

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	2
1.1	Ausgangslage und Konstellation	2
1.2	Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.3	Bekannte Verfahren und Schutzrechte	3
2	Technische Entwicklung und Ablauf im Detail	4
2.1	Spulengeometrie	4
2.1.1	<i>Theoretische Betrachtungen</i>	4
2.1.2	<i>Praktische Umsetzung</i>	7
2.2	Schaltungstopologie	13
2.2.1	<i>Topologie Typ 1 - Magnetische Linse</i>	16
2.2.2	<i>Topologie Typ 2 - Kapazitiver Spannungsteiler</i>	20
2.3	Gegenüberstellung der Wirkungsgrade gemessen am Referenzsystem	23
2.4	Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen Arbeitsfrequenz	25
3	Kommunikation	25
3.1	Kommunikation normen-ähnlich	25
3.2	Kommunikation in minimalster Ausgestaltung	29
3.2.1	<i>Sendeseitig</i>	29
3.2.2	<i>Empfangsseitig</i>	30
4	Fahrzeug-Integration der Pickup	34
5	Gefahrenbewertung bzw. Aktivitäten zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs	36
6	Anhang	39
6.1	Verzeichnis der Abbildungen:	39
6.2	Verzeichnis der Tabellen:	40
6.3	Literaturverzeichnis	40

1 Aufgabenstellung

1.1 Ausgangslage und Konstellation

In dem ebenfalls vom BMU geförderten Vorläufer-Projekt „W-Charge“ wurden grundlegende Überlegungen und erste praktische Aufbauten durchgeführt, die zu einem Basiswissen und Verständnis der Gesamthematik des induktiven Ladens eines PKW parallel zur Arbeit im Normungsgremium AK 353.0.1 des DKE führten.

Auch andere Firmen hatten, gefördert und auch nicht gefördert, ähnliche Prototypen und Erfahrungen im Vorfeld gemacht.

Die Hauptaufgabenstellung für das Projekt InterOp war, eine allgemeingültige Definition und Beschreibung zu finden, die allen Beteiligten ermöglicht, unterschiedliche eigenständigen Lösungen aufzubauen und über praktische Versuche und idealerweise auch längeren Betrieb ihre interoperable Funktionalität zu beweisen. Aus energiepolitischer Sicht sowie aus dem Vergleich zum konduktiven Laden ist ein wichtiges Augenmerk auf die Effizienz der gerichtet worden. Der andere Aspekt im Vergleich zum konduktiven Laden ist die Handhabung. Sie soll einfach, robust und sicher sein.

Um dies zu ermöglichen, mußten vor allem und zunächst die beteiligten Projektpartner, die als Technologielieferanten anzusehen sind, eng zusammenarbeiten. Dies sind in alphabetischer Reihenfolge:

EAI	Fa EAI Elektro- und Automatisierungstechnik GmbH, Ilsenburg
IFAK	Institut ifak e.V. Magdeburg, Magdeburg
IPT	Fa. IPT Technology GmbH, Efringen-Kirchen
SAG	Fa. SIEMENS AG, München
SEW	Fa. SEW EURODRIVE GmbH & Co KG, Bruchsal
VAHLE	Fa. Paul VAHLE GmbH & Co. KG

Von diesen sind außer der ersten genannten alle anderen auch Mitglied im DKE Arbeitskreis 353.0.1, in dem mit weiteren Akteuren die Normung des induktiven Ladens betrieben werden soll.

Die weiteren im Projekte beteiligten Firmen sind zum einen Fahrzeugbauer bzw. -konvertierer wie:

GEC	Fa. German E-Cars GmbH, Grebenstein
StSc	Fa. STREETSCOOTER GmbH, Aachen

bzw. Fahrzeugbetreiber im Sinne eines Flottenbetriebs wie:

DB	Fa. DB FuhrparkService GmbH, Frankfurt a.M.
EON	Fa. E.ON New Build & Technology GmbH, Gelsenkirchen

Da das spätere Fahrzeug, in das die Ladeplatte von VAHLE eingebaut wurde, von GEC umgebaut und an DB übergeben wurde, waren dies im Projekt für VAHLE die wesentlichen Ansprechpartner

außerhalb des Kreises der Technologielieferanten. Das Förderkennzeichen des BMU für Teilvorhaben VAHLE innerhalb des Gesamtvorhabens InterOp lautet 16 EM 1067.

1.2 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die ursprüngliche Planung sah eine dreistufige Vorgehensweise vor:

- a) Definition und technische Verifikation der interoperablen Konfiguration,
- b) Präzisierung der Ausführung und Bau mehrerer Systeme sowohl auf der Infrastrukturseite als auch auf der Fahrzeugseite zum Flottenbetrieb in Berlin,
- c) Test der Robustheit im überwachten Flottenbetrieb.

