule mittels Trilateration lokalisiert werden.

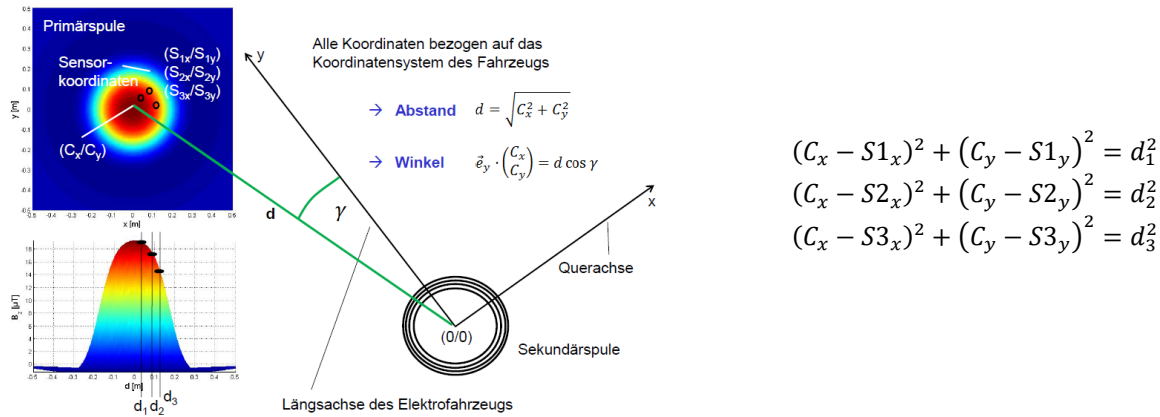


Abbildung 2: Konzept der Positionsbestimmung (links) mittels Trilateration (rechts).

Bei der Trilateration werden die Sensorabstände und Sensorkoordinaten mit den Koordinaten der Ladespule über Kreisgleichungen miteinander in Beziehung gesetzt. Auf diese Weise kann der Ort der Ladespule ermittelt werden. Die einzelnen Sensorabstände  $d_i$  ergeben sich direkt aus dessen magnetischen Messwerten, die mit der vertikalen magnetischen Flussdichteverteilung  $B_z(d)$  der Ladespule verglichen werden. Die Flussdichteverteilung muss hierzu bekannt sein bzw. zu Beginn des Positionierungsvorgangs einmalig berechnet werden. In diesem Rahmen wurde Software erstellt, um die magnetische Flussdichteverteilung in Abhängigkeit der Spulengeometrie zu berechnen.

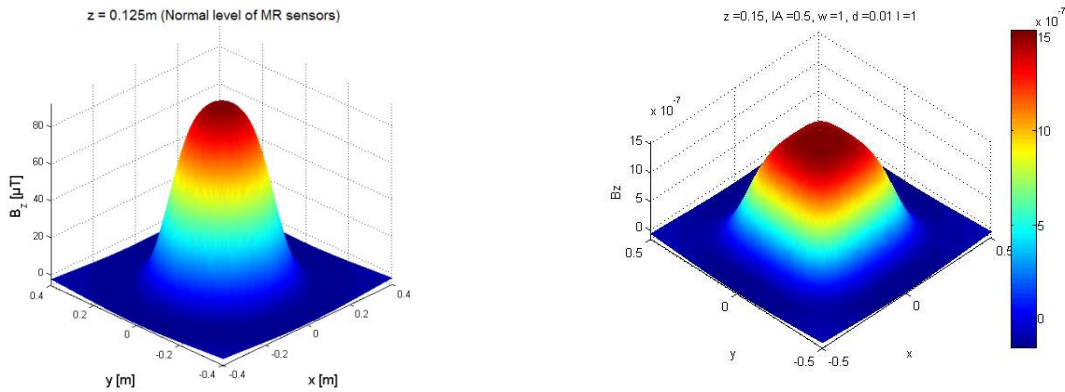


Abbildung 3: Flussdichte einer runden Spule (links) und einer quadratischen Spule (rechts)

Die hierzu notwendigen Berechnungsalgorithmen wurden hinsichtlich der Berechnungszeit und der Genauigkeit optimiert und verglichen.

$$B_z(d) \approx -\frac{\mu_0 I}{4\pi} \sum_{i=1}^N \frac{(d - x'_i) \Delta s'_{x,i} + y'_i \Delta s'_{y,i}}{\sqrt{(d - x'_i)^2 + (y'_i)^2 + z_0^2}^3}$$

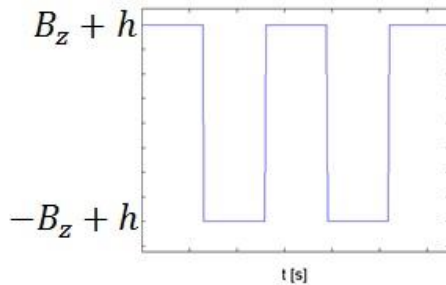
$$B_z(d) = \frac{1}{4} \mu_0 I r_0^2 \frac{2z_0^2 - d^2}{\sqrt{d^2 + z_0^2}^5}$$

Abbildung 4: Näherungsgleichung (links) und numerisches Verfahren (rechts)

Dabei wird die Rotationssymmetrie der Flussdichteverteilung ausgenutzt. In diesem Zusammenhang wurde gezeigt, dass das Feld von quadratischen Ladespulen eine hinreichende Rotationssymmetrie aufweist und das Verfahren somit auch mit quadratischen Ladespulen funktioniert und nicht auf eine Spulengeometrie beschränkt ist.

Als nächstes wurde ein Ansatz zur Signalverarbeitung gewählt. Das Anfangsproblem ist, dass ein statisches magnetisches Feld, das von einer Ladespule erzeugt würde, mit äußeren Magnetfeldern aus der Umgebung überlagert ist. Diese Störungen sind selbst statisch oder verändern sich mit der Zeit. Veränderliche Störungen können z.B. von den elektrischen Geräten des Elektroautos selbst erzeugt werden. Ein annähernd statisches Magnetfeld ist z.B. das Erdmagnetfeld, das jedoch örtlich und zeitlich

stark variieren kann. Die Störungen führen in allen Fällen zu Positionierungsfehlern bzw. mindern die Positionierungsgenauigkeit. Der Lösungsansatz basiert auf einer differentiellen Messmethode, die ein niederfrequentes magnetisches Pulssignal nutzt. Das Prinzip wird im Folgenden kurz erläutert: Die Magnetfeldsensoren messen  $B_z$  in zwei aufeinander folgenden Pulshalbwellen. Die störungsfreien Messwerte unterscheiden sich nur durch das Vorzeichen. Sind nun diese mit einer statischen oder niederfrequenten Störgröße  $h$  überlagert, kann die Störgröße per Differenz eliminiert werden. Den Sachverhalt zeigt folgendes Bild.



$$B_{diff} = \frac{1}{2} |(B_z + h) - (-B_z + h)|$$

**Abbildung 5: Differentielle Messmethode basierend auf magnetischem Pulssignal.**

Dem so ermittelten Wert  $B_{diff}$  kann anschließend eine eindeutige Distanz zugeordnet werden. Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist, dass das Pulssignal keine Wirbelströme im Unterboden induziert, die wiederum störende magnetische Gegenfelder erzeugen und damit die Positionierungsgenauigkeit stark mindern könnten. Daher rührt auch der Name des Systems: MPPS – Magnetic Pulse Positioning System.

#### *Magnetfeldverzerrungen 8/13-12/13 (IVK):*

Magnetische Felder werden durch magnetisierbare Medien – wie z.B. das Fahrzeug selbst – verzerrt. Die am Unterboden des Fahrzeugs montierten Magnetfeldsensoren nehmen folglich eine von der berechneten Flussdichteverteilung  $B_z(d)$  abweichende Funktion war. Damit ist im Allgemeinen eine präzise Positionierung nicht mehr möglich. In diesem Zusammenhang wurde ein physikalisches Modell erstellt, mit dessen Hilfe aus der verzerrten Funktion die originale Flussdichteverteilung  $B_z(d)$  wieder hergestellt werden kann. Anschließend wurde die Methode zur Entzerrung mit umfangreichen FEM Simulationen (Comsol Multiphysics) nachgewiesen. Zudem wurde sowohl theoretisch als auch per Simulation erklärt und gezeigt,

- dass die Methode auch bei metallischen Oberflächen mit komplexer Form funktioniert
- dass die Methode annähernd unabhängig vom Drehwinkel des Fahrzeugs ist
- dass die hohe Permeabilität benachbarter geparkter Fahrzeuge keinen Einfluss auf die Zuverlässigkeit der Methode hat.

Das mittlerweile weiterentwickelte physikalische Modell samt den Ergebnissen [2] wurde auf der IEEE InterMag Konferenz im Mai 2014 vorgestellt. Das aktuelle theoretische Modell samt der damit einhergehenden Hypothesen und deren experimenteller Nachweis sind Bestandteil des noch laufenden Promotionsverfahrens an der Universität Stuttgart.

Der Ansatz und die Grundlagen des gesamten Verfahrens sind zum Patent angemeldet. Die dazugehörige Patentschrift [3] befindet sich derzeit in der Offenlegungsphase.

#### *Entwicklung der Teilkomponenten 1/14-12/14 (IVK):*

Eine Wicklung zur Erzeugung des magnetischen gepulsten Signals wurde anhand vorheriger Simulationsergebnisse realisiert. Es handelt sich um eine Flachwicklung mit 3 Lagen a 16 Windungen. Mit dieser wird in einem Abstand von 3m ein hinreichendes Signal-Rausch-Verhältnis gesichert. Es wurde die alte Nutzenform des IEW verwendet, da wir bereits während derer Konzipierung extra Nutzen für die zukünftige Wicklung berücksichtigt haben. Es wurden lange und verdrillte Zuleitungen gelegt, um Störungen zu minimieren und die Berechnung des resultierenden Feldes zu vereinfachen. Sicherheitsbetrachtungen wurden in dieser Phase zunächst nicht vorgenommen. Bei den Versuchen wurde darauf geachtet, dass keine Personen oder Geräte in der Nähe der Spule sind. Das folgende Bild zeigt eine verbesserte Spule, die hinsichtlich der Windungszahl und des Durchmessers von 60cm einer realen 22kW zirkularen Ladespule entspricht. Sie wurde am IVK gefertigt und erzeugt das gleiche Signal-Rausch-Verhältnis wie die obige, obwohl sie nur 2 Lagen a 8 Windungen aufweist. Eine zweite Lage wird

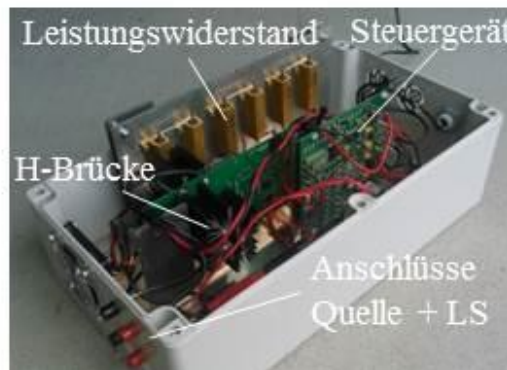


nur deshalb benötigt, um die Kosten für Signalelektronik zu begrenzen. Denn diese müsste im Falle einer einzigen Lage den doppelten Strom erzeugen können, um das gleiche Signal-Rausch-Verhältnis in 3m Entfernung zu erzielen. Dies würde auf Seiten der Leistungselektronik erhebliche Mehrkosten verursachen.



**Abbildung 6: Spule zur Signalführung.**

Der dazugehörige erste Prototyp der Signalelektronik zur Erzeugung des gepulsten Stroms, den die Signalspule führt, ist im folgenden Bild zu sehen. Er besteht aus einer H-MOSFET-Brücke mit dazugehörigen Treiber- und Logikbausteinen. Die Elektronik kann Strompulse verschiedener Frequenz mit einer maximalen Amplitude von 10A erzeugen. Die Zielfrequenz liegt zwischen 10Hz und 50Hz. Es wurden MOSFETS ausgewählt, die sehr früh durchschalten. Somit kann die Elektronik mit niedriger Brückenspannung betrieben werden. Dies wirkt sich positiv auf die Verlustleistung aus, da der aktuelle Prototyp einen Leistungswiderstand zur Strombegrenzung nutzt. Dies hat ein sauberes rippelfreies Magnetfeld zur Folge, das für spätere Versuche benötigt wird. Spätere Versionen ersetzen den Leistungswiderstand durch eine PWM-Steuerung. Dadurch kann der Leistungswiderstand in Zukunft entfallen wodurch die Verlustleistung stark reduziert wird.



**Abbildung 7: Signalelektronik zur Erzeugung des Pulsstroms.**

Das Prinzipschaltbild der Signalelektronik ist in folgendem Bild zu sehen.

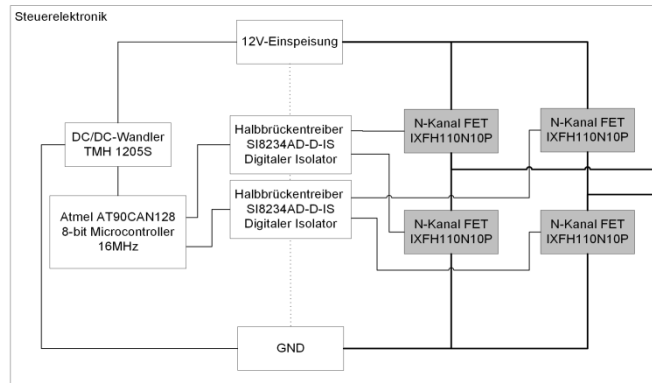


Abbildung 8: Schaltbild der Signalelektronik.

Die Spule und die Signalelektronik stellen den signalgebenden Teil des Positionierungssystems dar und sind im Ladeparkplatz untergebracht. Im Folgenden wird auf die Messtechnik zur Positionsberechnung eingegangen. Diese befindet sich im Fahrzeug und besteht aus den **Magnetfeldsensoren**, einem **Steuergerät zur Positionsberechnung** und einer GUI (**3D-Anzeige**) für den Fahrer. Die Messtechnik ist wie folgt aufgebaut.

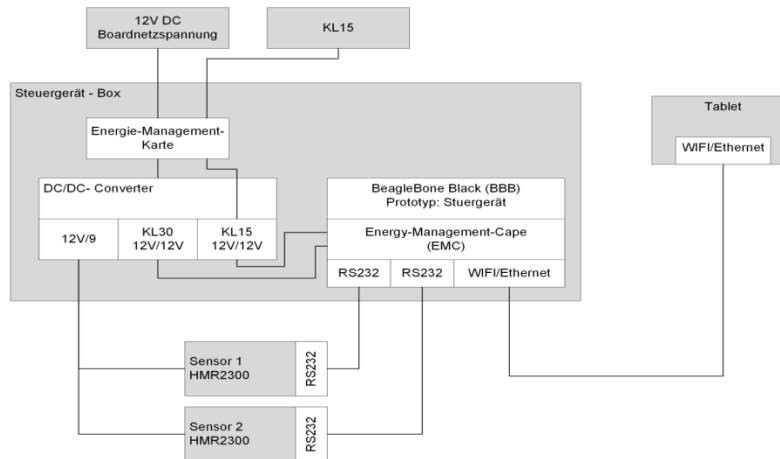


Abbildung 9: Aufbau der Messtechnik.

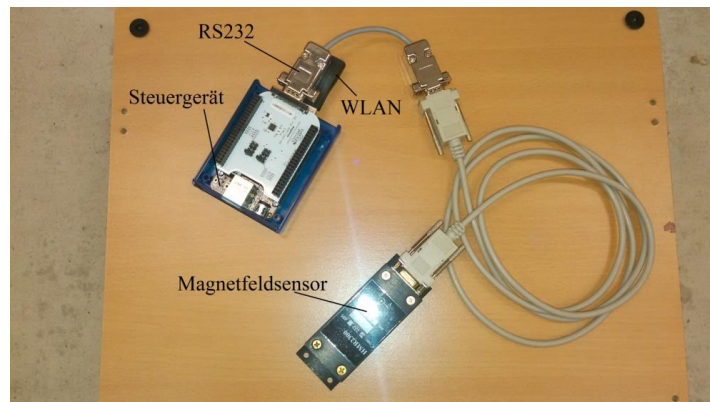
Die GUI wurde als Java-Applikation realisiert und basiert auf der Bibliothek „Lightweight Java Game Library“. Sie ist sehr performant und auf verschiedenen Software-Plattformen verfügbar. Somit läuft die Applikation auf Windows- und Linux-Systemen sowohl für 32Bit- als auch für 64Bit-Architekturen. Die Applikation läuft in unserem Fall auf einem Windows 8 Tablet, das sich im Cockpit des Versuchsfahrzeugs befindet. Über eine WLAN-Schnittstelle empfängt die Applikation zyklisch vom Steuergerät die Position der Ladespule und aktualisiert die Anzeige. Hierbei kommen Algorithmen zum Einsatz, die eine flüssige Bewegung der Grafik sicherstellen. Folgende Bilder zeigen die eine erste Version Applikation im Betrieb für eine feste Position. Das rote Dreieck stellt hierbei die Fahrzeugspule dar. Es wird grün, sobald es die Distanz zur Ladespule (blaue Kreise) von 10 cm unterschreitet.



**Abbildung 10: 3D Positionsanzeige.**

Die Echtzeitsoftware zur Erfassung der Messwerte der Sensoren und zur Positionsberechnung wurde in der Programmiersprache C implementiert und läuft auf einem BeagleBone Black-Steuergerät als Linux-Applikation. Diese verwendet zu diesem Zeitpunkt nur einen Magnetfeldsensor und implementiert somit nur die Längspositionierung (Winkel ist immer 0). Dies ist beabsichtigt, da zu diesem Zeitpunkt das Verfahren zuerst anhand der Längspositionierung verifiziert werden sollte. Insbesondere mussten die Algorithmen zur Messwertaufnahme und Rauschunterdrückung verifiziert werden, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird:

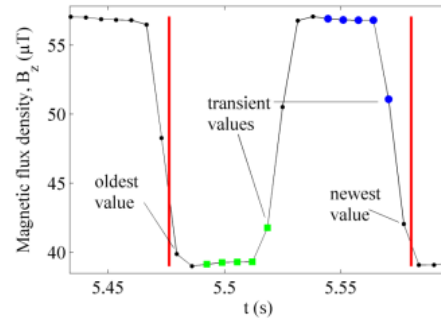
Das Steuergerät ist im folgenden Bild zu sehen. An diesem ist ein HMR2300 Magnetfeldsensor von Honeywell ([www.honeywell.com](http://www.honeywell.com)) über eine RS232-Schnittstelle angeschlossen. Der Sensor tastet das magnetische Pulssignal ab und sendet die Abtastwerte an das BeagleBone Black Steuergerät. Die Frequenz des Pulssignals wurde zu 10Hz gewählt, um die bereits erwähnten Wirbelströme zu umgehen.