Gegenüber der ursprünglichen Planung war der erste Schritt a) deutlich umfangreicher als geplant. Er teilt sich auf in folgende Einzelschritte:

- a) Ermittlung der möglichen optimalen Spulengeometrien unter Berücksichtigung der denkbaren Fahrzeugkonfigurationen sowie der verschiedenen Gestaltungsinteressen der Einzelteilnehmer
- b) Ermittlung der dazu passenden möglichen Schaltungstopologie
- c) Festlegung einer Mindestausführung an Signalgabe unter Berücksichtigung sicherheitsrelevanter Betrachtungen
- d) Gefahrenidentifikation und Risikobewertung
- e) Durchführung von Kreuztest aller vorhandenen Realisationen zum messtechnischen Nachweis der Interoperabilität sowie zur Ermittlung von Effizienzwerten in verschiedenen Konfigurationen.

In verschiedenen Arbeitsgruppen wurde diese Themen firmenübergreifend behandelt und auf eine gemeinsame Linie gebracht.

1.3 Bekannte Verfahren und Schutzrechte

Die im Vorfeld und auch während des Projektes immer wieder auftauchende Befürchtung, das eine Realisation eines induktiven Systems zur Ladung von Fahrzeugbatterien nicht ohne Verletzung von Patenten anderer, insbesondere von großen Patentpool-Inhabern wie Qualcomm oder WiTricity, möglich ist, hat sich nach bisheriger Kenntnis nicht bestätigt. Eine 100% Gewissheit konnte aber nicht erlangt werden, da der Umfang für eine all umfassende Analyse zu groß ist.

Umgekehrt ist das erarbeitete Ergebnis umsetzbar, ohne das neue Patente im Rahmen des Projektes beansprucht wurden.

2 Technische Entwicklung und Ablauf im Detail

2.1 Spulengeometrie

2.1.1 Theoretische Betrachtungen

Eine sehr wesentliche Komponente für die Interoperabilität ist das primär- und sekundärseitige magnetische Spulendesign, da dies die offensichtliche Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Bodenstation darstellt. Zu Beginn des Projektes wurden daher Untersuchungen zum Vergleich unterschiedlicher Spulengeometrien und deren Prüfung auf Interoperabilität durchgeführt.

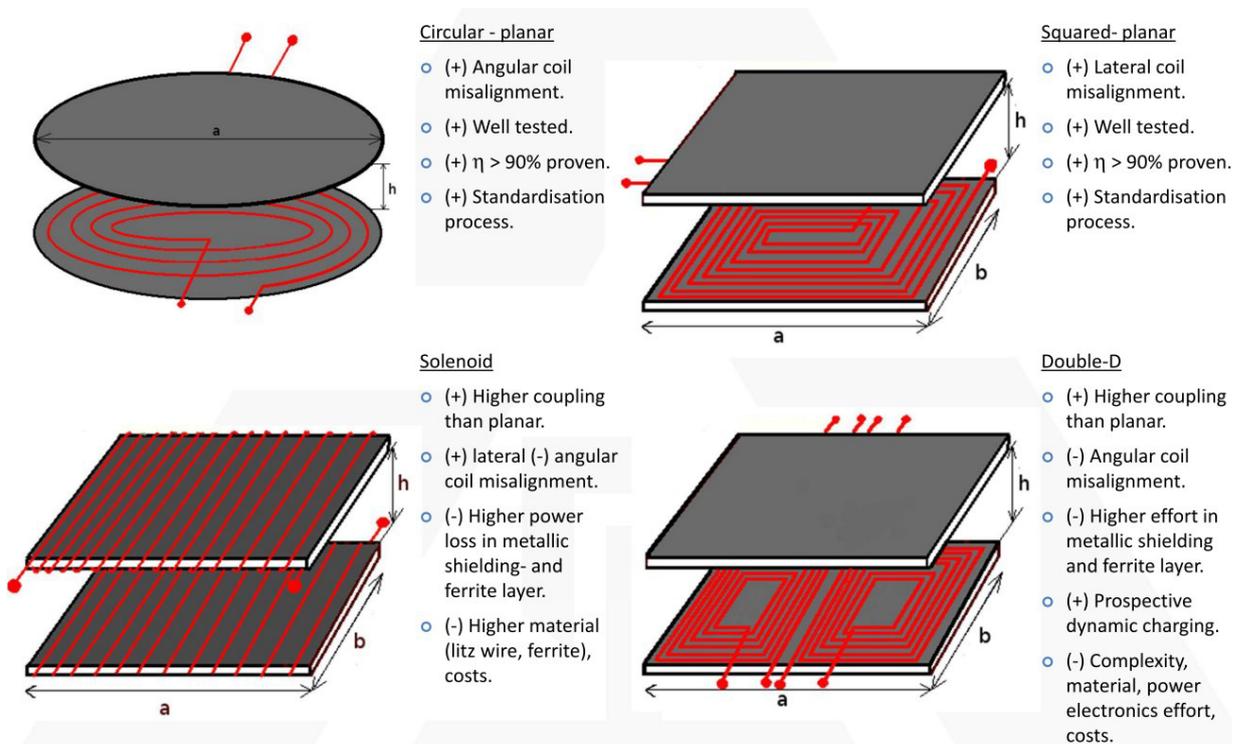


Abbildung 1: unterschiedliche Spulengeometrien

Die verschiedenen Spulengeometrien beeinflussen Aspekte wie z.B. magnetische Feldstärke, Ort des magnetischen Feldes, Flexibilität beim Positionieren des Autos, notwendige Sicherheitsvorkehrungen, technische Realisierung der Kommunikation u.v.m. Der Vorzug einer Geometrie gegenüber den anderen Vorschlägen ist also nicht nur aus technischen Gesichtspunkten der Energieübertragung zu begründen. Für eine interoperable Energieübertragung ist es auch nicht nötig, sich auf genau eine gemeinsame Geometrie zu einigen.

Nach theoretischen und experimentellen Untersuchungen hat man eine Mindestanforderung an die Primärseite seitens der Technologielieferanten definiert.

Diese liefert allgemeine Aussagen zu den Außenabmaßen und einige grundsätzliche Vorgaben zum inneren Aufbau der Primärseite. Bei der Sekundärseite ist ein noch höheres Maß an Freiheit belassen worden. Die Zusammenstellung dieser Regeln sollte ausreichend sein, um ein interoperables Laden noch zu ermöglichen und liefert auch die notwendigen Informationen für sekundäre Technologien wie z.B. Sicherheitseinrichtungen und Kommunikationseinrichtungen.

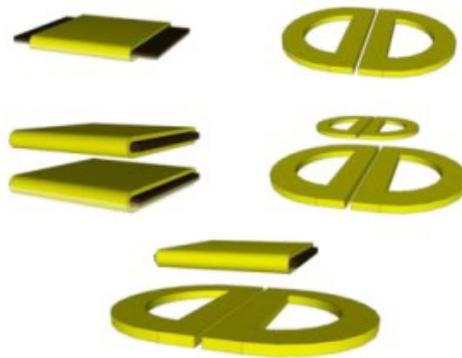
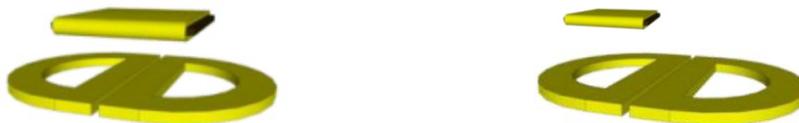


Abbildung 2: Verschiedene Spulengeometrien und -größen

Genauso besteht ein Zusammenhang zu der Grundfrage, ob eine große und einfache oder eine kleine und wirtschaftliche Variante als Bauweise für das Pickup gewählt werden soll (Abbildung 3).



Vorteile:

- Einfach
- Robust
- Geringes maximales Magnetfeld

Vorteile:

- Weniger Bauvolumen
- Interessanter für Automobilindustrie

Abbildung 3: Darstellung zur Diskussion zur Wahl der Baugröße des Pickups (1).

Diese Frage ist aber gekoppelt mit der Wahl der Resonanztopologie. Welche Baugrößen und Kombinationen realisierbar sind, hängt also sehr von der gewählten elektrischen Verschaltung zur Resonanz ab.

Diese Ausarbeitung und Festlegung wurde zusammen mit einer Beschreibung des Spulendesigns der Primärspule, welches bereits Ende 2013 im InterOp-Kreis festgelegt worden war, schriftlich über den DKE in die internationale Normung (IEC 61508) eingebracht.