**Abbildung 11: Messtechnik zur Positionsberechnung.**

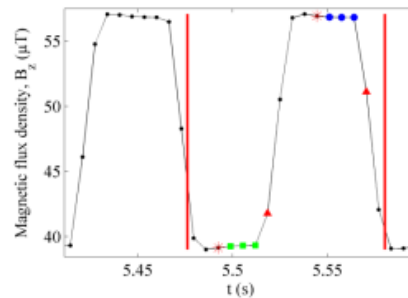
Das Steuergerät berechnet aus den Abtastwerten anschließend die Distanz des Sensors zur Ladespule. Hierzu hält es immer die letzten 16 Abtastwerte im FILO-Puffer (first-in-last-out). Folgendes Bild zeigt einen realen Ausschnitt des Puffers. Zuerst detektiert der Algorithmus die Pulsflanken über einen Vergleich mit dem Durchschnittswert aller Abtastwerte. Gemäß der Sprungantwort liegen die stationären Abtastwerte zeitlich gesehen unmittelbar vor den Pulsflanken. Diese sind für beide Pulshalbwellen als blaue Punkte und quadratische Rechtecke markiert und entsprechen der Auswahl durch den Algorithmus.





**Abbildung 12: Hypothetische Stationäre Abtastwerte [4].**

Oft beinhaltet die Auswahl transiente Werte (siehe markierte Werte), die die Differenzbildung nach der Gleichung in Abbildung 5 stark beeinflussen und die Distanzbestimmung somit fehlerhaft wird. Mithilfe mathematischer Ähnlichkeitssätze werden diese daher vom Algorithmus gefiltert. Das folgende Bild zeigt die gefilterten Werte für den obigen Pufferausschnitt als rote Sterne und Dreiecke.

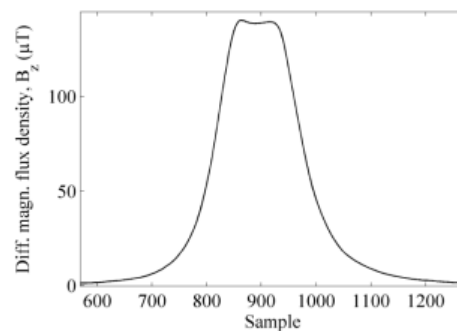


**Abbildung 13: Gefilterte Abtastwerte [4].**

Im vorletzten Schritt bildet der Algorithmus die Durchschnittswerte  $B_B$  und  $B_G$  der verbliebenen blauen und grünen Abtastwerte und verknüpft diese über die Differenz nach obiger Gleichung zu

$$B_{diff} = \frac{1}{2} |B_B - B_G|.$$

Der resultierende Wert  $B_{diff}$  wird schließlich mit der Flussdichteverteilung der Ladespule verglichen und die dazugehörige Distanz bestimmt. Der Algorithmus wurde erfolgreich im Labor am IVK getestet. Hierbei wurde der Sensor an einer Schiene zur Spule hin und wieder zurück bewegt. Dabei wurden folgende Werte von  $B_{diff}$  aufgezeichnet.



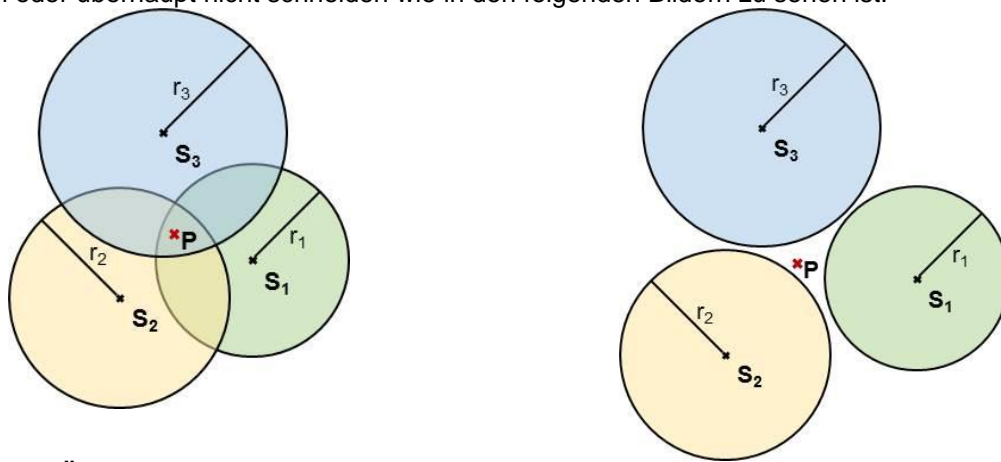
**Abbildung 14: Messung während einer Bewegung [4].**

Der Vorteil bei dieser Methode ist, dass keine Kommunikation zwischen Fahrzeug und Parkplatz notwendig ist. Die Abtastung und Distanzbestimmung funktioniert völlig automatisch. Hierdurch vermeidet man neben den Kosten zusätzlich Verzögerungen, die bei der Nutzung einer Funkstrecke anfallen würden. Auch die Zuverlässigkeit steigt, da eine Funkstrecke auch gestört sein kann oder ganz ausfallen kann. Im Rahmen der Tests wurde zudem eine spezielle Software zur Messung der Ausführungszeit für

einen Zyklus entwickelt. Der ganze Prozess wurde für 4 Sensoren samt Filter zur Rauschunterdrückung und Trilateration auf dem Steuergerät Beaglebone Black vermessen. Das Steuergerät ist ein Einzelkern ARM-Cortex-A8 Mikrocontroller mit einem Ängström Linux Kernel. Ein Zyklus benötigte im Durchschnitt 50µs bzw. ca. 0,77% der Zykluszeit. Damit bestehen Zeitreserven für die Implementierung noch komplexerer Algorithmen. Weitere Details über die Funktionsweise des Algorithmus wurden auf der Autoreg 2015 Konferenz veröffentlicht und können dem entsprechenden Paper [4] entnommen werden.

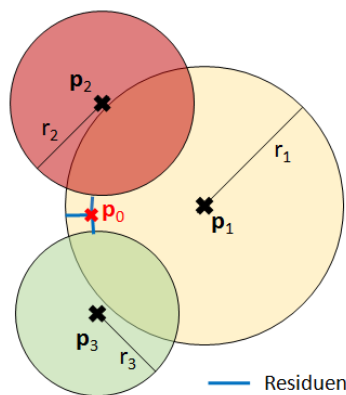
*Effiziente Lösung der Trilateration 4/14-12/14 (IVK):*

Die bisherige Lösung der Trilateration bezog sich auf lediglich 2 Sensoren, war somit einfach analytisch lösbar und konnte sehr schnell auf dem Steuergerät ausgeführt werden. Der Nachteil ist jedoch, dass zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegung nicht unterschieden werden kann. Da die gesamte Software nur 0,77% der Zykluszeit benötigt, wurde ein spezieller komplexer Algorithmus ausgewählt, implementiert und untersucht, der in diesen Nachteil behebt und zudem in der Lage ist das Gleichungssystem in einer adäquaten Zeit auf dem Steuergerät zu lösen. Die Wahl fiel schnell auf den Algorithmus von Yu Zhou, der 2011 in einem Cambridge Journal erschien. Er hat gegenüber anderen Algorithmen den Vorteil, dass er extrem robust gegenüber Messfehlern ist. Diese verursachen in der Realität, dass sich die Kreise überlappen oder überhaupt nicht schneiden wie in den folgenden Bildern zu sehen ist.



**Abbildung 15: Überlappung (links), Kein Schnittpunkt (rechts).**

Somit existiert oft keine reale Lösung für das nicht-lineare Gleichungssystem. Der Zhou-Algorithmus liefert jedoch auch in diesen Fällen zuverlässig ein Ergebnis bzw. eine Position. Der Ansatz ist die „Kleinste-Quadrate“-Methode. Bei dieser werden die Residuen in Abhängigkeit der gesuchten Position aufsummiert und geschaut, für welche Position die Summe minimal wird. Diese wird über die Ableitung dieser Summe ermittelt. Der Sachverhalt ist in folgendem Bild dargestellt.



$$s(\vec{p}_{est}) = \sum_{i=1}^N [(\vec{p}_i - \vec{p}_{est})^T (\vec{p}_i - \vec{p}_{est}) - r_i]^2$$

$$\vec{p}_0 = \arg \min_{\vec{p}_{est}} s(\vec{p}_{est})$$

**Abbildung 16: Kleinste-Quadrate-Methode.**

Die Besonderheit am Zhou-Algorithmus ist eine neue Methode zum sehr effizienten Auffinden des Minimums. Mittels entsprechenden mathematischen Annahmen kann die Ableitung in ein lineares Gleichungssystem überführt werden:

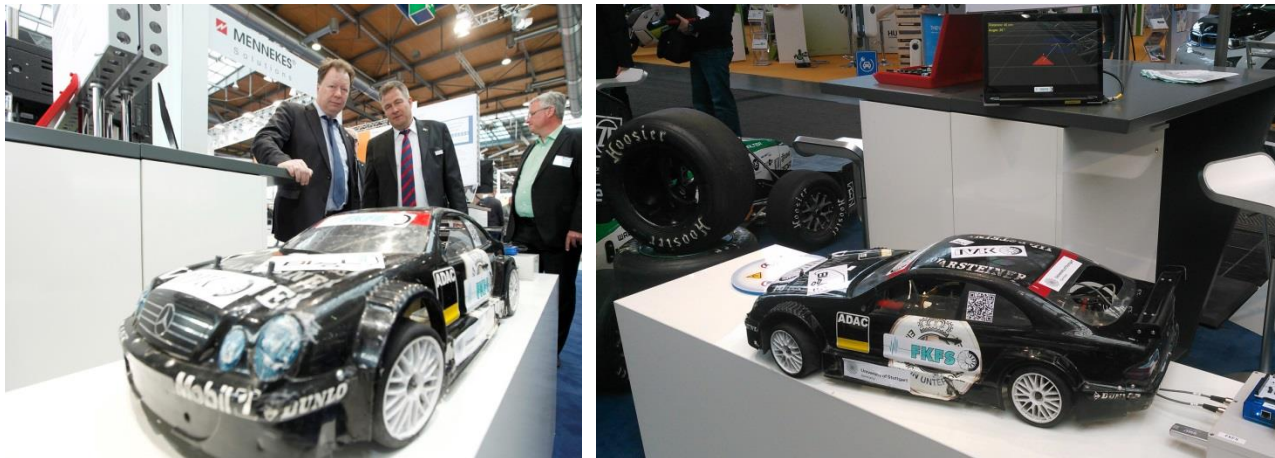
$$\frac{\partial s(\vec{p}_0)}{\partial \vec{p}_0} = 0 \quad \Rightarrow \quad \mathbf{f} + \mathbf{H}\vec{q} = \mathbf{0}, \quad \vec{p}_0 = \vec{q} + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \vec{p}_i.$$

Dieses kann extrem schnell auf dem Steuergerät gelöst werden. Tests am IVK zeigten, dass auf dem verwendeten Steuergerät Beaglebone Black ein gesamter Zyklus ca. 4ms benötigt, was absolut ausreichend ist und keine für den Anwender erkennbaren Latenzen in der Positionsanzeige verursacht. Weiter besteht erheblicher Optimierungsspielraum, so dass die Berechnungszeit sogar unter 1ms fallen könnte.

Der Algorithmus wurde mittlerweile stark für den Anwendungsfall der Positionierung angepasst. Weitere Details sind im entsprechenden Autoreg Paper [4] einsehbar.

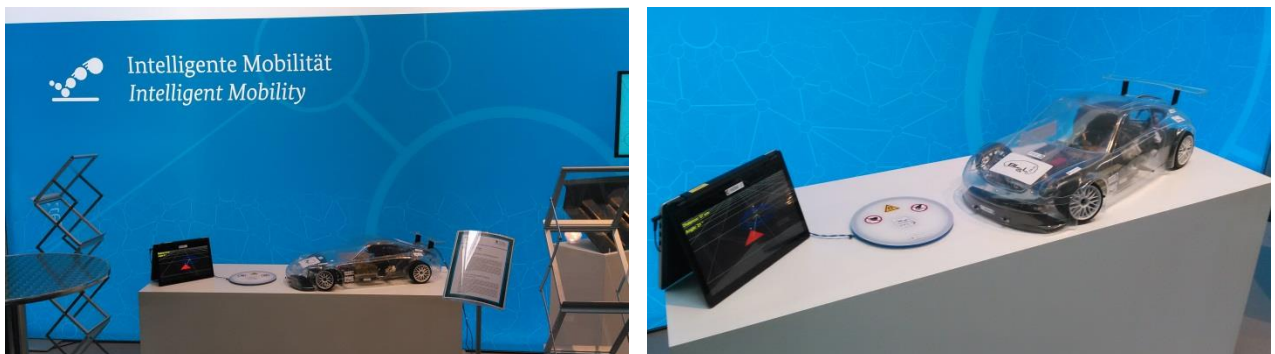
*Integration in Versuchsfahrzeuge 1/15-4/16 (IVK):*

Nach den erfolgreichen Tests mit einem Magnetfeldsensor wurde ein kleiner Prototyp anhand eines Modellfahrzeugs gebaut. Alle oben beschriebenen Komponenten wurden hierbei integriert. Anhand des Prototyps wurden anschließend die Algorithmen zur Positionsberechnung (Distanz und Winkel) erfolgreich getestet. Das System wurde 2015 an der Hannover MobiliTec Messe vorgestellt, wie in den folgenden Bildern zu sehen ist.



**Abbildung 17: Erster MPPS Prototyp an der MobiliTec 2015.**

Hierbei konnten die Besucher entweder das Fahrzeug oder die Spule mit der Hand selbst bewegen und dabei die Veränderung der Relativposition ohne spürbare Verzögerung an der 3D-Positionsanzeige beobachten. Der Prototyp wurde auch auf einer öffentlichen Veranstaltung in Weinstadt und auf der 3. Internationalen Clusterkonferenz 2015 in Berlin ausgestellt.



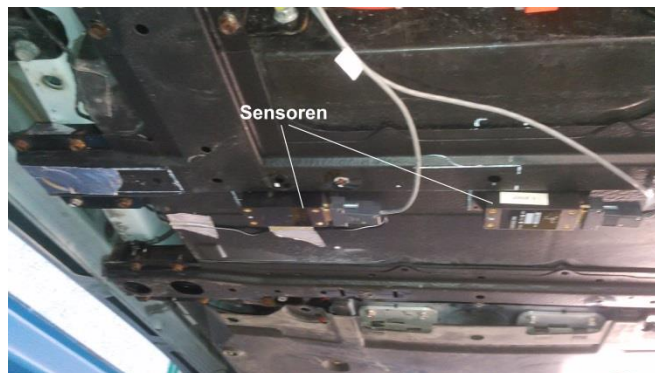
**Abbildung 18: MPPS Prototyp auf der 3. Internationalen Clusterkonferenz 2015.**

Daraufhin wurde die Messtechnik in einen rein elektrisch angetriebenen Pkw integriert, das vom FKFS bereitgestellt wurde. Es handelte sich um einen Citroen cZero. Der Prototyp ist in den folgenden Bildern zu sehen. Diese sind der dazugehörigen Pressemitteilung [5] der Universität Stuttgart entnommen.



**Abbildung 19: MPPS. Links: Elektrofahrzeug über der Ladespule. Rechts: 3D-Anzeige der Position der Ladespule (Empfängerspule rot, Ladespule blau). Fotos: Universität Stuttgart/IVK [5].**

Die beiden Sensoren wurden direkt an den metallischen Unterboden geklebt, wie im Folgenden zu sehen ist.



**Abbildung 20: Magnetfeldsensoren am metallischen Unterboden.**

Die hochempfindlichen Magnetfeldsensoren tasten das magnetische Pulssignal ab und senden die Informationen an das Steuergerät im Fahrzeug. Der zuvor erläuterte Algorithmus berechnet anschließend selbständig – ohne jegliche Kommunikation mit der signalgebenden Elektronik im Parkplatz – die Position der Ladespule. Diese wird dem Fahrer schließlich mithilfe der 3D-Applikation auf dem Tablet im Cockpit angezeigt, das den Fahrer bei der präzisen Ausrichtung des Fahrzeugs unterstützt. Der Fahrer kann hierbei die Bewegung des Fahrzeugs in Echtzeit verfolgen. Der aktuelle Prototyp weist einen Positionierungsradius von 3,5 Metern auf und hat eine Positionierungsgenauigkeit von wenigen Millimetern.

Im Oktober 2015 wurde der Prototyp erstmals öffentlich auf dem „Fields Of Innovations“ Event in Ludwigsburg vorgestellt.





**Abbildung 21: MPPS auf der Fields Of Innovations 2015 in Ludwigsburg. Im linken Bild mit Frau Dr. Christine Thomas vom BMBF beim Positionierungsvorgang.**

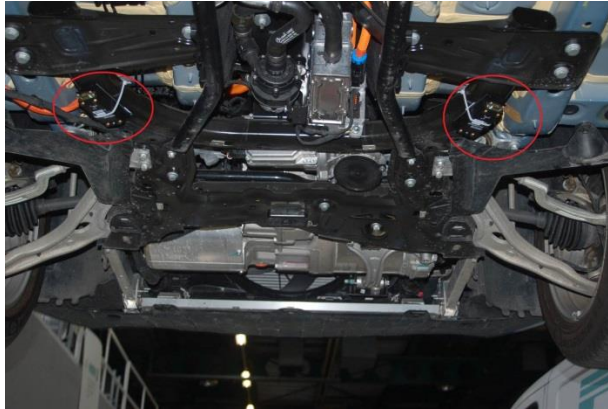
Die gleiche Technik wurde im April 2016 auf der MobilTec in Hannover demonstriert. Dieses Mal wurde ein Versuchsfahrzeug der Daimler AG – eine B-Klasse 250e – verwendet.



**Abbildung 22: MPPS in Daimler B250e auf der Hannover Messe 2016.**

Die beiden Magnetfeldsensoren wurden hierbei wieder direkt an den metallischen Unterboden angebracht (Abbildung 23). Genutzt wurde hierzu ein Querträger im Vorderbereich, wo auch der Ort der virtuellen Fahrzeugspule definiert wurde. Die Sensoren wurden symmetrisch zur Längsachse des Fahrzeugs montiert und per Datenkabel mit dem Steuergerät (Beaglebone Black) verbunden. Da das System nach der Veranstaltung wieder entfernt werden sollte, wurde das Steuergerät samt der Energieversorgung in den Motorraum platziert (Abbildung 24). Die Datenverbindung zur 3D-Positionsanzeige im Cockpit wurde mithilfe eines Routers (unten rechts im Bild) geschaffen. So konnten zyklisch die berechneten Positionsdaten der Ladespule zur Anzeige gesendet werden. Diese war auf dem Armaturenbrett platziert und nach außen gedreht (Abbildung 22), so dass der Besucher die Bewegung der Ladespule nachverfolgen konnte, wenn er sie mit dem Fuß hin und her schob. Hierzu wurden im Vorfeld kleine Räder an der Spule befestigt (Abbildung 22).