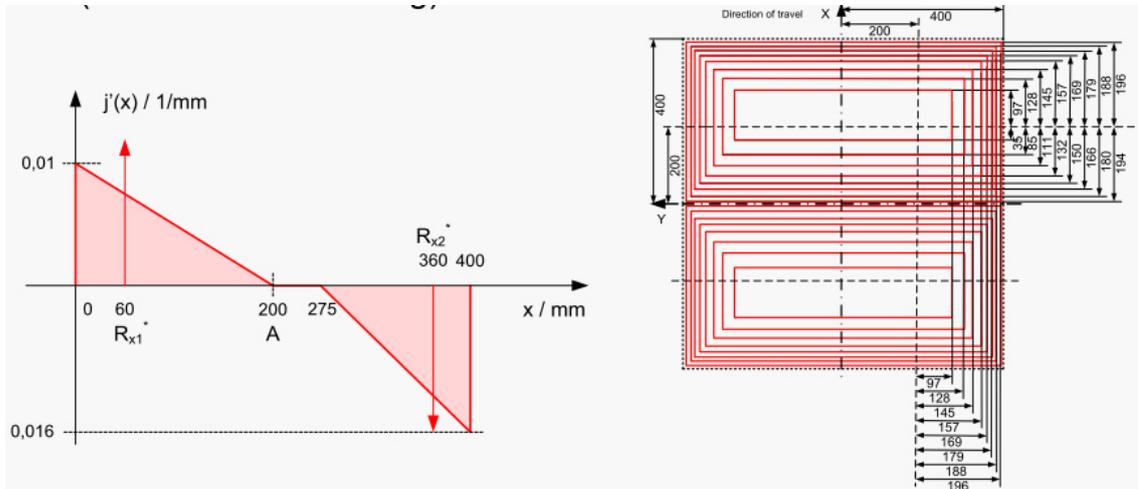


Abbildung 4: Technische Beschreibung eines primären Spulensystems für eine Primärseite als Normungsvorschlag [3].

In Abbildung 4 und Abbildung 5 ist ein Ausschnitt hieraus zu sehen, eine Beschreibung aus dem Projekt InterOp für den Bau einer Primärseite.

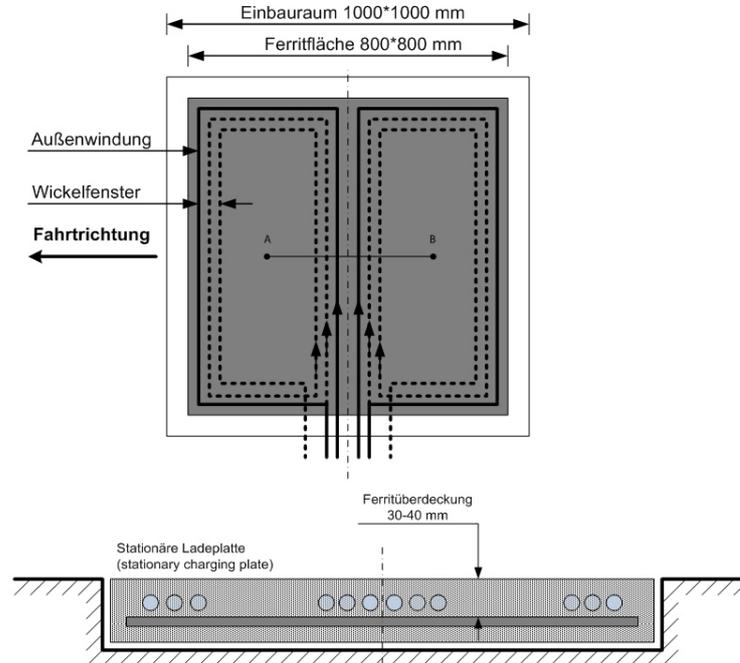


Abbildung 5: Technische Beschreibung eines Spulensystems für eine Primärseite [2].

Diese detaillierten Definitionen zum Magnetkreis und zur Schaltungstopologie sind notwendig, damit im interoperablen Betrieb gewährleistet werden kann, dass die erforderliche Leistung innerhalb eines zulässigen Toleranzbandes übertragen wird unter Berücksichtigung zulässiger äußerer Grenzwerte. Auf der anderen Seite bleibt eine große bauliche Freiheit vor allem auf der Sekundärseite erhalten.

Um dies zu überprüfen, wurde zwischen den fünf Lieferanten für die Energieübertragungstechnik (SEW, VAHLE, IPT, IFAK, EAI) ein erster Kreuztest im November 2014 durchgeführt. Dort zeigten sich noch Unterschiede beim Ladeverhalten, wenn Sekundärteile („Pickup“) eines Herstellers durch Primärteile („Primärplatten“) eines anderen Herstellers mit Energie versorgt wurden. Es war eine gewünschte Zielgröße für diesen Test, bei Nennbedingungen des jeweiligen Pickup so elektrisch zu speisen, dass es eine am Pickup angeschlossene Last mit 3.000 W Leistung versorgt wird. Diese wurde nicht in allen Punkten zu hundert Prozent erreicht, eine weitere Feinjustierung der Parameterdefinitionen wurde notwendig.