**Abbildung 23: Magnetfeldsensoren am Unterboden der B-Klasse.**



**Abbildung 24: Positionierungssteuergerät im Motorraum der B-Klasse.**

Weitere Veranstaltungen:

- Vorschlag zur Kommunikation für das MPPS beim Workshop ISO 15118 - IEC 61980, September 2016, Rom
- Vorstellung des MPPS bei der 78. Sitzung DKE/GAK 353.0.1 "Berührungsloses Laden von Elektrofahrzeugen", Oktober 2016, DKE, Frankfurt
- Vorstellung des MPPS beim SAE J2954 Main Taskforce Meeting, 12.01.2017, Audi AG, Ingolstadt

*Test und Validierung 1/15-3/16 (IVK):*

Parallel zur Integrationsphase wurde ein Versuchsaufbau erstellt, um die gefundenen Thesen zur Entzerrung der Flussdichteverteilung der Ladespule nachzuweisen. Der Aufbau war sehr aufwendig und hat viel Zeit in Anspruch genommen. Der Grund ist, dass spezielle physikalische Umgebungsbedingungen während der Versuchsdurchführung geschaffen werden mussten. In diesem Rahmen wurde komplexe Hard- und Software erstellt, die ausschließlich den Messungen dienen. Die Art der Versuche und die dazugehörigen Messergebnisse sind Bestandteil des noch laufenden Promotionsverfahrens an der Universität Stuttgart.

Darüber hinaus wurden die obigen Algorithmen realen Störungen des Fahrzeugs ausgesetzt, um zu sehen, wie robust die Algorithmen sind. Hierbei wurden die starken Störungen durch die Ströme der Servolenkung und des Antriebs genutzt. Die Abtastwerte der Sensoren wurden aufgezeichnet und anschließend der Algorithmus offline auf diese angewendet und das Ergebnis ausgewertet. Speziell für diese Analysezwecke wurde eine komplexe Software in MATLAB von MathWorks entwickelt. Das Ergebnis war, dass die Algorithmen die Störungen der Servolenkung in kürzester Zeit filtern konnte umgehen können, wohingegen die Störungen des Antriebs und der anderen elektrischen Komponenten auf die Positionierung keine großen Auswirkung hatten.

AP 5400: Zustandserkennung 5/13-12/15 (IVK)

Der Schwerpunkt des IVK lag in der Fahrzeugpositionierung und nicht in der Konzipierung der Ladeinfrastruktur. In diesem Sinne wurden die Aufgaben umverteilt. IPT hat die Zustandserkennung übernommen. Das IVK hat die freigewordenen Ressourcen genutzt, um zusätzlich zur geforderten Längspositionierung die Querpositionierung zu konzipieren und zu realisieren.

#### AP 5500: Integration 3kW Ladesystem in FKFS Ladestation 10/16-12/16 (IVK)

In diesem Arbeitspaket sollte das 3kW-System des IEW aus AP 2000 in die Forschungsstation des FKFS integriert werden.

Die Integration wurde erfolgreich abgeschlossen und beinhaltet seitens des IVK die folgenden Tätigkeiten:

- Unterstützung beim Einbaukonzept
- Beschaffung, Fertigung und Anpassung von Material zum Bau der Haltevorrichtung inklusive der dazugehörigen Verschraubungen
- Einbau der Leistungselektronik zusammen mit dem IEW
- Bereitstellung und Test der benötigten Anschlüsse zur Energieversorgung und Kommunikation (CAN)
- Dokumentation der an der Ladesäule durchgeführten Änderungen und Schaltpläne
- Einbau der Primärspule in den Parkplatz. Dies beinhaltet zusätzlich die Umsetzung von Maßnahmen gegen das Eindringen von Feuchtigkeit

Folgendes Bild zeigt die integrierte Leistungselektronik am IVK.



**Abbildung 25: IEW Leistungselektronik in der FKFS Ladestation.**

#### AP 7100: Integration 3kW Ladesystem in den Smart des IVK 10/16-12/16 (IVK)

In diesem Arbeitspaket sollte die Sekundärspule des 3-kW-Systems des IEW in ein Forschungsfahrzeug des IVK eingebunden werden. Die Integration ist abgeschlossen und wurde anhand des IVK Smart durchgeführt. Das Fahrzeug wurde schon im Vorgängerprojekt BIPoL verwendet. Dementsprechend wurde die bestehende Sekundärspule samt der Blindleistungskompensation ausgebaut und dem IEW zum Umbau und Test übergeben. Anschließend folgte der Wiedereinbau durch das IVK. Das IVK unterstützte vor Ort die Abnahmetests.

### AP 6300: Probandenstudie 10/15-2/16 (IVK)

In diesem Arbeitspaket sollte das IVK eine kleine Probandenstudie zur Bewertung der verschiedenen Positionierungsassistenten aus AP 3400 durchführen. Ziel ist es, erste Bewertungen und Rückmeldungen von End-Anwendern zu diesen Systemen zu erhalten. Auf deren Basis kann dann die Weiterentwicklung eines Systems in Folgeprojekten verbessert und der Mehrwert gesteigert werden.

Generell steht das entwickelte Positionierungsverfahren des IVK im Vordergrund. Wie zuvor dargestellt, funktioniert dieses fehlerfrei und deckt die meisten Anforderungen für die Fahrzeugpositionierung ab. Daher macht es mehr Sinn den Fokus nicht auf einen Vergleich von Assistenzsystemen zu richten, sondern auf eine andere Frage, die immer wieder aufkommt und bisher nicht beantwortet werden konnte: Kann das Induktivladen die Benutzerakzeptanz von Elektrofahrzeugen erhöhen? Hintergrund der Frage ist das benutzerunfreundliche Kabelladen, das mit seinem geringen Komfort weniger akzeptiert ist und damit auch die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen verringert. Insbesondere bei schlechtem Wetter, wenn es kalt ist, es regnet oder schneit, ist das Einstecken des Kabels eine lästige Aufgabe, bei der sich der Fahrer schmutzig machen kann.

Beide Ladetechnologien werden als ein Prozess betrachtet, den der Benutzer durchführen muss. Beispielsweise ist die adäquate Positionierung des Fahrzeugs ein Teil des Induktivladens. So wird die eingangs vorgestellte Fragestellung, welcher Prozess die höhere Prozessakzeptanz hervorruft, mittels der Probandenstudie untersucht. Die erforschte und umgesetzte IVK Positionierungsmethode bietet für diese Untersuchung neben der benötigten Präzision einen Positionierungsradius von 3,5m und eine Echtzeitanzeige während der Positionierung.



**Abbildung 26: MPPS - Magnetic Pulse Positioning System.**

Die Methodik und die Ergebnisse der Probandenstudie, die im Rahmen des Projekts BIPoL<sup>plus</sup> in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Ilmenau durchgeführt wurde, sind in [6] veröffentlicht.

Es wurde untersucht, wie die affektive, kognitive und konative Wahrnehmung der Benutzer mit Hinsicht auf die beiden Ladeprozesse ist. Hierbei wurde festgestellt, dass in allen drei Kategorien der Akzeptanz das Induktivladen höher akzeptiert ist als das Kabelladen. Die Mehrheit der Probanden führte den Prozess zum Induktivladen zudem schneller aus, als dies beim Prozess des Kabelladens der Fall war. Das Positionierungssystem sichert damit nicht nur eine hohe Akzeptanz des Induktivladens, sondern allgemein auch die von Elektrofahrzeugen.

### **Darstellung der Ergebnisse der AUFSTOCKUNG für das IVK**

Im Rahmen von BIPoL<sup>plus</sup> entstanden weitere Ansätze zur Optimierung und Weiterentwicklung des Positionierungsverfahrens, die die Chance der Verwertung und damit die Überführung des patentierten

Verfahrens durch entsprechende Firmen wie Fahrzeughersteller oder –Zulieferer in ein Serienprodukt deutlich erhöhen. Hierzu wurde die Aufstockung des Vorhabens beantragt und bewilligt. Die Herausforderungen und Ergebnisse der Aufstockungen werden im Folgenden erläutert.

In BIPoL<sup>plus</sup> wurde ein erster Prototyp mit zwei Sensoren aufgebaut. Diese geringe Sensoranzahl ermöglicht lediglich die Umsetzung von einfachen Algorithmen zur Positionierung, wodurch die Genauigkeit der Positionierung noch zu optimieren ist. Im Rahmen von BIPoL<sup>plus</sup> wurde gezeigt, dass das magnetische Positionierungssignal die in Deutschland gültigen Grenzwerte und Normen nicht einhält und dem Menschen Schaden zuführen kann. Dieser Sachverhalt führt zwingend dazu, den Strom so stark zu begrenzen, dass ein sehr kleiner Positionierungsbereich entsteht. Gefordert ist seitens der OEMs ein Bereich von bis zu 5 Metern. Weiter werden aktuell kleine Ferritplatten zur Entzerrung des Magnetfelds am Unterboden des Fahrzeugs verwendet, die nur bedingt zur Montage geeignet und zusätzliche Kosten verursachen. Abschließend ist nicht zwingend sichergestellt, dass das Positionierungsverfahren des IVK mit anderen Spulenarten funktioniert und somit interoperabel verwendet werden kann. Forschung im Bereich der Flussführung und Felddetektion ist daher in diesem Bereich dringend erforderlich.

#### AP 3110, 4110, 5110: Sicherheitskonzept 01/16-06/16 (IVK)

Um diesen Richtlinien während des Positionierungsvorgangs gerecht zu werden, wurde im Rahmen von BIPoL<sup>plus</sup> ein theoretisches Konzept entwickelt und mit FEM-Simulationen bestätigt. Es beinhaltet den Einbau einer Positionierungsspule in den Parkplatz. Mit dieser wird ein deutlich höherer Positionierungsradius erzielt und gleichzeitig die magnetischen Grenzwerte des in Deutschland gültigen Standards ICNIRP 1998 nicht überschritten. Die Spule sollte in diesem Arbeitspaket entworfen, gebaut und in die FKFS Forschungsstation integriert werden. Abschließend sollte das Konzept hinsichtlich der Sicherheit und der wichtigen magnetischen Eigenschaften für die Positionierung verifiziert werden.

Der Ansatz mit einer zweiten Spule funktioniert theoretisch, ist aber komplex, aufwendig und teuer. Beispielsweise wird eine zweite Wicklung benötigt, die zudem in eine Form gesetzt werden muss. Darüber hinaus muss sichergestellt werden, dass sich Ladespule und Positionierungsspule sowohl während des Ladevorgangs als auch während Positionierungsvorgangs nicht gegenseitig beeinflussen bzw. die Elektronik nicht beschädigt wird. Ein weiterer Punkt ist, dass der Parkplatzboden jedes Mal ausgehoben werden muss, um die Positionierungsspule zu platzieren. Schließlich kommt hinzu, dass dadurch das Konzept einer mobilen Ladespule verloren geht. Gerade für die Heimanwendung in der Garage ist dies jedoch eine wichtige Anforderung und damit Voraussetzung für die Anwendung in der Serie.

Da zudem das Potential beim Nutzen der Ladespule als Signalgeber noch nicht vollständig ausgeschöpft ist, wurde genau dieser Ansatz weiterverfolgt. In diesem wird die induzierte effektive Körperstromdichte (verursacht durch die Ladespule, wenn ein Mensch auf ihr liegt) reduziert indem zum einen die Anstiegszeit der Pulsflanken des Signals vergrößert wird, und zum anderen indem die Pulsfrequenz verringert wird. Hierbei wurde gezeigt, dass eine Einstellung gefunden werden kann, bei der die Grenzwerte gemäß dem Standard ICNIRP 1998 nicht überschritten werden und die Algorithmen zur Bestimmung der differentiellen magnetischen Flussdichte  $B_{diff}$  immer noch funktionieren; denn die gestiegene Pulsanstiegszeit hat einen verkleinerten stationären Bereich zur Folge. Die Algorithmen erwiesen sich in dieser Hinsicht sehr robust. Für die Signalgebung und den Nachweis wurde die Spule aus Abbildung 6 bei einer Durchflutung von 8A verwendet, um ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis in 3m Entfernung zu bekommen.

Der Nachweis wurde simulativ erbracht, indem die Ausbreitung der induzierten Körperströme für verschiedene Körperradien numerisch berechnet wurde. Hierbei wurde ein kreisförmiges Körpermodell mit einer typischen Leitfähigkeit von  $0,2\text{Sm}^{-1}$  zugrunde gelegt. Die Stromdichten lassen sich auf diese Weise hinreichend genau berechnen, so dass ein Bau von Equipment zur Messung nicht erforderlich ist. Der Nachweis wurde für die Grundwelle des Trapezsignals durchgeführt und gibt eine erste Abschätzung. Der magnetische Grenzwert konnte um mindestens 25% unterschritten werden. Der Nachweis ist jedoch auf diese Weise unvollständig, denn nicht nur der Grenzwert für die Grundfrequenz sondern auch die Grenzwerte aller anderen im Signal enthaltenen Frequenzen müssen überprüft werden. Hierzu ist im Vorfeld eine Spektralanalyse notwendig, die auf ein entsprechendes aufgezeichnetes Signal angewendet wird. Die verwendeten Magnetfeldsensoren bieten hierzu jedoch keine hinreichend hohe Abtastfrequenz. Die Anschaffung von zusätzlichem Equipment war im Rahmen der Budgetierung nicht möglich. Im Rahmen der Aufstockung blieb es daher bei der simulativen Abschätzung.



Auch wenn die Grenzwerte auf diese Weise eingehalten werden, ändert sich nichts an dem laut verschiedener OEMs zu geringen Positionierungsradius von 3m. Dieser lässt sich jedoch bei gleichbleibender Signalstärke durch den Einsatz weiterer Sensoren auf 4-5m erhöhen (siehe APs 4120 und 5120).

#### AP 3120, 4130, 5130: Magnetfeldentzerrung 01/16-06/16 (IVK)

Anfänglich wurde hochpermeables Ferritmaterial verwendet, um das Magnetfeld am Unterboden des Fahrzeugs zu entzerren und somit eine präzise Positionierung zu ermöglichen. Diese sind empfindlich gegenüber Druckbelastungen und daher nur bedingt geeignet für die Montage. Dies äußert sich in einer stark gesunkenen Permeabilität. Des Weiteren ist das Material teuer in der Herstellung.

Aktuelle theoretische Modelle und die hiervon abgeleiteten Hypothesen, die Bestandteil des noch laufenden Promotionsverfahrens an der Universität Stuttgart sind, besagen dass die Verzerrung des Magnetfelds, die durch den metallischen Unterboden des Fahrzeugs entsteht, ohne die Nutzung von hochpermeablem Ferritmaterial gelöst werden kann. Dies wurde in diesem AP experimentell anhand des Versuchsfahrzeugs cZero nachgewiesen. Hierbei wurden die MR Sensoren direkt auf den metallischen Unterboden montiert.

Weitere Tests bezogen auf die Robustheit der Methode, z.B. wenn auf Stahlbeton positioniert wird, wurden durchgeführt. Hier konnte sogar ohne die Anwendung der hergeleiteten Modelle bereits eine hohe Positionierungsgenauigkeit von 5cm erreicht werden. Darüber hinaus wurde die Methode unter unterschiedlichen Temperaturen und Erdmagnetfeldern getestet und gezeigt, dass diese keinen signifikanten Einfluss auf die Positionierungsgenauigkeit haben.

#### AP 4120, 5120: Optimierung der Messwerterfassung 04/16-12/16 (IVK)

Die Messwerterfassung nutzt derzeit die Differenz zweier benachbarter Halbwellen des magnetischen Pulssignals zur Berechnung der echten magnetischen Flussdichte. Der Algorithmus wurde 2015 in Baden-Baden auf der AUTOREG VDI Konferenz vorgestellt. Nachteilig ist, dass er mit lang andauernden starken Gradienten des Magnetfeldes – verursacht durch elektrische Geräte im Fahrzeug – nicht immer wie vorgesehen funktioniert. Die Ursache ist, dass der Gradient das Pulssignal so stark verzerrt, dass die Pulshalbwellen nicht mehr richtig detektiert werden können. Auch wenn diese richtig detektiert werden könnten, würde die berechnete Position extrem schwanken, da die Steigungen der stationären Bereiche der Pulshalbwellen nicht berücksichtigt werden. Die Idee ist nun, sowohl die positive als auch die negative Pulshalbwelle des Signals mithilfe von kubischen Splines zu interpolieren. Somit würden die Steigungen mitberücksichtigt und es wäre eine genauere Positionsschätzung möglich. Zudem wäre es möglich, die Berechnung der magnetischen Flussdichte unempfindlich gegenüber lang andauernde starke magnetische Gradienten durchzuführen. Dies ist möglich, da der magnetische Gradient die Differenz der positiven und negativen Pulshalbwelle - auf die es schließlich ankommt - nicht zerstört.

Der Ansatz brachte im Feldeinsatz jedoch keine Verbesserungen. Der Grund war, dass das Signal zum Beispiel von der Servolenkung so stark verzerrt wird, dass der Spline der positiven Pulshalbwellen den Spline der negativen Pulshalbwellen schneidet. Erst die zusätzliche Betrachtung von zeitlich deutlich zurückliegenden Abtastwerten erlaubte eine sinnvolle Berechnung der Splines. In diesem Fall war die berechnete Position der Ladespule bereits veraltet, so dass starke Verzögerungen auf der Positionsanzeige wahrgenommen werden konnten. Der Ansatz blieb somit erfolglos.