Entsprechende Anpassungen wurden an den Hardwareaufbauten vorgenommen. Es erwies sich als vorteilhaft, die unterschiedlichen Realisierungen durch eine Vergleichsmethode basierend auf Simulationen des magnetischen Flusses zu abstrahieren. Hierbei wurde der Betrag des magnetischen Flusses entlang einer Senkrechten über der Mitte der Primärseite gemessen. Im Folgenden ist ein Graph der simulierten magnetischen Flussdichte entlang einer solchen Senkrechten zu sehen:

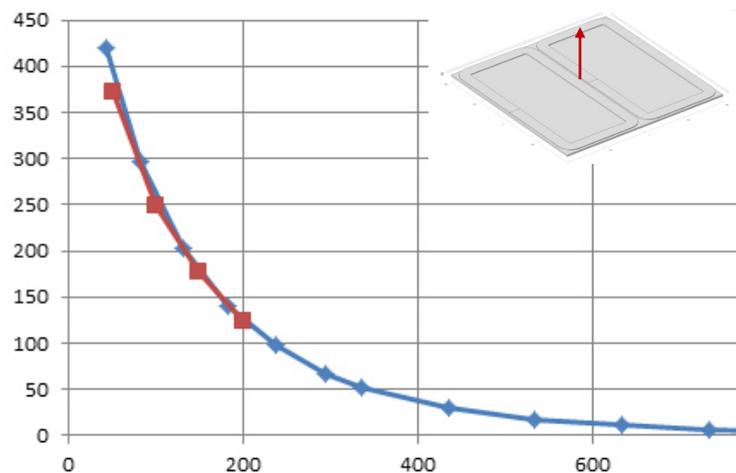


Abbildung 6: *Simulierte und gemessene Flussdichte zweier Spulensysteme für Primärseiten.*
Abszisse: Strecke entlang der Senkrechten in mm.

Ein dazu gemachter zweiter Kreuztest der Ausführungen verschiedener Technologielieferanten im Dezember 2014 zeigte, dass unter Nennbedingungen die vom Pickup an die Last abgegebene Leistung mit Abweichungen kleiner 10% stets erreicht wird. Dieser Erfolg ermöglichte, wesentliche Entscheidungen im Arbeitskreis Magnetik einzufrieren. Somit konnten andere Arbeitskreise wie z.B. die Kommunikation oder der der Sicherheitsbetrachtung auch mit konkretem Wissen über die elektrischen und magnetischen Eigenschaften der Energieübertragung in InterOp weiterarbeiten.

2.1.2 Praktische Umsetzung

In der Praxis wird die Primärspule in einem Gehäuse eingebaut, um Witterung, Schmutz und mechanischer Belastung standzuhalten. Die Abmessung ist auf 800 mm x 800 mm festgelegt.

Es wurde zunächst statisch untersucht, ob die GFK Haube einer Beanspruchung nach der Prüfklasse (DIN EN124) standhalten kann. Der Gesamtaufbau wird mit einem Stempel von 400 mm x 400 mm und einer Prüflast von 125 kN beansprucht.

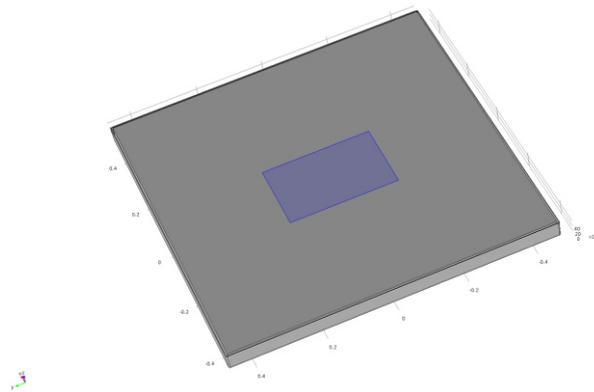


Abbildung 7: Simulationsmodell mit Andeutung der Prüflast

Die maximale Durchbiegung liegt bei 4,5mm in der Mitte. Eine derart große Verformung der Anordnung ist unzulässig, sie würde die Zerstörung bzw. Deformation der darunterliegenden Schichten hervorrufen.

Um die Befahrbarkeit eines Kraftfahrzeugs über die 800 mm x 800 mm große Primärplatte zu gewährleisten, müssen zusätzliche Verstrebungen eingebaut werden. Die dazu erforderlichen Stabilisierungsmaßnahmen dürfen nicht auf dem Ferrit liegen. Auf Grund der Materialeigenschaften würde es zerstört. Daher wurden Löcher in dem Ferritteppich eingebracht, um dort Verstrebungen durchzuführen, in der Größenordnung von einigen cm².

Zunächst wurden verschiedene Anordnungen rein quantitativ untersucht. Dabei fungierte eine Anordnung A, welches keine Unterbrechung im Ferrit aufwies, als Referenz. In den Anordnungen B und C wurden jeweils Schnitte an verschiedenen Stellen im Ferrit eingebracht und untersucht, in welchem Maße diese Löcher sich auf die magnetischen Kennwerte wie Induktivität, Kopplung und Flusssdichte auswirkten. Als Ergebnis dieser Untersuchung wurde die induzierte Spannung in dem Pickup benutzt, was einen direkten Hinweis auf die Kopplung zwischen primär und sekundär Seite zulässt.