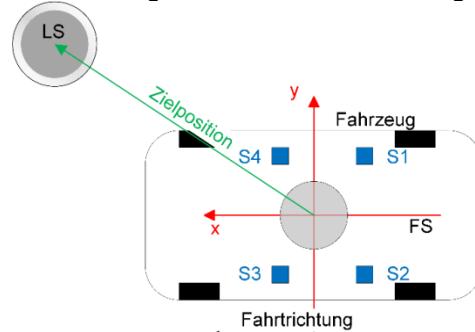
#### AP 4120, 5120: Verbesserter Algorithmus zur Positionsschätzung 04/16-12/16 (IVK)

Der aktuelle Prototyp für die Positionierung verwendet nur 2 Magnetfeldsensoren und schätzt die Position der Ladespule mittels einfacher 2-Sensor-Trilateration. Dadurch ist es nicht möglich zwischen Vorwärts- und Rückwärtsbewegung des Fahrzeugs zu unterscheiden. Daher ist eine Lösung mit mehreren Sensoren notwendig. Diese hat den weiteren Vorteil, dass die Genauigkeit der Trilateration zunimmt. Zudem kann der Positionierungsbereich durch eine geschickte Sensoranordnung weiter erhöht werden. Hierzu muss der bestehende Algorithmus zur Positionsschätzung funktional erweitert werden. Darüber hinaus können effizientere Verfahren zur Positionsschätzung zusammen mit der Trilateration kombiniert werden. Hierbei wurden im Rahmen von BIPoL<sup>plus</sup> die „Least Median of Squares“-Regression und die „Reweighted Least



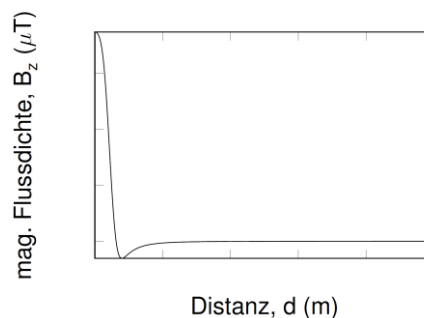
Squares“-Regression untersucht und implementiert. Diese sollen in den aktuellen Prototyp integriert werden. Hierbei gilt es das Optimum zwischen Genauigkeit und Laufzeit zu finden und die Algorithmen entsprechend zu parametrieren und zu optimieren.

In der Aufstockung vom Projekt soll das Positionieren von jedem Quadranten aus funktionieren und den Bereich um die Ladespule, der nicht eindeutig bestimmt werden kann, gefiltert werden.



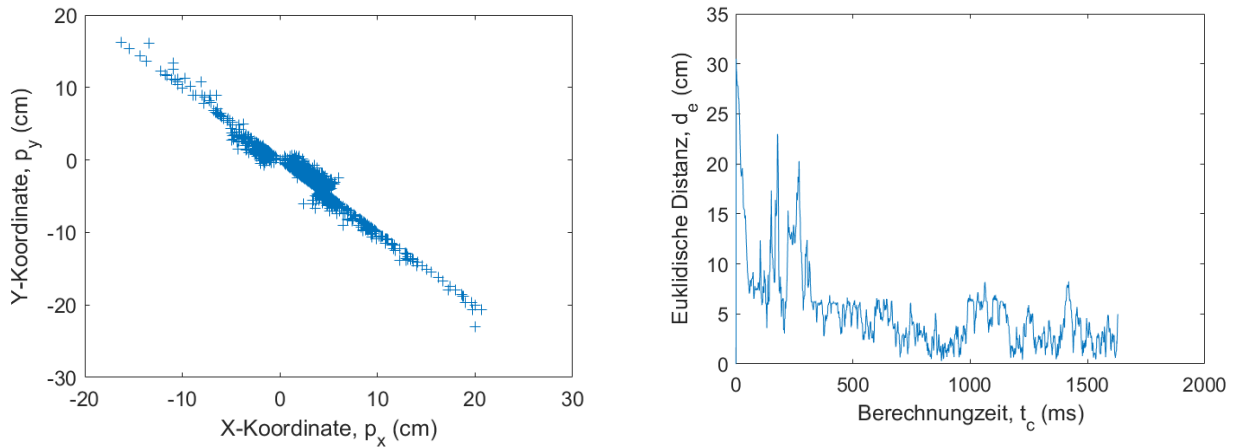
**Abbildung 27: Koordinatensystem des Fahrzeugs.**

In der Abbildung 27 ist das Fahrzeug mit den Sensoren ersichtlich. Um die Anforderungen des Positionierens aus allen Richtungen zu ermöglichen bzw. um die Position in der Ebene eindeutig zu bestimmen, müssen mindestens 3 Sensoren verwendet werden. Die Ladespule und die Fahrzeugspule sind jeweils die dunkelgrauen Kreise dargestellt. Im Nahbereich der Ladespule ist der Bereich, der nicht eindeutig einer Distanz zugewiesen werden kann, in hellgrau eingezeichnet. Die Sensoren sind für die ersten Tests im Quadrat um den Ursprung des Koordinatensystems platziert worden. Die Fahrzeugspule befindet sich im Ursprung des Koordinatensystems. Für den Positionierungsvorgang wird der spezifische Flussdichtenverlauf der Positionierungsspule verwendet. Dieser ist für eine bestimmte Spulengeometrie, Windungsanzahl, Spulenstrom und Höhe der Sensoren zum Boden berechnet worden. In Abbildung 28 ist die magnetische Flussdichteverteilung beispielhaft dargestellt. Im Bereich über der Ladespule ist ein starkes, positives Signal messbar, das sich mit der Entfernung abschwächt und negativ wird und mit größer werdendem Abstand kaum messbar wird. Für die Eindeutigkeit beim Positionieren wird der streng monotone Verlauf vom Minimum betragsmäßig verwendet.



**Abbildung 28: Magnetische Flussdichteverteilung der Ladespule.**

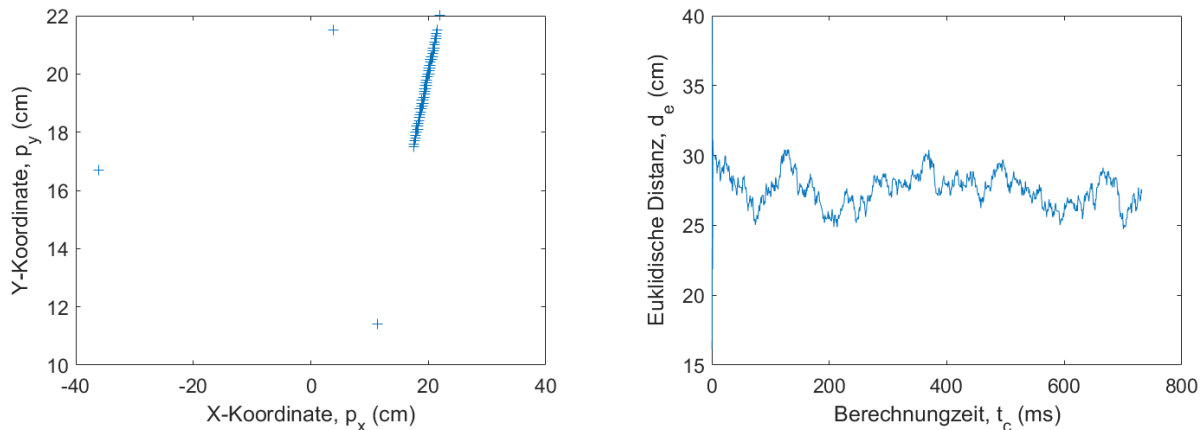
Der Verlauf vor dem Minimum ist nicht eindeutig einer einzelnen Distanz zuzuordnen. Sensoren in diesem Bereich und über der Ladespule liefern verfälschte Messdaten und die Positionsschätzung führt zu starken Abweichungen. Aktuell ist der Algorithmus von Yu Zhou wie folgt implementiert: Es wird die Positionsschätzung anhand von vier Sensoren von vier unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt. Diese Anzahl an Messstellen ermöglichen es verschiedene Kombinationen von Sensoren zur Berechnung zu verwenden. Es ergeben sich dadurch 256 Permutationen. Die Laufzeit von der Berechnung muss unter 6,5ms liegen. Mit dieser Bedingung muss die Anzahl der Permutationen begrenzt werden. Für die nachfolgenden Tests ist die Anzahl auf 51 Permutationen begrenzt worden. Nach der Berechnung der Permutationen erfolgt eine Auswahl mit einer LMS (Least Median Square) Regression. Dabei wird die Lösung mit dem Minimum des Residuum Quadrates ausgewählt und die Daten der Visualisierung weitergegeben.



**Abbildung 29: Position ohne Filterung (links). Euklidische Distanz ohne Filterung (rechts).**

In Abbildung 29 sind die Messungen für die Positionsschätzung der Zielposition dargestellt. Die Zielkoordinaten sind in diesem Fall (20,20) cm. Bei diesem Abstand ist ein Sensor innerhalb des nicht eindeutig bestimmbar Bereichs und liefert somit falsche Messdaten. Bei dieser Positionsberechnung erfolgt die Permutationsbildung anhand eines festgestellten Schemas. Dadurch besitzt dieser Algorithmus eine große Anfälligkeit hinsichtlich verfälschter Daten.

Um dieses Problem zu lösen, wurde in einer Masterarbeit am IVK ein Permutationsfilter zur Detektion des nicht eindeutig bestimmbar Bereichs entwickelt. Dieser Filter arbeitet mit einer Vorselektion der Messdaten anhand einer groben Abschätzung der Ladespule und wertet die Abweichungen der Messdaten zu diesem Punkt aus. Dabei werden alle Lösungen von den Schnittpunkten der ermittelten Distanzen ausgewertet. Durch diese Berechnung ergibt sich eine konzentrierte Lösungswolke, die eine grobe Abschätzung der Position der Ladespule anzeigt. Zu diesem Referenzpunkt werden die Sensoren mit der größten Abweichung aussortiert. Zusätzlich finden noch Laufzeitoptimierungen statt, um den gestiegenen Rechenbedarf auszugleichen.



**Abbildung 30: Position mit Filterung (links). Euklidische Distanz mit Filterung (rechts).**

In Abbildung 30 sind wieder die Lösungen der Zielposition aufgetragen. Im Vergleich zum Lösungsverlauf ohne Vorselektion ist eine Lösungsschar ohne große Schwankungsbreite erkennbar. Die Zielposition wird mit einer Abweichung von  $\pm 2$ cm eingehalten. Der Sensor innerhalb des nicht eindeutig bestimmbar Bereichs wird herausgefiltert und nicht für die Permutationsbildung betrachtet. Die Lokalisierung der Ladespule ist jetzt nicht nur genauer, sondern auch die Berechnungszeit ist um ca. 60% gesunken. Es kann nun rückwärts und vorwärts positioniert werden. Zudem ergibt sich mit der aktuellen Sensoranordnung im Versuchsfahrzeug cZero ein Positionierungsradius von 4,5m statt 3,5m, was absolut ausreichend ist für ein kleines Fahrzeug. Bei einem größeren Fahrzeug können die Sensoren von der

Fahrzeugspule weiter weg platziert werden, wodurch der Positionierungsradius  $>5\text{m}$  wird. Der Einbau einer Positionierungsspule wie anfänglich vorgeschlagen wird also nicht mehr benötigt.

Im Rahmen des Vorhabens BIPoL<sup>plus</sup> wurden am IVK studentische Arbeiten betreut:

- Carsten Binz, Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Positionsschätzung, Bachelorarbeit
- Valentin Hauser, Entwicklung einer Software zur Ansteuerung einer Leistungselektronik, Studienarbeit
- Christoph Seifert, Entwicklung eines Permutationsfilters zur optimierten Ortung der Ladespule, Masterarbeit

## **b. Darstellung des Projektpartners IEW:**

AP1100 (1PM IEW) Zuarbeit Lastenheft

AP2100 (4PM IEW) Auslegung und Simulation – Topologien und Feldrechnungen

AP2200 (3PM IEW) Auslegung und Simulation – Systemsimulation Effizienz

Es wurden im Rahmen des AP2100 verschiedene Topologien für die induktive Übertragungsstrecke identifiziert, untersucht und bewertet. Die maßgeblichen Bewertungskriterien und Anforderungen, welche in Zusammenarbeit mit AP1000 (Lastenheft) erarbeitet wurden waren:

- Keine zusätzliche DC/DC-Stufe auf der Fahrzeugseite
- Möglichst geringer Einbauraum auf der Fahrzeugseite
- Grenzen für Ströme und Spannungen
- Verhalten der Topologie bei geforderter Variation der Ladeleistung und Veränderung der magnetischen Kopplung aufgrund der geforderten Positionierungstoleranz

Die folgenden Topologien konnten in Absprache mit allen Projektpartnern daraufhin ausgeschlossen werden:

- Alle Varianten mit fahrzeugseitigen Parallelkompensation, da die Schwingkreisströme bei der geforderten Leistung die in AP1000 (Lastenheft) gesetzten gewünschten Werte überschreiten würden. Zugleich erfordern diese Varianten eine zusätzliche Induktivität bei der Gleichrichtung.
- Alle Varianten mit einer Kombination aus parallel- und Serienkompensation (Gyrator) fahrzeugseitig, aufgrund der zusätzlich nötigen Bauelemente (unter anderen HF-Drossel).
- Gyrator (Kombination aus Serien- und Parallelkompensation) in der Station, Serienkompensation im Fahrzeug. Diese Variante verursacht im Teillastbereich Probleme in der primärseitigen Leistungselektronik, da eine Dimensionierung aller Parameter auf den Nennbetrieb (22kW) bei einem Teillastbetrieb ein resonantes Schalten bei der gewünschten Frequenz nicht mehr möglich ist, und somit die Leistungselektronik übermäßig belastet werden würde, was sich negativ auf den Wirkungsgrad auswirken würde.

Also beste Lösung für die Realisierung der induktiven Übertragungsstrecke wurde die Topologie mit beidseitiger Serienkompensation identifiziert. Für diese Topologie wurden weitergehende analytische Untersuchungen durchgeführt und ein Auslegungsverfahren erarbeitet. Die folgende Abbildung zeigt eine Übersicht des induktiven Systems ab der Netzseitigen Zwischenkreiskapazität:

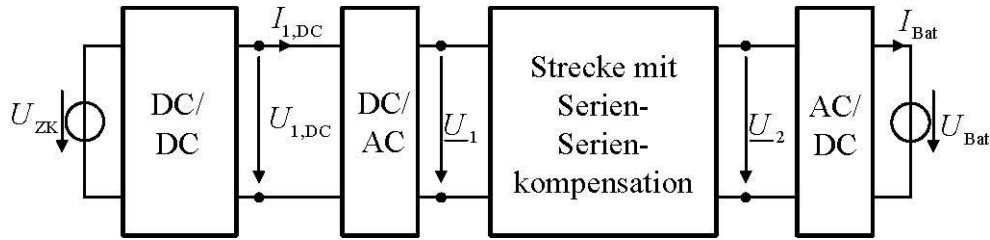


Abbildung 31: Schematische Übersicht der Leistungspfad eines induktiven Ladesystems.

Für die analytische Berechnung und Modellierung des Systemverhaltens wurde eine Grundwellenanalyse durchgeführt, bei welcher der primärseitige DC/DC-Steller mit anschließendem DC/AC-Umrichter als eine sinusförmige Spannungsquelle und der sekundärseitige Gleichrichter inklusive der Batterie als ein äquivalenter Lastwiderstand modelliert wurde. Die folgende Abbildung zeigt das für die Grundwellenanalyse relevante vereinfachte Ersatzschaltbild der Anordnung.

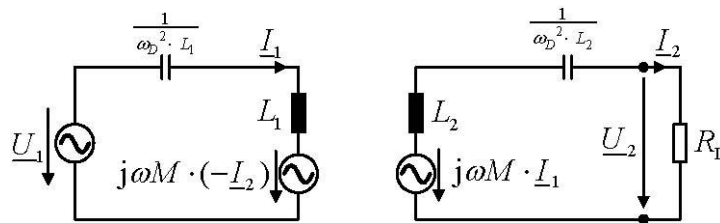
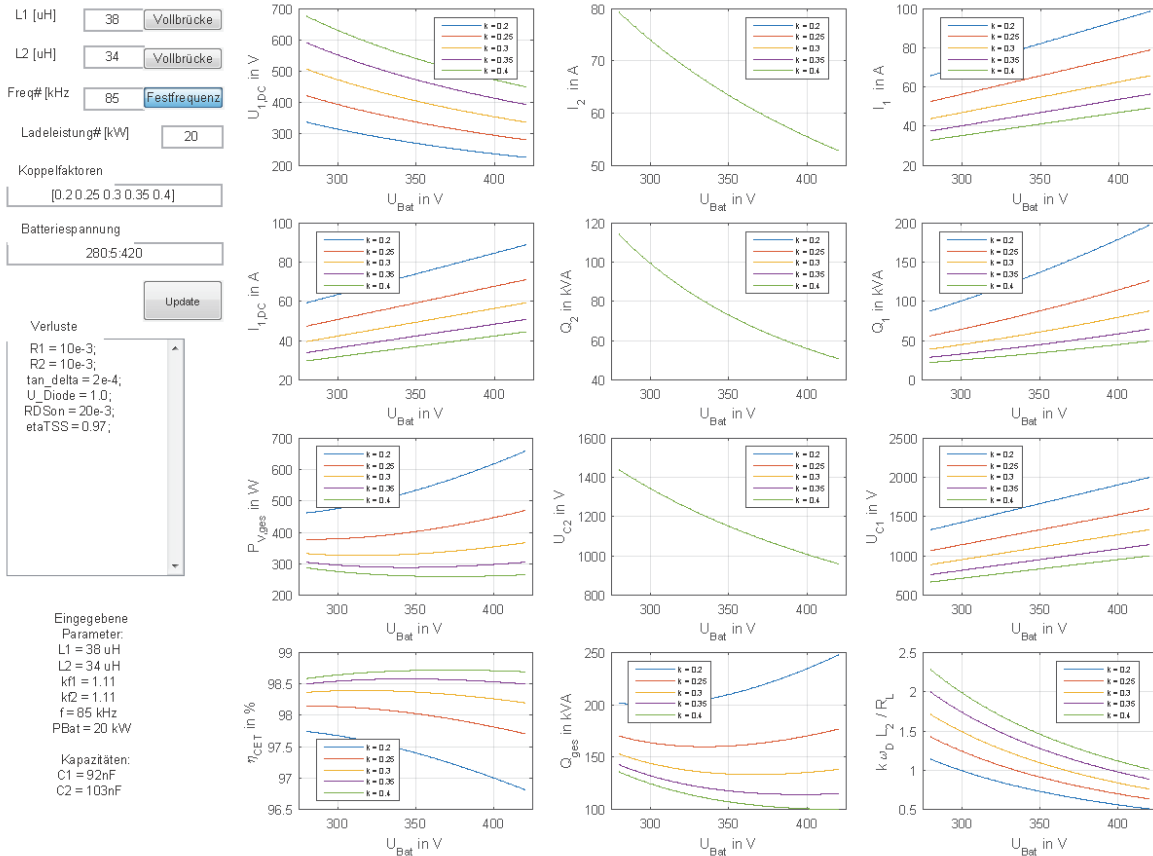


Abbildung 32: Grundwellenersatzschaltbild für ein induktives Ladesystem.

Für eine detailliertere Dokumentation der analytischen Berechnungen sei auf die Veröffentlichung [7] , sowie die noch ausstehende Veröffentlichung der Dissertationsschrift von Herrn Zimmer (siehe Abschnitt 4. Voraussichtlicher Nutzen) verwiesen.

Auf Grundlage dieser Modellierung und den daraus abgeleiteten Gleichungen wurde ein Auslegungstool erstellt, mit welchem sämtliche erwarteten Verläufe der relevanten Größen (beide Spulenströme, Spannungsbelastungen der Kompensationen, Blindleistung in den Kompensationen, benötigte primärseitige Spannung) in Abhängigkeit aller Veränderlicher Parameter (Batteriespannung, Bereich des Koppelfaktors, Ladeleistung) grafisch dargestellt werden können.

Mit Hilfe des Auslegetools konnten alle relevanten Parameter bestimmt/bzw. verifiziert werden. Die oben gezeigten Größen für Primär- und Sekundärinduktivität (wie Sie auch im Projekt realisiert wurden) decken alle relevanten Anforderungen (Ströme kleiner 100A, Variation der Batteriespannung, benötigte DC-Spannung, etc.) ab und sind gleichzeitig sehr nahe am theoretischen Optimum was die in System zirkulierende Blindleistung anbelangt. Woraus sich auch ein sehr guter (simulierter) Wirkungsgrad der reinen Übertragungstrecke von >97% ergibt.



**Abbildung 33: Verläufe relevanter Größen unter der Berücksichtigung der auftretenden Varianzen in Kopplfaktor und Batteriespannung**

Ausgehend von den mit dem Auslegungstool ermittelten Verläufen aller Spannungen und Ströme wurden einzelne Verlustleistungen durch vereinfachte Verlustmechanismen berechnet, die da sind:

- Ohm'sche Verluste in den Übertragungsspulen, charakterisiert durch einen ohmschen Serienwiderstand, und berechnet mit den erwarteten Strömen
- Verluste in den Kompensationskondensatoren, repräsentiert durch ihren Verlustfaktor  $\tan(\delta)$
- Verluste im Gleichrichter, charakterisiert durch eine konstante Durchlassspannung der Dioden
- Verluste im Umrichter, charakterisiert durch einen Durchlassverlustwiderstand

Alle Verläufe von Strömen und Spannungen, sowie Verlustleistungen wurden auch mit Hilfe von Schaltungssimulationen mit der Software PLECs in Zeitbereich simuliert und mit den Ergebnissen aus der vereinfachten Bestimmung über das Auslegetool verglichen. Der Vergleich zeigte eine ausreichend gute Übereinstimmung, so dass eine Systemauslegung mit den vereinfachten Berechnungen möglich ist.

Für die Simulationen mit PLECs wurden zunächst Erfahrungswerte für die Verlusteffekte angenommen, welche dann nach und nach durch reale Werte bzw. Datenblattangaben der verwendeten Komponenten ersetzt wurden, sobald diese im Laufe der Realisierungsphase durch die Projektpartner bekannt wurden.

Mit das wichtigste Ergebnis dieser Simulationen ist die Erkenntnis, dass das induktive Energieübertragungssystem durch die gewählte Auslegung der Spulen, sowie durch eine geeignete Regelstrategie möglichst in einem Bereich betrieben wird, in dem die gesamte im System zirkulierende Blindleistung minimiert wird, da die Verluste in den Spulen und in den Kompensationskapazitäten näherungsweise linear mit der umgesetzten Blindleistung korrelieren. Dadurch konnten auch die worst-case-Betriebspunkte, welche durch die Topologieauswahl und den Verzicht einer Sekundärseitigen DC-DC-Wandlerstufe auftreten, identifiziert werden und in die Systemauslegung mit eingebracht werden.



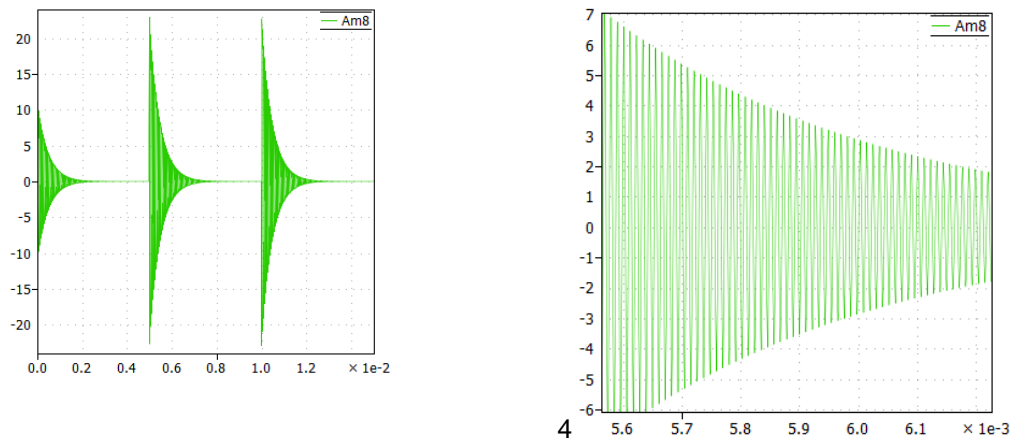
## AP2400 (1PM IEW) Auslegung und Simulation – Sicherheit

Die Verfahren zur Erkennung von Gefahren (AP2400) beziehen sich ausschließlich auf das Modell der Leistungsübertragung und den direkt daraus folgenden Möglichkeiten. Dies bedeutet, dass ohne zusätzliche Systeme, nur anhand des elektrischen Verhaltens des Systems, festgestellt werden soll, ob ggf ein nicht-sicherer Betriebszustand auftreten kann. Ein potentiell nicht-sicherer Zustand ist hierbei definiert als eine Zustand, welcher nicht dem erwarteten Zustand entspricht. Ursachen dafür könnten z.B. sein:

- Fehlpositionierung, welche einen kleineren als den erlaubten Koppelfaktor hat, bis hin zu keiner Kopplung (Auto nicht auf der vorgesehenen Ladespule)
- Falsche Batteriespannung, bzw. keine Batterie angeschlossen
- Fremdkörper zwischen den Spulen, welcher einen Einfluss auch das Übertragungsverhalten hat

Die Ergebnisse lassen sich in zwei Teile trennen:

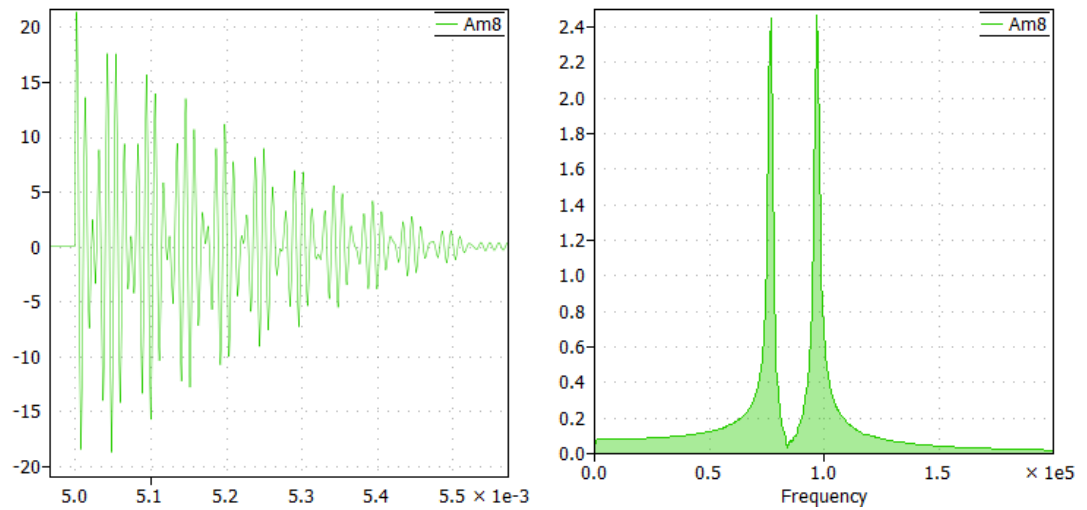
- VOR der eigentlichen Energieübertragung: Aussenden eines Testimpulses, bzw. Anregen der Primärspule mit geringer Spannung und sehr geringer Frequenz. Durch Messung des Stromes in der Primärspule und einer FFT lassen sich die Eigenfrequenzen des Systems bestimmen. Daraus sind durch Vergleich mit Kalibrierungsmessungen Rückschlüsse auf das System möglich. Dies sind z.B.
  - Eine Abweichung der Eigenfrequenz ohne ein Abnehmer (Auto) deutet auf einen metallischen Gegenstand über der Primärspule hin.
  - Eine Abweichung der Eigenfrequenz mit „bereitem“ Abnehmer (Auto) deutet auch auf einen metallischen Gegenstand über der Primärspule hin, oder eine unzulässig hohe Fehlpositionierung hin. Für den zeitlichen Verlauf (Frequenz und Abklingverhalten) lassen sich erlaubte Werte vordefinieren, bzw. einlernen. Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch den Verlauf der Primärstromes bei Anregung mit einer niedrigen Frequenz sowie das Abklingverhalten:



**Abbildung 34: Abklingverhalten des Primärstromes bei Anregung mit 10Hz**

- Das Messen von zwei Eigenfrequenzen, wenn der Abnehmer über der Primärspule positioniert ist, die Sekundärspule jedoch kurzgeschlossen wird. Eine Auswertung dieser zwei Frequenzen erlaubt eine grobe Bestimmung der magnetischen Kopplung der beiden Spulen, da die Werte der beiden Frequenzen unter anderem vom Koppelfaktor abhängen. Die folgende Abbildung zeigt den simulierten Verlauf des Primärstromes, sowie ein

Fourier-Spektrum davon, für das System, wenn die Sekundärseite kurzgeschlossen ist:

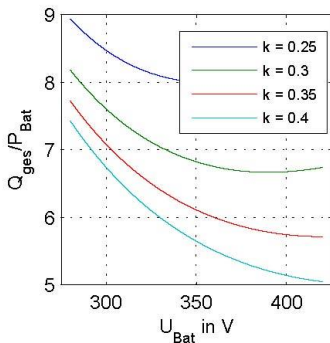


**Abbildung 35: Abklingverhalten des Primärstromes bei Anregung mit 10Hz und kurzgeschlossener Sekundärseite**

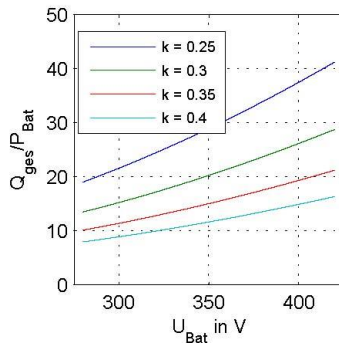
- WÄHREND der Energieübertragung:
  - Vergleich mit den berechneten Werten von Strom und Spannung auf der Primärseite aus der Simulation bzw. Vergleich mit erwarteten Maximalwerten.  
Dies lässt sich genauer einschränken, wenn zusätzlich Messwerte durch die Kommunikation zwischen Primär- und Sekundärseite ausgetauscht werden.
  - Sollte die Primärseitige Regelung für den Spulenstrom große Änderungen innerhalb kurzer Zeit (Sekunden), detektieren ist dies auch Zeichen für einen nicht gewünschten Zustand, da sich im „normalen“ laufenden Betrieb keine Größen schlagartig ändern sollten.

AP8100 (1PM IEW) Anforderungen an die Interoperabilität

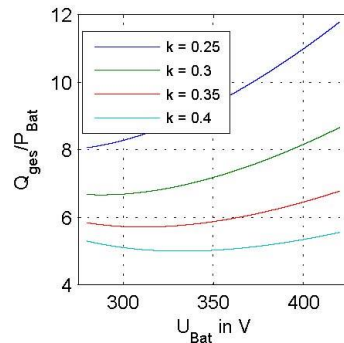
Die Hauptkenntnis der Untersuchungen zum Thema Interoperabilität verschiedener Leistungsklassen (AP8100), konkret 22kW und 3 kW, ist, dass ein Betrieb nur dann sinnvoll (effizient) erfolgen kann, wenn die im System umgesetzte Blindleistung minimiert wird. Durch die für das 22kW-System festgelegte Topologie, den Verzicht auf eine DC/DC-Stufe in der Sekundärseite, sowie die optimierte Spulenauslegung für eine Übertragung von 22kW ergibt sich eine überproportional große Blindleistung im System, wenn die übertragene Leistung reduziert wird (s. Abbildung 5). Dem lässt sich durch eine Umschaltung des sekundärseitigen Gleichrichters von einem Vollbrücken- in einen Halbbrückenmodus entgegenwirken. Dies ist für das geplante Bipol+System ohne zusätzliche Erweiterungen möglich. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Leistung des 22kW-Systems reduziert wird, oder ob die Sekundärseite mit einer anderen Primäreinheit geringerer Leistung zusammenarbeiten soll.



Normaler Betrieb mit 22kW



Betrieb des Systems bei reduzierter Leistung ohne zusätzliche Maßnahmen auf der Sekundärseite



Betrieb des Systems bei reduzierter Leistung mit Umschaltung der Sekundärseite

**Abbildung 36: Gesamte Blindleistung im System bezogen auf die übertragene Wirkleistung**

Diese Erkenntnisse erlauben eine Auslegung eines 3KW Systems, bzw. einer 3KW-Primäreinheit, die auch mit der 22kW Sekundäreinheit betreibbar ist. Dabei wurde versucht, das Spulendesign des 22KW Systems (Primärseite) so wenig wie möglich zu verändern. Die Untersuchungen führten zu zwei möglichen Systemtopologien, wobei bei beiden Topologien ein Umschalten der Fahrzeugseite in einen Halbbrückengleichrichtbetrieb für einen sinnvollen Betrieb zwingend notwendig ist:

- Unveränderte Primärspule (gleiche Windungszahl), jedoch mit „Halbbrückenbetrieb“. Diese Variante erfordert auf der 3KW-Primärseite einen gleichartigen Aufbau wie das 22KW-System, welcher eine aktive Netzgleichrichtung mit PFC, sowie einem anschließenden Tiefsetzsteller erfordert.
- Doppelte Windungszahl auf der Primärseite mit Halbbrückenbetrieb. Diese Kombination aus Spule und Umrichter ermöglicht einen Betrieb nur mit einer aktiven Netzgleichrichtung unter Ausnutzung einer höheren Zwischenkreisspannung nach der PFC-Stufe.

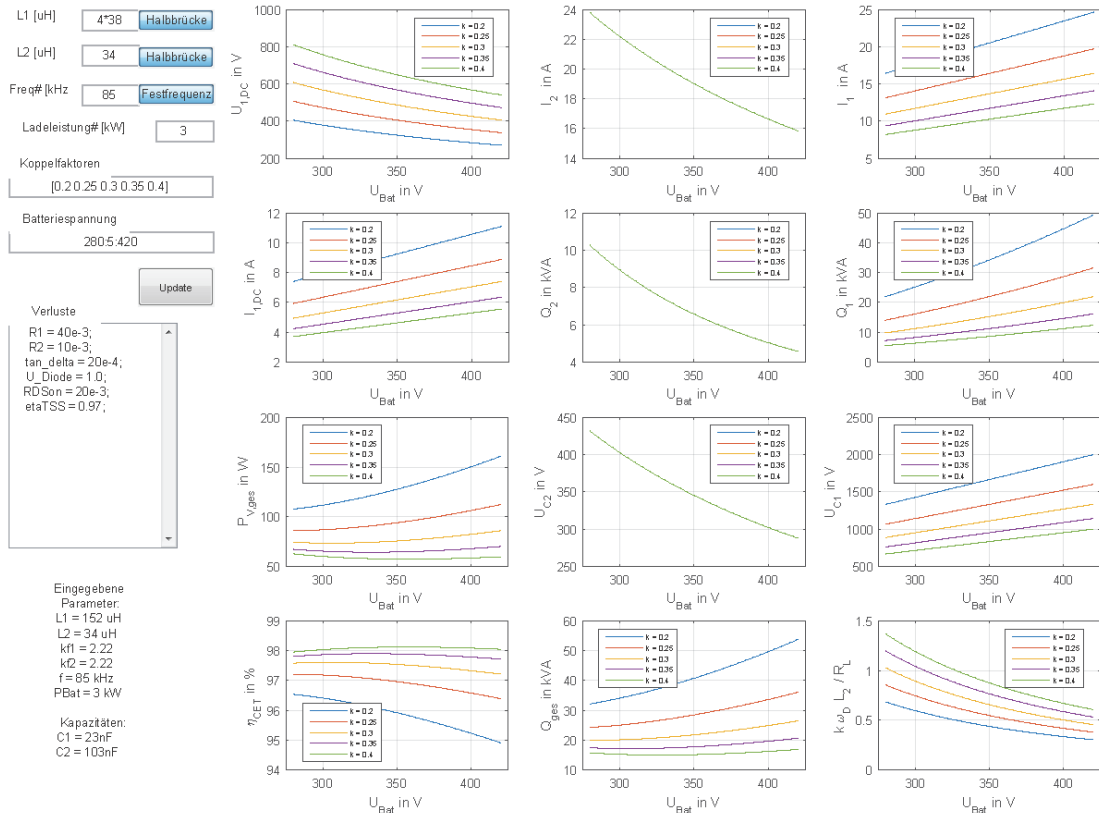


Abbildung 37: Verläufe relevanter Größen unter der Berücksichtigung der auftretenden Varianzen in Koppelfaktor und Batteriespannung für eine Übertragung mit 3kW

AP5500 (1PM IEW) Infrastrukturkomponenten - Aufbau Funktionsmuster

AP7100 (1PM IEW) Fahrzeugintegration und Applikation – Aufbau Funktionsmuster im Fahrzeug

Für den Aufbau eines Funktionsmusters für ein 3kW-System fiel die Wahl der Topologie der Netzanbindung auf Grund des „einfacheren“ Aufbaus auf die zweite in AP8100 vorgeschlagene Variante. D.h. eine Netzanbindung mit PFC-Funktionalität und Ausnutzung des Hochsetzstellerbetriebes. Dies erfordert eine Spulenauslegung, welche stets eine Zwischenkreisspannung von mehr als 325V erfordert. Als PFC-Topologie wurde dabei eine totem-pole Anordnung verwendet. Folgende Abbildung zeigt den schematischen Aufbau des primärseitigen Leistungspfades:

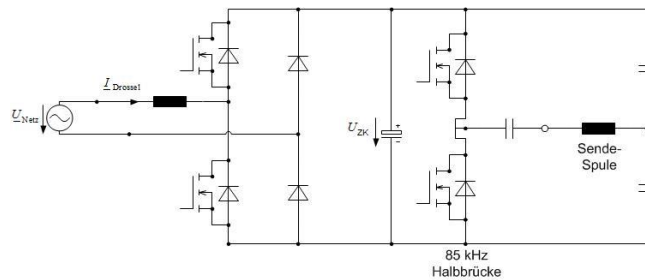
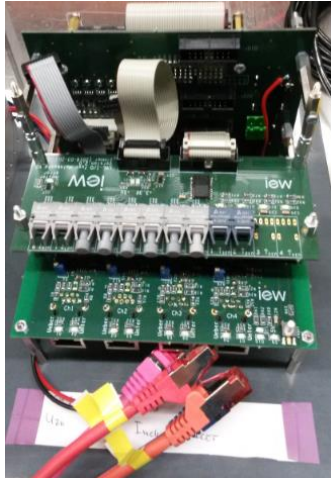


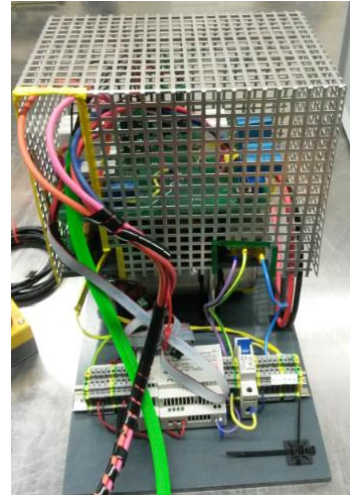
Abbildung 38: Schematischer Aufbau des Leistungspfades des 3KW Systems.