Aus den Ergebnissen wurde ersichtlich, dass es beim Einbringen obiger Löcher, im vgl. zu einem homogenen Ferritteppich ohne Versatz, es zu einem Spannungseinbruch von 42 V kommt. Im Versatzfall vergrößert sich die Differenz auf 55 V. Demzufolge führt dies, bei einer Nennspannung von 400V, zu einem Spannungsverlust von 12 % im Pickup. Aufgrund dieser Nachteile wurden diese Aufbauentwürfe verworfen.

Die Voruntersuchung hat gezeigt, dass sich das Aufteilen in viele kleine Stützen magnetisch und mechanisch weit besser verhält.

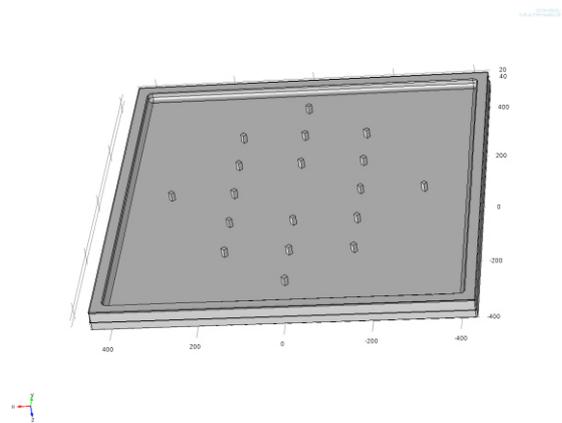


Abbildung 8: 3D-Animation der Bodenplatte mit eingebauten Stützen

Durch diese Entwicklung wurde die Verformung unter gleichen Randbedingungen auf maximal 0,36 mm reduziert. Die Stützen wurden an den Eckpunkten der Ferritkacheln angebracht. Dadurch werden die Kopplungseigenschaften nicht viel mehr beansprucht als ohne.

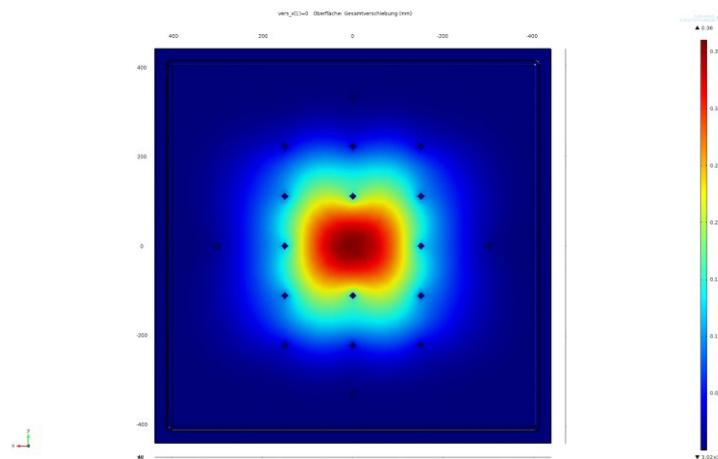


Abbildung 9: Verformung der Bodenplatte

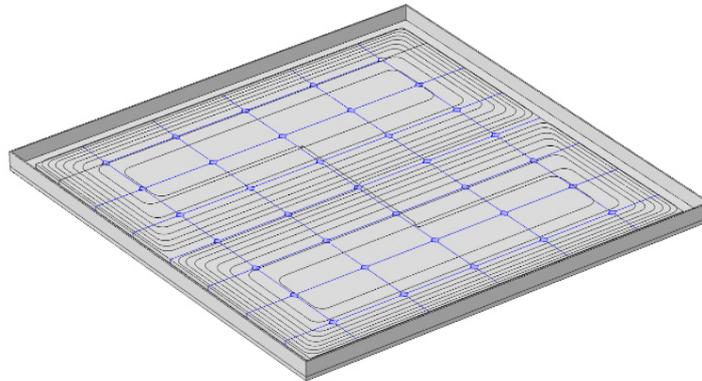


Abbildung 10: 3D-Animation der Bodenplatte mit eingebauten Stützen und Wicklung

Auf dieser Basis wurde die reale Primärplatte aufgebaut und getestet und in Betrieb genommen.

Um die theoretischen Annahmen zu überprüfen, wurde zwischen den fünf Lieferanten für die Energieübertragungstechnik (SEW, Vahle, IPT, IFAK, EAI) ein erster Kreuztest im November 2014 durchgeführt. Dort zeigten sich noch Unterschiede beim Ladeverhalten, wenn Sekundärteile („Pick-Up“) eines Herstellers durch Primärteile („Primärplatten“) eines anderen Herstellers mit Energie versorgt wurden. Es war eine gewünschte Zielgröße für diesen Test, bei Nennbedingungen des jeweiligen Pick-Up so elektrisch zu speisen, dass es eine angeschlossene Last mit 3000W Leistung versorgt wird. Dies wurde nicht in allen Punkten zu hundert Prozent erreicht, eine weitere Feinjustierung der Parameterdefinitionen wurde notwendig.