Führungssystem (adaptiertes IEW-Standard-system)



Labortestmuster



Komplette 3KW-Elektronik (mit Netzschütz, ZK, Drossel, Messglieder)

### Abbildung 39: Komponenten des 3KW-Systems

Die Komponenten PFC und Halbbrücke wurden zuerst als Labormuster aufgebaut und einzeln getestet und anschließend auf einer Platine integriert.

Für die Realisierung des 3kW-Funktionsmusters wurde ein separates Spulensystem verwendet, welches eine erhöhte Positioniertoleranz in y-Richtung aufweist. Da das für dieses Funktionsmuster verfügbare Forschungsfahrzeug des IVK eine Batteriespannung von 90V...100V aufweist, wurde das Spulensystem darauf angepasst.

Die Primärspule hat ein zirkulares Design mit einem Effektiven Durchmesser der Wicklung von 40cm. Die Fahrzeugspule besitzt eine Rechteckform mit Außenmaßen von 38cm x 90cm. Die folgende Abbildung zeigt die mit dem in AP2100 erarbeiteten Auslegungstool ermittelten Verläufe.



L1 [uH]  Halbrücke  
 L2 [uH]  Vollbrücke  
 Freq# [kHz]  Festfrequenz  
 Ladeleistung# [kW]   
 Koeffizienten   
 Batteriespannung   
  
 Verluste  
 R1 = 130e-3;  
 R2 = 43e-3;  
 tan\_delta = 20e-5;  
 U\_Diode = 1.05;  
 RDson = 50e-3;  
 etaTSS = 0.95;  
 Eingebene Parameter:  
 L1 = 124 uH  
 L2 = 22 uH  
 k1 = 2.22  
 k2 = 1.11  
 f = 85 kHz  
 PBat = 3 kW  
 Kapazitäten:  
 C1 = 28nF  
 C2 = 159nF

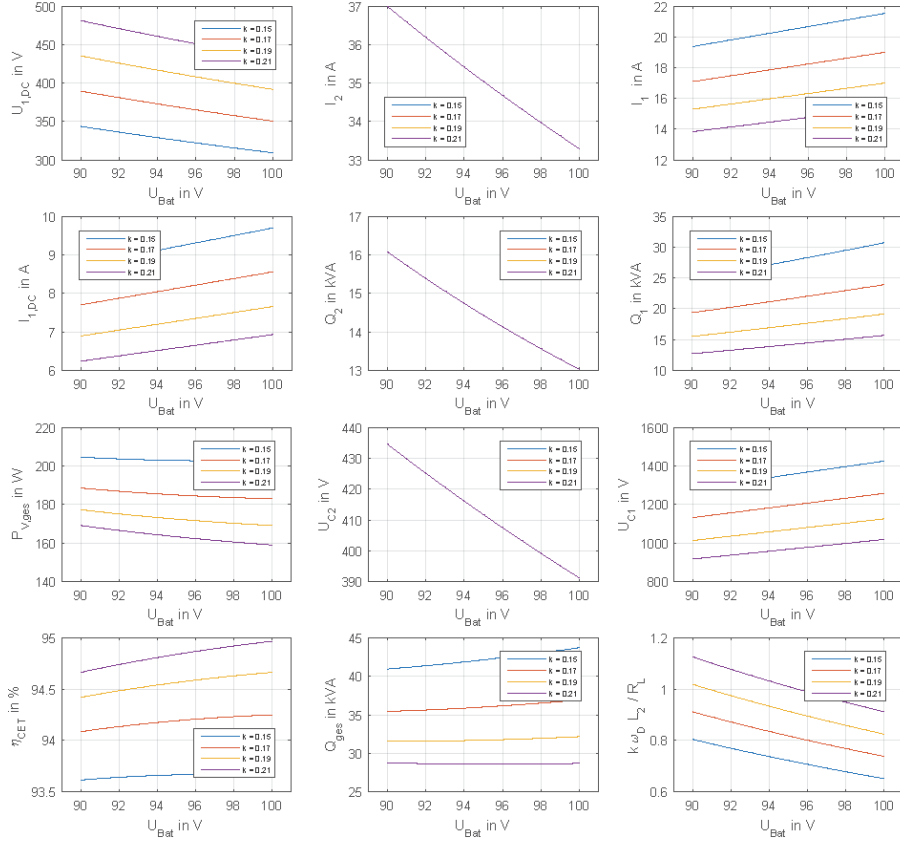


Abbildung 40: Verläufe relevanter Größen unter der Berücksichtigung der auftretenden Varianzen in Koeffizient und Batteriespannung für das im IVK-Versuchsfahrzeug implementierte 3kW-System

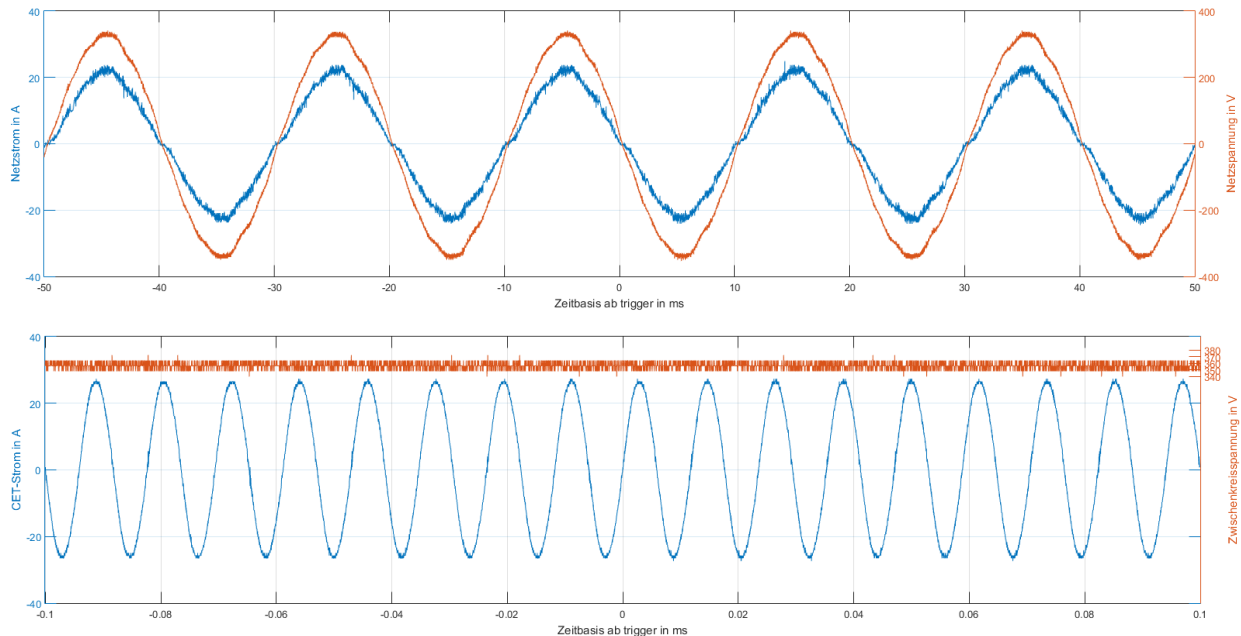


Abbildung 41: Verläufe Netzstrom und Netzspannung des 3kW-Systems

Die Erstinbetriebnahme des Systemes erfolgt im Labor des IEW. Die folgenden Abbildungen zeigen die gemessenen Verläufe von Netzstrom, Netzspannung und Primärstrom:  
Das komplette System wurde in die Forschungsstation des IVK, sowie ein Versuchsfahrzeug vom IVK integriert.



**Abbildung 42: Integration des 3kW-Systems in die IVK-Forschungsstation**

AP3100 (1PM IEW) Fahrzeugkomponenten – Spule

AP3200 (1PM IEW) Fahrzeugkomponenten – Leistungselektronik Fahrzeug

AP5100 (1PM IEW) Infrastrukturkomponenten – Ladespule

AP5200 (1PM IEW) Infrastrukturkomponenten – Leistungselektronik

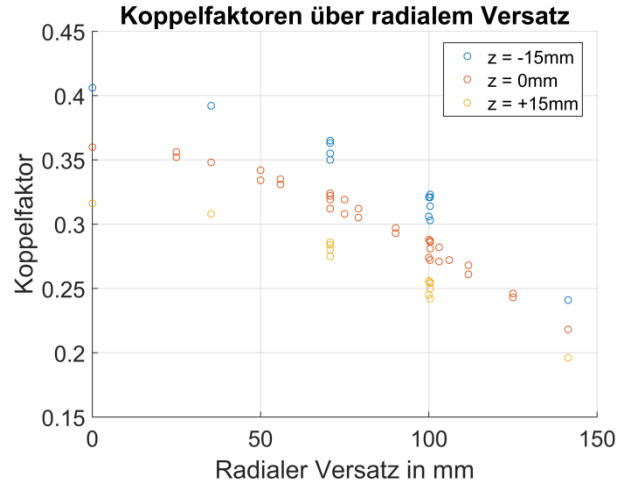
Alle Ergebnisse aus den oben genannten APs sind auch in die Zuarbeiten zu anderen APs mit eingeflossen, in denen das IEW in beratender bzw. unterstützender Form eingeplant war

AP6100 (1PM IEW) Test und Validierung - Aufbau Mock-Up

AP6300 (1PM IEW) Test und Validierung – Messungen am Funktionsmuster inkl. EMV

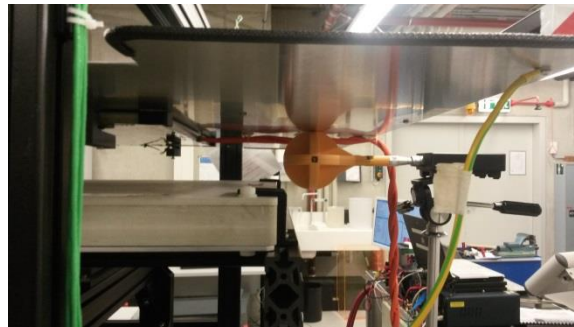
Bei den beiden Arbeitspaketen AP6100 und AP6300, Aufbau Mockup und Messungen am MockUp sowie Fahrzeug, hatte das IEW nur unterstützende Tätigkeiten. Für die erste Inbetriebnahme wurde u.a. Messequipment (Strommesszange, Oszilloskop) zur Verfügung gestellt. Durch die Verzögerungen beim Aufbau der netzseitigen Leistungselektronik musste für die MockUp-Messungen die PFC-Stufe geeignet ersetzt werden. Um die vorgesehenen Messreihen durchführen zu können wurde ein Labornetzteil des IEW erfolgreich in den MockUp-Prüfstand des DLR integriert und für die Dauer der Messungen an das DLR ausgeliehen.

Zur Validierung der Feldsimulationen wurden die Spulen des MockUp-Prüfstandes hinsichtlich Eigeninduktivitäten und Koppelfaktoren vermessen. Abgedeckt wurde dabei ein Bereich in x- und y-Richtung von +-100mm, sowie +-15mm in der Höhe, ausgehend von der Nennposition. Die Varianzen in den Eigeninduktivitäten der Spulen, bedingt durch die unterschiedlichen Positionen, lagen stets unterhalb von 3,5%. Für die Koppelfaktoren ergab sich der erwartete Verlauf, welcher in Abbildung 1 dargestellt ist. Die Ergebnisse dieser Messreihen wurden den anderen Projektpartner, insbesondere dem KIT zur Validierung der Spulensimulation zur Verfügung gestellt.



**Abbildung 43: Verlauf des Kopplfaktors bei unterschiedlichen Positionen**

Eine weitere Messreihe zur Validierung der Spulensimulationen wurde zusammen mit dem DLR am Ende der MockUp-Messungen durchgeführt bei welchen an markanten Stellen im Bereich der Spulen die magnetische Flussdichte gemessen wurde. Dabei wurde das Übertragungssystem bei Nennleistung und verschiedenen Positionen betrieben und, zusätzlich zu den Daten welche der MockUp-Prüfstand aufzeichnet, der primärseitige Spulenstrom, die Frequenz, sowie die Flussdichte gemessen.



**Abbildung 44: Feldmessung mit „HIOKI FT3470-50 magnetic Field HiTester**

Die aufbereiteten Daten dienen dem Projektpartner KIT zur Validierung der Simulationsergebnisse.

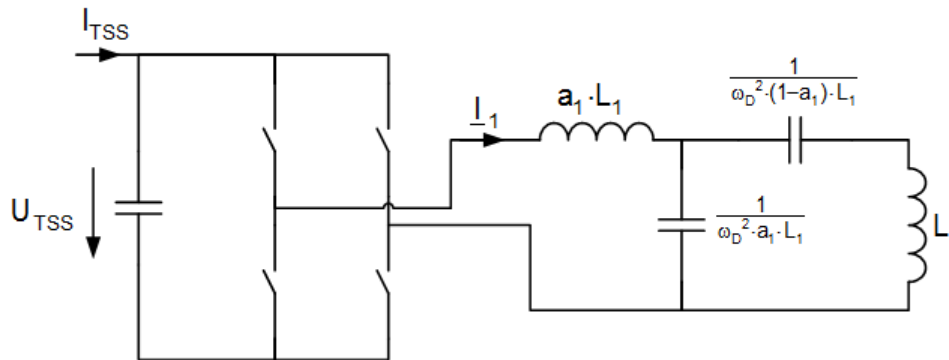
## Darstellung der Ergebnisse der AUFSTOCKUNG für das IEW

### Aufstockung AP2110, AP2120 (2PM IEW)

#### Rahmenbedingungen, Anforderungen und Kompatibilitätsanalyse

Alle Betrachtungen zu den Anforderungen und der Kompatibilitätsanalyse haben sehr starke Parallelen zu den Betrachtungen aus dem Hauptprojekt. Prinzipiell können die Betrachtungen in die zwei wesentliche Teile Spulenauslegung und Kompensationstopologie getrennt werden, da die Schnittstelle zwischen Spulenausprägung und Kompensationen auf die Spulenparameter (Eigeninduktivitäten und Kopplungen) eingegrenzt werden kann.

Die Gyrator-topologie kann als Mischform aus Serien- und Parallelkompensation angesehen werden. Der „Gyrator-koeffizient  $a$ “ entspricht dabei dem Anteil der Parallelkompensation, und deckt dabei auch beide Extreme ( $a=0$  -> reine Serienkompensation; sowie  $a=1$  -> reine Parallelkompensation) ab.



**Abbildung 45: Allgemeine Gyatorschaltung**

Dadurch kann ein in der Strom in den Spulen angepasst werden, wobei der Strom für  $a=0$  den kleinsten Wert aufweist und mit steigendem Wert von  $a$  zunimmt. Der optimale Wert der benötigten Induktivität ist jedoch auch vom Gyrotorkoeffizient abhängig, aus magnetischer Sicht heben sich diese beiden Abhängigkeiten auf, so dass die benötigte Durchflutung ( $N \cdot I$ ) für die Sende und Empfangsspule näherungsweise konstant bleibt. Jedoch erfordern alle Varianten mit anteiliger Parallelkompensation zusätzliche Komponenten: den Parallelkondensator, sowie der Gyrator-induktivität.

Eine anteilige Parallelkompensation ist also prinzipiell möglich, jedoch sind folgende Punkte zu beachten:

- Der Strom in den Spulen ist bei anteiliger Parallelkompensation höher als bei reiner Serienkompensation.
- Eine anteilige Parallelkompensation erfordert zusätzliche Komponenten
- Durch die zusätzlichen Energiespeicher im System können sich mehr systemeigene Resonanzfrequenzen ausbilden. Dies kann zu Problemen, hauptsächlich beim Teillastbetrieb führen (analog zu den Betrachtungen zur Topologie beim Hauptprojekt)

Die im Hauptprojekt realisierte Serienkompensation ist auch mit den alternativen Spulengeometrien möglich, sofern ähnliche Koppelfaktoren erreicht werden. Für die in der Aufstockung betrachteten Varianten „bipolare Spule“ (auch „DD“ genannt) sowie der „Solenoid-Spule“ wurde dies Simulationen, Vorversuche und Testaufbauten überprüft.

Daher wurde als Designziel für die neu auszulegenden Spulen dieselben Induktivitätswerte festgesetzt, wie sie auch im Hauptprojekt realisiert wurden. Dadurch kann der komplette restliche Aufbau (alles außer den Sende- und Empfangsspulen) für die Validierung wieder verwendet werden.

Als einzige Einschränkung bleibt dann der erreichte Koppelfaktor. Aus den Voruntersuchungen und Literaturrecherchen ist damit zu rechnen, dass die mögliche Fehlpositionierung bei den neuen Spulendesigns von denen des zirkularen Designs abweicht. Es wird eine schlechtere Toleranz in x-Richtung (Fahrtrichtung), dafür eine bessere in y-Richtung (Quer zur Fahrtrichtung) erwartet. Dies wurde auch durch Messungen am Aufbau bestätigt.

### Aufstockung AP3210, (1PM IEW) Simulation des elektrischen Betriebsverhaltens

Die Vorgabe, dass lediglich die beiden Spulen ein neues Design aufweisen sollen, der restliche Teil des Hardwareaufbaues (Leistungselektroniken und Kompensationskapazitäten) jedoch unverändert ist, führt dazu, dass die neuen Spulendesign ein elektrisch möglich identisches Verhalten aufweisen müssen. Andernfalls wäre ein Betrieb mit der bestehenden Hardware und dem verwendeten Regelalgorithmus nicht möglich.

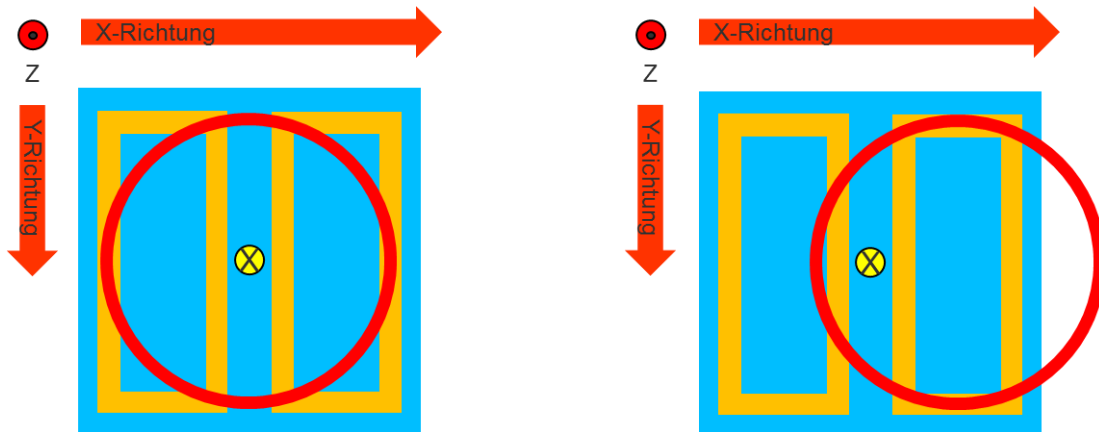
Sind die Spulen nicht auf die gewünschte Betriebsfrequenz und die verbauten Kondensatoren abgestimmt, so ist kein effizienter Betrieb und kein Betrieb mit der geforderten Leistung möglich. Gleiches gilt für die zulässigen Werte des Koppelfaktors des neuen Spulendesign.

Sind beide Voraussetzungen (gleiche Induktivitäten und gleicher Bereich des Koppelfaktors wie das zirkulare Spulendesign) erfüllt, dann zeigen die Simulationen, dass die neuen Spulendesigns ein quasi identisches Verhalten aufweisen wie die originalen Spulendesigns.

### Aufstockung AP3410, (4PM) Direkte Kompatibilitätsuntersuchungen

Die Kompatibilitätsuntersuchungen ergaben zwei grundlegende Aspekte, welche eine direkte Kombination der originalen Bipol+ Sekundärspule (Zirkulares Design) mit dem neu entworfenen Design der Primärspule (bipolares Design) sehr stark beeinträchtigen bzw. ohne zusätzliche Anpassungen unmöglich machen.

Der erste Aspekt ist die erreichbare Kopplung. Die folgende Abbildung verdeutlicht schematisch mögliche Positionen der Sekundärspule. Für eine zentralausgerichtete Position (Spulenzentrenpunkte direkt übereinander), sinkt die Kopplung zwischen Primärspule (gelb) und zirkularer Sekundärspule (rot) auf nahezu null. Nur bei einer Verschiebung der Sekundärspule in X-Richtung kann überhaupt eine nennenswerte Kopplung erreicht werden. Auch bei einer für diese Kombination optimalen Position der Sekundärspule über einem Teil der bipolaren Spule ist mit einer geringeren Kopplung in Vergleich zu einem auch zirkularen Primärspule zu rechnen.



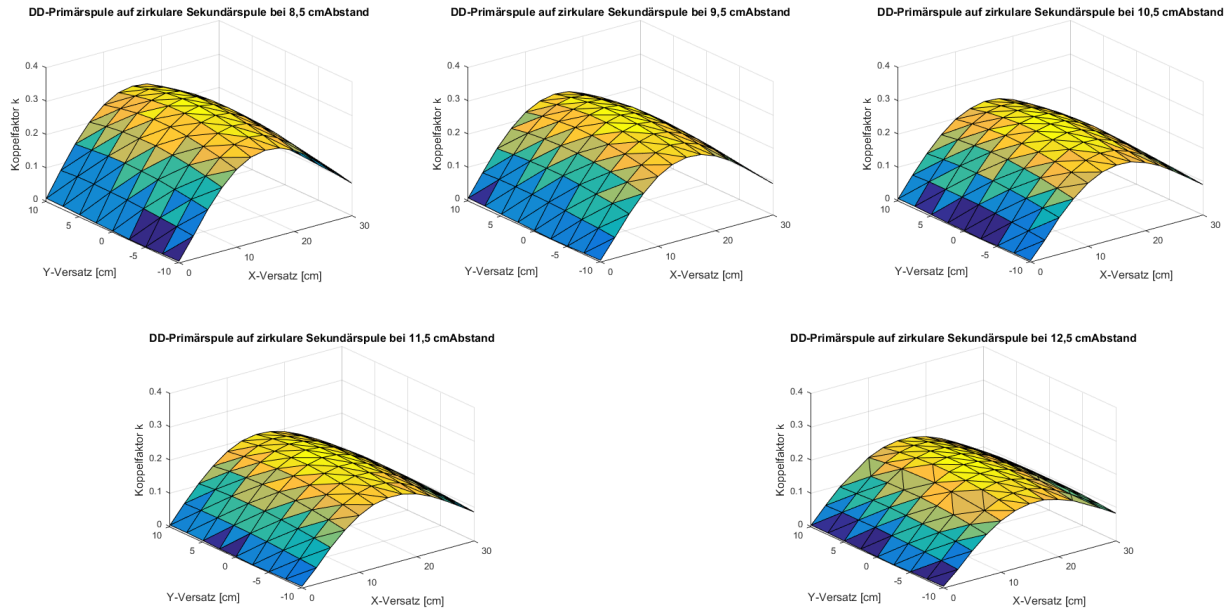
(a) Zentral ausgerichtete Position

(b) Optimale Position

**Abbildung 46: Kombination aus bipolarer und zirkularer Spule**



Dieser Aspekt der geringeren erreichbaren Kopplung wurde auch nach dem Aufbau der Spulen messtechnisch verifiziert. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf der magnetischen Kopplung, ausgehend von der zentral ausgerichteten Position entlang der Fahrtrichtung (X-Richtung), bei einer zusätzlichen Positioniertoleranz in Querrichtung (Y-Richtung), sowie in verschiedenen Abständen.



**Abbildung 47: gemessene Koppelfaktoren zwischen bipolarer und zirkularer Spule**

Erkennbar ist, dass schon bei einem Abstand von nur 12,5cm selbst bei ansonsten optimaler Ausrichtung der erreichbare Koppelfaktor schon auf unter 20% sinkt. Im Vergleich zum beidseitig zirkularen Spulendesign (originaler Bipol+ Aufbau) treten bei den geforderten Abständen und Positionierungstoleranzen Koppelfaktoren zum Teil deutlich unterhalb 20% auf. Dies stellt für die Elektronik des Bipol+ Aufbaus deshalb ein Problem dar, weil die eingesetzte Topologie von Ihrem Verhalten her einen direkten Zusammenhang zwischen Koppelfaktor und primärem Spulenstrom besitzt. Daher würde der primärseitige Spulenstrom, auch bei reduzierter Leistung, einen Wert außerhalb der Spezifikationen aufweisen.

Der zweite Aspekt, welcher gegen eine direkte Kompatibilität spricht, ist ein Einfluss des neuen Spulendesigns der Primärspule auf die Sekundärspule. Im originalen zirkularen Setup bedingt der großflächige Ferritrückschluss der Primärspule eine leichte Erhöhung der sekundärseitigen Eigeninduktivität. Beim neuen Spulendesign ist die Ferritfläche Prinzip bedingt kleiner. Hinzu kommt der oben gezeigt nötig Versatz in X-Richtung, somit ist der für die Sekundärspule sichtbare Ferritrückschluss der Primärseite kleiner als beim originalen Design, was eine leichte Verringerung der Sekundärinduktivität zur Folge hat. Messungen ergaben eine positionsabhängige Sekundärinduktivität im Bereich zwischen 32uH und 34 uH, im Vergleich zu 34uH bis 35uH beim originalen Aufbau.

Der Einfluss auf die sekundärseitige Eigeninduktivität ist relativ gering, wirkt sich jedoch auf die auf die Resonanzfrequenz der Sekundärspule aus, da die Kapazität vorgegeben ist. Diese Auswirkung kann ggf. auf der Primärseite insofern kompensiert werden, als dass die Primärinduktivität der bipolaren Spule die gleiche prozentuale Abweichung zur originalen (zirkularen) Primärinduktivität aufweist. Dadurch wird allerdings die Auslegungsfrequenz und auch die Betriebsfrequenz verändert. Die hätte zur Folge, dass der Regelalgorithmus der Primärseite verändert werden müsste.

### Aufstockung AP4410, (4PM IEW) Spulenaufbau

Die Geometrischen Außenabmessungen der bipolaren Spulen wurden auf 60cm x 60cm festgelegt, um die Vergleichbarkeit zu den zirkularen Spulendesign des Hauptprojektes zu gewährleisten. Für die jeweiligen Eigeninduktivitäten wurden ebenfalls die Werte des zirkularen Spulendesign als Zielgrößen gewählt, da damit die komplette Prüfstandsinfrastruktur des Hauptprojektes genutzt werden kann.

Die konkreten Abmessungen, sowie Windungsanzahlen und Ferrit- und Schirmflächen wurden in sehr enger Zusammenarbeit mit dem KIT bestimmt und optimiert.

Die Sende- und Empfangsspule im bipolaren Design sind von der Windungsanordnung und den Trägermaterialien identisch. Durch einen geringfügigen Unterschied in der Dicke des Ferrites, sowie hauptsächlich durch das Vorhandensein eines ausgeprägten Aluminiumblechen als Fahrzeugunterbodennachbildung auf der Sekundärseite, konnten sie geforderten unterschiedlichen Eigeninduktivitäten von primärseitig 38uH und sekundärseitig 34uH realisiert werden.

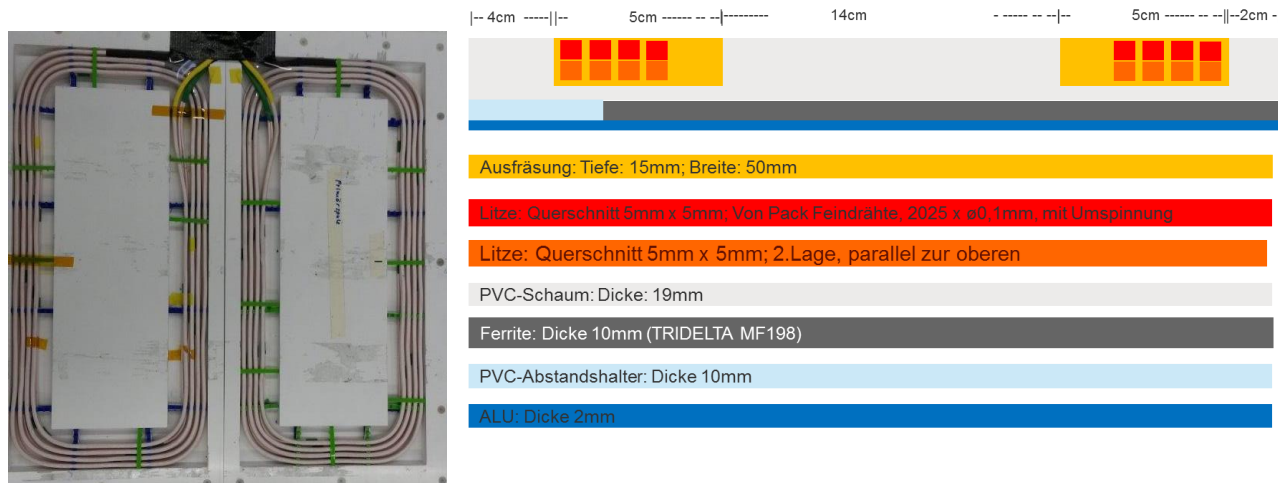


Abbildung 48: Aufbau und Schnittbild (linke Hälfte) der bipolaren Spule

Nach dem Aufbau wurde das Spulensystem , besteht aus jeweils einer bipolaren Spule automatisiert an einem institutseigenen Prüfstand hinsichtlich Eigeninduktivitäten und Koppelfaktoren bei unterschiedlichen Fehlstellungen vermessen und die Ergebnisse dem KIT zur Validierung des Simulationsmodells zur Verfügung gestellt. Wie erwartet weist die bipolare Geometrie in X-Richtung ein schlechteres Verhalten bezüglich des Koppelfaktors auf. In Y-Richtung ist die Verringerung des Koppelfaktors in Abhängig der Fehlpositionierung jedoch deutlich geringer im Vergleich zu einem zirkularen Design.

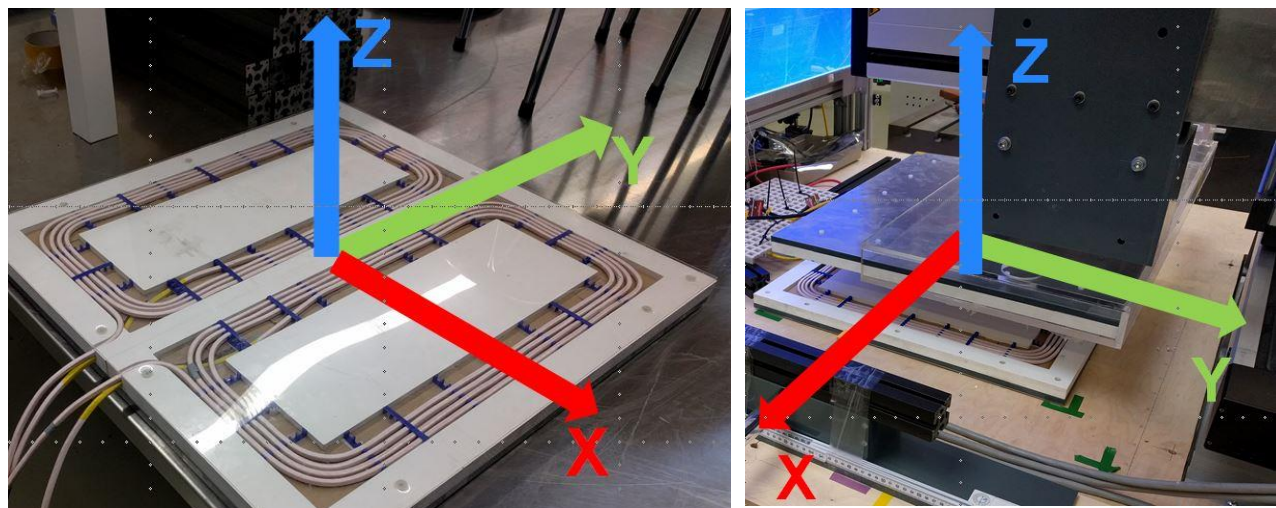
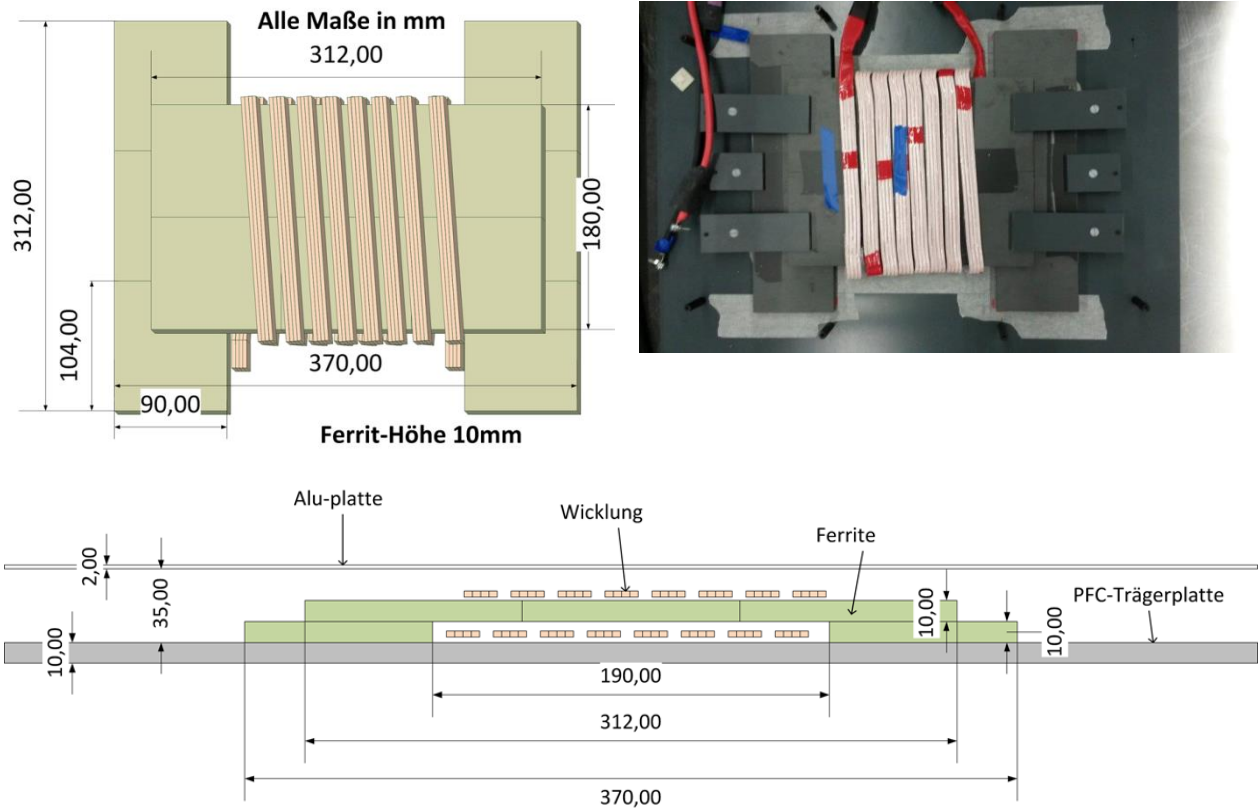


Abbildung 49: Raumrichtungen und automatisierter Koppelfaktormessprüfstand

Für die Auslegung und die Fertigung der Solenoid-spule waren mehr Iterationsschritte nötig. Die Realisierung der nötigen Koppelfaktoren und Eigeninduktivität war nur durch Anbringen von „Ferritflügeln“ möglich. Der finale Aufbau ist in folgender Abbildung zu sehen.



**Abbildung 50: Aufbau und Schnittbild der Solenoid-Spule**

Bei dem Solenoid-Design hat die Aluminiumschirmung einen sehr entscheidenden und starken Einfluss. Daher haben schon geringe Abweichungen des Abstandes der Wicklung zur Schirmung sehr starke Auswirkungen auf die elektrischen Spulenparameter.

Durch die ausgeprägten Ferritflügel zeigt das Spulensystem, bestehend aus bipolarer Primärspule und Solenoid-Sekundärspule, ein prinzipiell sehr ähnliches Verhalten der Koppelfaktoränderung bezüglich der Fehlpositionierung wie das System mit zwei bipolaren Spulen. Die Verläufe wurden automatisiert Vermessen und aufbereitet dem KIT zur Validierung der Simulationen zur Verfügung gestellt.