Die Primärspule koppelt den größten Anteil des von ihr erzeugten Flusses in die Pick-Up ein. Dies kann ebenfalls durch die Lage der Spulenwindungen beeinflusst werden. Aber auch die Lage des Ferrits und die Abstände der einzelnen Ferritplatten zueinander können die Kopplung beeinflussen. Um ein interoperables Laden zwischen den Verbundpartner ermöglichen zu können, muss der magnetischer Fluss folgende Charakteristik entsprechen (Abbildung 11).

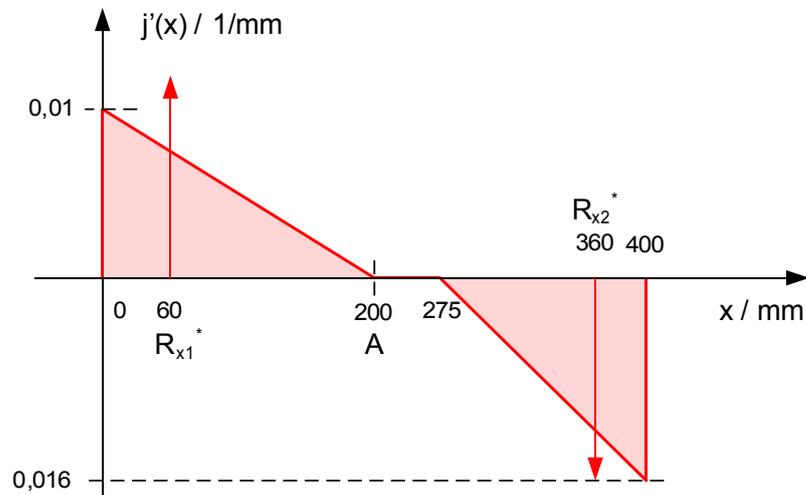


Abbildung 11: Magnetischer Fluss über die Platte gemäß Vereinbarung der InterOp-Partner

Der einfachste und erste Schritt dazu war, die Anordnung der Spulenwindungen aus der Referenzspule zu übernehmen und in einen eigenen Aufbau zu überführen, (vgl. Abbildung 12).

Jedoch war damit nicht gesichert, dass im Vergleich mit der Referenzspule genauso viel Fluss durch diese Spule in das Pick-Up eingekoppelt wurde.