Des Weiteren wurden in Absprache mit dem DLR an verschiedenen Positionen (Wicklung und Ferrit) Temperatursensoren für die weiteren Messungen am Mockup-Prüfstand in die Spulen mit integriert.

### Aufstockung AP5320, (1PM IEW) Validierung Feldsimulation Mock-up

Für die Messungen am Mockup-Prüfstand konnte der identische Hardwareaufbau aus dem Hauptprojekt verwendet werden. Lediglich Sendespule und Empfangsspule wurden durch die neu aufgebauten Spulen ersetzt.

Dabei wurden die beiden folgenden Kombinationen vermessen:

- „bipolare“ Primärspule mit „bipolarer“ Sekundärspule
- „bipolare“ Primärspule mit „solenoider“ Sekundärspule

Zur Validierung der FEM-Simulationen des KIT wurden für beide Kombinationen jeweils die folgenden Betriebspunkte (Versätze zwischen Primär- und Sekundärspule) eingestellt:

- Nennposition (kein Versatz in X- und Y-Richtung; 135mm Z-Abstand)
- Versatz (X: 0mm; Y: 0mm; Z:+15mm) bezogen auf Nennposition
- Versatz (X: 0mm; Y: 0mm; Z:-15mm) bezogen auf Nennposition
- Versatz (X: +50mm; Y: 0mm; Z:0mm) bezogen auf Nennposition
- Versatz (X: -50mm; Y: 0mm; Z:0mm) bezogen auf Nennposition
- Versatz (X: 0mm; Y: +100mm; Z:0mm) bezogen auf Nennposition
- Versatz (X: 0mm; Y: -100mm; Z:0mm) bezogen auf Nennposition

Alle Positionen wurden jeweils mit 22kW aufgenommener Leistung sowie 11kW aufgenommener Leistung und einer Batteriespannung vom 350V vermessen. Für jede Messung wurden die folgenden Größen messtechnisch erfasst und für den Abgleich mit den Simulationen dem KIT, sowie den anderen Projektpartnern, zur Verfügung gestellt:

- RMS-Wert des Stromes durch die Sekundärspule
- RMS-Wert des Stromes durch die Sekundärspule
- Phasenverschiebung zwischen den beiden Spulenströmen
- Betriebsfrequenz, welche durch die IPT-Hardware eingeregelt wurde
- Magnetische Flussdichte entlang der X-Achse mit
  - 100mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 90mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 80mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 70mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 60mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 50mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 40mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
- Magnetische Flussdichte entlang der Y-Achse mit
  - 100mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 90mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 80mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 70mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 60mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
  - 55mm Abstand vom Zentrum der Sekundärspule
- Koppelfaktor und Eigeninduktivitäten der Spulen für die jeweilige Position

Für einen genauen Vergleich zwischen FEM-Simulationen und Messergebnissen bezüglich Koppelfaktoren und Feldwerten sei auf den Bericht des Projektpartners KIT verwiesen.

Die tatsächlich gemessenen Werte der Ströme weichen nur leicht von den in AP3210 analytisch bestimmten Werten ab, die Abweichungen sind im einstelligen Prozentbereich. Das grundlegende Systemverhalten konnte damit nachgewiesen werden. Die leichten Abweichungen begründen sich durch die in der Realität auftretenden Verlusten, und der implementierten Phasenregelung des Gesamtaufbaus.

Die Feldbelastung im Bereich neben den Spulen ist für beide untersuchten Anordnungen sehr stark richtungsabhängig. Beide weisen in X-Richtung eine deutlich größere Feldbelastung auf, als in Y-Richtung. Für die Bipolar-Solenoid-Anordnung werden die Grenzwerte der ICNIRP2010 (27 $\mu$ T) bei einem Abstand in X-Richtung von 90cm, sowie in Y-Richtung von 80cm erreicht (worst-case aus allen untersuchten Betriebspositionen). Die Grenzwerte der ICNIRP98 (6,25 $\mu$ T) werden in Y-Richtung in einem Meter Abstand gerade so erreicht, in X-Richtung ist ein Abstand größer einem Meter nötig.

Selbiges wurde auch bei der Kombination Bipolar-Bipolar gemessen.



Generell gilt für beide untersuchten Kombinationen, dass die Feldwerte in X-Richtung näherungsweise den doppelten Wert aufweisen wie in Y-Richtung.

## 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Alle Positionen des zahlenmäßigen Nachweises enthalten eine kurze Bemerkung zum Verwendungszweck im Rahmen des Projekts. Es sei daher auf den diesem Abschlussbericht beiliegenden Verwendungsnachweis verwiesen.

## 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle geleisteten Arbeiten waren für den Projekterfolg notwendig und wurden entsprechend den Richtlinien der Universität Stuttgart und dem Bundesministerium für Bildung und Forschung geprüft. Die öffentliche Förderung war notwendig, um mit der neuen Ladetechnologie, der induktiven Schnellladung, zukünftig eine einfachere Nutzung von Elektrofahrzeugen zu ermöglichen und dadurch die Einführung der Elektromobilität im urbanen Individualverkehr zu beschleunigen. Im Projekt konnte eine effiziente induktive Ladung mit 22kW mit einer bauraumoptimierte Fahrzeugelektronik demonstriert werden. Des Weiteren wurde eine Möglichkeit aufgezeigt, eine dazu kompatible und potentiell kostengünstige 3kW Primäreinheit zu realisieren.

Um auf der anderen Seite ein sicheres und effizientes Laden zu gewährleisten, muss der Fahrer das Elektrofahrzeug so parken, dass beide Spulen exakt übereinander liegen. Zur Bewerkstelligung der geforderten Fahrzeug-/ Spulenpositionierung beim induktiven Ladevorgang ist ein adäquates Assistenzsystem unerlässlich. Aufgrund dieser Herausforderungen sowie dem Stand der Technik zum Projektbeginn waren hierzu Grundlagenforschungen im Bereich Magnetfeld/ Magnetismus notwendig. Im Projekt wurde ein neuartiges magnetfeldbasiertes Positionierungssystem konzipiert und entwickelt, das die relevanten Anforderungen abdeckt und für alle Fahrzeuge funktioniert sowie in diese integriert werden kann. Das Positionierungssystem als essentieller Bestandteil des induktiven Ladens bzw. der Elektromobilität erzielt eine hohe Benutzerakzeptanz und fördert die Marktdurchdringung.

## 4. Voraussichtlicher Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

IEW:

Projektergebnisse fließen direkt in eine Promotionsarbeit ein. Eine Vorlesung „Induktives Laden“ wurde am Ende des Wintersemesters 2014/15 erstmalig angeboten. Die weiteren Projektergebnisse werden nach Projektende auch in diese Veranstaltung mit eingebunden werden.

Zwischenergebnisse des Projektes sind teilweise direkt in Themenstellungen für studentische Arbeiten eingeflossen. Im Rahmen des Vorhabens BIPoL<sup>plus</sup> wurden am IEW die folgenden studentischen Arbeiten betreut:

- Normen Lucht und Cornelius Schmid, Simulation, Aufbau und Vermessung von „Solenoid“- und „Double-D“- Spulen
- Christoph Seifert, Leistungselektronik für ein induktives Ladesystem
- Daniel Kugler, Entwurf, Simulation und Inbetriebnahme einer Regelung für eine einphasige Leistungsfaktorkorrektur-Schaltung in totempole Anordnung
- Svenja Heusel, Recherche zum Stand der Technik von Induktiven Ladesystemen mit Vergleich und Bewertung Verfügbarer Prototypen
- Ann-Kathrin Krauss, Aufbau und Inbetriebnahme eines passiven Gleichrichters für induktive Ladesysteme mit Betriebsüberwachung und failsafe-Funktion
- Jannis Noeren, Aktive Leistungsfaktorkorrektur für induktive Ladesysteme

IVK:

Durch die Zusammenarbeit der Projektpartner sowie dem kontinuierlichen Austausch untereinander können die Projektergebnisse und Erkenntnisse des Teilprojekts zur Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit der Industriepartner und dem Standort Deutschland beitragen. Darüber hinaus stehen die Projektergebnisse und Erkenntnisse durch Veröffentlichungen (Dissertation, Fachvorträge, etc.) der



Forschungsgemeinschaft zur Verfügung. Die Veröffentlichungen (s. Literaturverzeichnis) erhöhen die Sichtbarkeit und Reputation der Universität sowie die des Wissenschaftsstandorts Deutschland weltweit. Die im Rahmen dieses Teilprojekts entstandene Erfindung mit dem Titel „Empfangseinheit, Sendeeinheit und Positioniersystem zur Positionierung eines Elektrofahrzeugs, diesbezügliches Elektrofahrzeug“ wurde durch die Patentschrift geschützt [3]. Die Patentschrift wird von der Universität Stuttgart vermarktet. Des Weiteren fließen die Zwischenergebnisse des Projektes teilweise direkt in Themenstellungen für studentische Arbeiten ein. Im Rahmen des Vorhabens BIPoL<sup>plus</sup> wurden am IVK die folgenden studentischen Arbeiten betreut:

- Valentin Hauser, Entwicklung einer Software zur Ansteuerung einer Leistungselektronik
- Carsten Binz, Entwicklung und Implementierung eines Algorithmus zur Positionsschätzung
- Christoph Seifert, Entwicklung eines Permutationsfilters zur optimierten Ortung der Ladespule

#### **5. Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

»Gemeinschaftlich-e-Mobilität: Fahrzeuge, Daten und Infrastruktur (GeMo)« am Fraunhofer ISE  
Prototypischer Aufbau einer 22kW Induktiv-Ladeeinheit (Wesentlicher Unterschied: Topologie und Größe der Sekundäreinheit)

#### **6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr.11**

Die im Rahmen des Projekts veröffentlichten Tagungs- und Konferenzbeiträge sind in dem Literaturverzeichnis aufgelistet. Die Zuordnungen zwischen den beiden Instituten IEW/ IVK sind im Folgenden aufgeführt. Neben den wissenschaftlichen Veröffentlichungen kam es im Rahmen des Projektes zu einer hohen Presseresonanz.

IEW:

Erfolgt: Konferenzbeitrag bei der E|TEV2014 [7]

Geplant ist eine Veröffentlichung der Ergebnisse zur Kompatibilität unterschiedlicher Leistungsklassen in Form einer Dissertation von Herrn Zimmer (voraussichtlich im Laufe des Jahres 2017, voraussichtlicher Titel: „Untersuchung der Interoperabilität unterschiedlicher Leistungsklassen von induktiven Ladesystemen von Elektrofahrzeugen“)

IVK:

Siehe Literaturverzeichnis [1]-[6].

Geplant ist eine Veröffentlichung der Positionierungstechnik in Form einer Dissertation von Herr Martinovic (voraussichtlich im Laufe des Jahres 2017, voraussichtlicher Titel: „Präzise Fahrzeugpositionierung durch Entzerrung der gepulsten magnetischen Flussdichteverteilung einer Ladespule“)

## **Literaturverzeichnis**

- [1] D. Martinovic, M. Grimm and H.-C. Reuss, "Electric Vehicle Positioning Concept for Inductive Charging Purposes Using Magnetic Fields," *IEEE Power & Energy Student Summit 2014*, pp. 11-16, 2014.
- [2] D. Martinovic, M. Grimm and H.-C. Reuss, "Electric Vehicle Positioning for Inductive Charging Purposes Using Magnetic Field Distortion Elimination in High-Permeability Environments," *IEEE Transactions on Magnetics*, pp. 1-4, 2014.
- [3] D. Martinovic und M. Grimm, „Empfangseinheit, Sendeeinheit und Positioniersystem zur Positionierung eines Elektrofahrzeugs, diesbezügliches Elektrofahrzeug“. Deutschland Patent DE 10 2015 004 752 A1, Oktober 2016.
- [4] D. Martinovic, C. Binz und H.-C. Reuss, „Magnetic Field based Localization of the Charging Coil using Trilateration,“ *Autoreg 2015*, pp. 129-140, 2015.

- [5] D. Martinovic und A. Mayer-Grenu, „Elektroautos auf den Punkt gebracht,“ *Universität Stuttgart*, Nr. 84, 2015.
- [6] T. Müllerleile, D. Martinovic, D. Joenssen, M. Orner, V. Nissen und H.-C. Reuss, „Fully Charged: Process Acceptance of Different EV Charging Processes,“ *SSRN Scholarly Paper*, 2016.
- [7] M. Zimmer, J. Heinrich und P. Nejila, „Design of a 3kW Primary Power Supply Unit for Inductive Charging Systems Optimized for the Compatibility to Receiving Units with 20kW Rated Power,“ *3rd International Energy Transfer for Electric Vehicles Conference*, 2014.

# Berichtsblatt

<b>1. ISBN oder ISSN</b>	<b>2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)</b> Schlussbericht
<b>3. Titel</b> Berührungsloses, induktives und positionstolerantes Laden	
<b>4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]</b> Dipl.-Ing. Dean Martinovic Dipl.-Ing. Marco Zimmer	<b>5. Abschlussdatum des Vorhabens</b> 31.12.2016
	<b>6. Veröffentlichungsdatum</b>
	<b>7. Form der Publikation</b> Schlussbericht
<b>8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)</b> Universität Stuttgart - Fakultät 7 Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik (Maschinenbau) - Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen	<b>9. Ber.-Nr. Durchführende Institution</b>
	<b>10. Förderkennzeichen</b> 16N12344
	<b>11. Seitenzahl</b> 40
<b>12. Fördernde Institution (Name, Adresse)</b> BMBF	<b>13. Literaturangaben</b> 7
	<b>14. Tabellen</b>
	<b>15. Abbildungen</b> 50
<b>16. Zusätzliche Angaben</b>	
<b>17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)</b>	
<b>18. Kurzfassung</b> Die Gestaltung der Ladeinfrastruktur ist ein Schlüsselfaktor für den wirtschaftlichen Durchbruch der Elektromobilität und ermöglicht durch die Gesamtheit der technologieübergreifenden Innovationen eine signifikante Verbesserung der Kundenakzeptanz. Im Projekt BIPoLplus wurde ein induktives Ladesystem für batterieelektrisch angetriebene Fahrzeuge mit einer nominalen Übertragungsleistung von bis zu 22 kW konzipiert und entwickelt. Die Einzelkomponenten wurden so ausgelegt, dass sie den hohen Anforderungen für Gewicht, Sicherheit und Wirkungsgrad genügen. Hinsichtlich der Sicherheit wurden die Spulen so konzipiert, dass die magnetischen Streufelder den magnetischen Grenzwert nach ICNIRP 1998 nicht überschreiten. Es wurde ein Wirkungsgrad von über 90% erreicht. Damit das Induktivladen sicher und effizient ablaufen kann, hat das IVK ein Assistenzsystem konzipiert und entwickelt, das eine präzise Positionierung von Elektrofahrzeugen ermöglicht. Das Positionierungssystem nutzt zur Ortung der Ladespule ein niederfrequentes magnetisches Pulssignal, wodurch störende, im Fahrzeugunterboden induzierte Wirbelströme vermieden werden. Es erreicht eine Positionierungsgenauigkeit von wenigen Millimetern und weist aktuell einen Positionierungsradius von 3,5m auf. Dadurch können auch längere Fahrzeuge adäquat positioniert werden. Das IEW hat sich hauptsächlich mit der analytischen Modellierung der Energieübertragungsstrecke beschäftigt. Daraus abgeleitet wurde ein Ansatz, welcher mit minimalem Eingriff in die Sekundärseite des 22 kW Systems eine Effizienzsteigerung im Teillastbetrieb ermöglicht, sowie zusätzlich eine dezidierte 3 kW Primäreinheit erlaubt, welche in Verbindung mit der 22 kW Fahrzeugeinheit einen Wirkungsgrad über 90% aufweisen kann. Im Rahmen der Aufstockung des Projektes wurden alternative Spulengeometrien für das 22 kW Ladesystem aufgebaut und vermessen.	
<b>19. Schlagwörter</b> Induktivladen, Fahrzeugpositionierung, Elektrofahrzeug	
<b>20. Verlag</b>	<b>21. Preis</b>

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 510100-5

## Document control sheet

<b>1. ISBN or ISSN</b>	<b>2. type of document (e.g. report, publication)</b> Veröffentlichung (Publikation)	
<b>3. title</b> Contactless, Inductive and Position Tolerant Charging		
<b>4. author(s) (family name, first name(s))</b> Dipl.-Ing. Dean Martinovic Dipl.-Ing. Marco Zimmer	<b>5. end of project</b> 31.12.2016	
	<b>6. publication date</b>	
	<b>7. form of publication</b> Document Control Sheet	
<b>8. performing organization(s) name, address</b> Universität Stuttgart - Fakultät 7 Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik (Maschinenbau) - Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen	<b>9. originators report no.</b>	
	<b>10. reference no.</b> 16N12344	
	<b>11. no. of pages</b> 40	
<b>12. sponsoring agency (name, address)</b> BMBF	<b>13. no. of references</b> 7	
	<b>14. no. of tables</b>	
	<b>15. no. of figures</b> 50	
<b>16. supplementary notes</b>		
<b>17. presented at (title, place, date)</b>		
<b>18. abstract</b> <p>The design of the charging infrastructure is a key factor for the economic breakthrough of eMobility and enables by intertechnology solutions significant improvements of customer acceptance. In the project BIPoLplus an inductive charging system for battery electric powered vehicles with a nominal transfer power of 22kW has been designed and developed. The particular components have been configured in order to meet the requirements regarding weight, safety and efficiency. In context of safety the coils have been designed in a way to meet the magnetic limit values according to ICNIRP 1998. The power transfer efficiency is above 90%.</p> <p>For safe and efficient inductive charging at IVK a new assistant system has been designed and developed, which enables the accurate and precise positioning of electric vehicles. In order to locate the coil the positioning system uses a low frequency magnetic pulse signal. In this way there are no disturbing eddy currents induced in the metallic undersurface of the vehicle. The system achieves a positioning radius up to 3,5m. Thus, larger vehicles can be positioned adequately too.</p> <p>Main topic at the IEW was the analytical modeling of the inductive energy transfer system. Based on that, an approach with only small adjustments of the secondary side of the 22kW System was developed. As a result of that the efficiency at partial load operation increases, and a dedicated 3kW primary unit in combination with the 22kW secondary unit is possible with a systems efficiency of more than 90%. Another topic was the investigation of alternative coil designs for the 22kW system.</p>		
<b>19. keywords</b> Inductive charging, vehicle alignment, electric vehicle		
<b>20. publisher</b>	<b>21. price</b>	

Nicht änderbare Endfassung mit der Kennung 510097-4