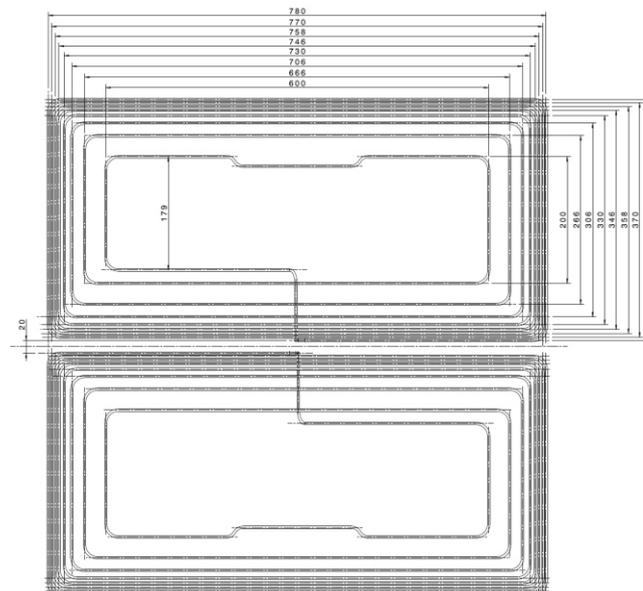


Abbildung 12: Geometrische Abmessungen der Referenzspule

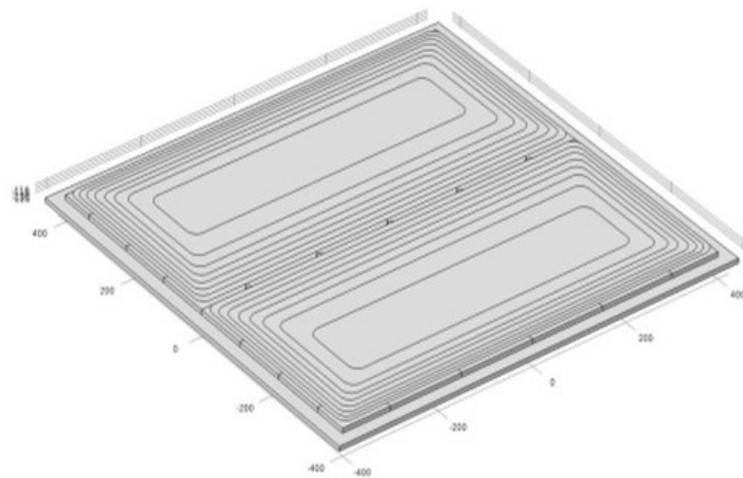


Abbildung 13: 3D-Animation der von VAHLE gebauten Primärseite

Deutlich sicherer ließ sich dies durch einen Vergleich des magnetischen Flusses B über der Primärplatte von VAHLE mit der Referenzspule sagen. Dazu musste der Betrag der Flussdichte B ausgehend von der Oberfläche des Ferrits ($z=0$) ermittelt werden. Dabei war es genügend, die Aussage entlang der z -Linie zu überprüfen (vgl. Abbildung 14).

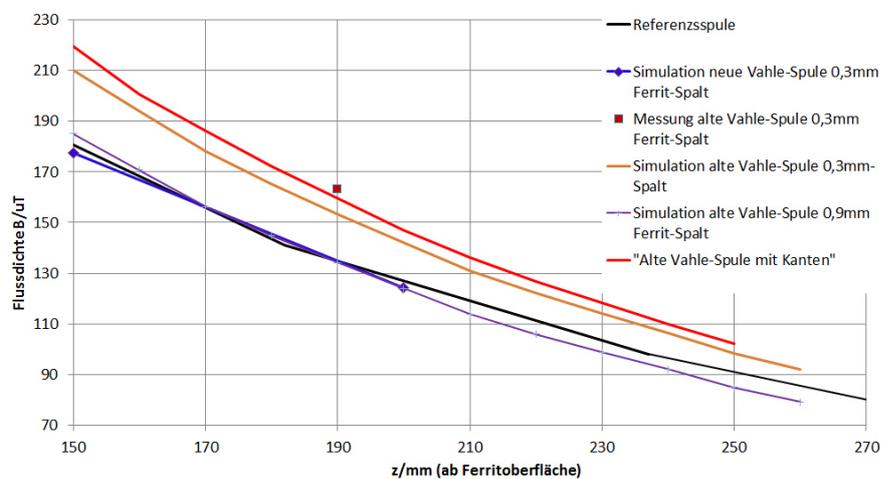


Abbildung 14: Flussdichte B (μT) entlang der z -Achse inmitten der Primärspule, Abstand senkrecht über Ferrit.

Die Simulation erfolgt ohne Pickup, da im Verbund Projekt InterOp verschiedene Pickup Formen möglich sind und damit eine Vergleichbarkeit erschwert wird.

Erst einmal zeigt sich, dass die VAHLE-Spulen im gesamten Bereich mehr Flussdichte B erzeugen als die Referenzspule. Dies sieht man sowohl bei der Simulation als auch bei der Messung.

Desweiteren ist zu beobachten, dass die Spule einen ähnlichen Verlauf der Flussdichte B erzeugt wie die Referenzspule. Eine Anpassung über Spalte zwischen der Ferriten und Spulengeometrie wäre also möglich.

Über die Variation des Spaltes, zwischen den einzelnen Ferritplatten, kann auf das erzeugte B-Feld ein nutzbarer Einfluss genommen werden.

In einer abschließenden Simulation wurde anschließend untersucht, ob die Kante des Alubleches, auf welchem das Ferrit aufliegt, die Kopplung beeinflusst. Dies sollte die Differenz zwischen der Messung im Labor und der Simulation erklären.

Die Tatsache, dass der Spalt zwischen den Ferritplatten (0,3mm bis 0,9mm) einen so großen Einfluss ausübt, sollte auf jeden Fall bedacht werden bei der Fertigung und dem mechanischen Design. Es muss sichergestellt werden, dass sich dieser Spalt zwischen dem Ferrit nicht ändert.

In der abschließenden Simulation wurden die Alu-Kanten der Wanne, in der die Ferrite und Primärspule liegen, mit berücksichtigt. Erst jetzt waren Messung und Simulation weitgehend deckungsgleich.

2.2 Schaltungstopologie

Es sind verschiedene Resonanztopologien denkbar zur Realisierung der induktiven Energieübertragung. Da die Ausführung des Projektes im öffentlichen Raum stattfinden wird, steht die Frage der Sicherheit ganz oben. Von fast ebenso hohem Interesse ist, dass gezeigt wird, dass diese Technologie über gute Wirkungsgrade verfügt. Die Wahl der Resonanztopologie hat direkte Auswirkungen auf die Regelbarkeit und somit auf die Sicherheit und die Energieübertragungseffizienz des Aufbaus. Zu Beginn der Untersuchungen wurde eine Matrix verschiedener Topologien erstellt (Abbildung 15 und Abbildung 16).

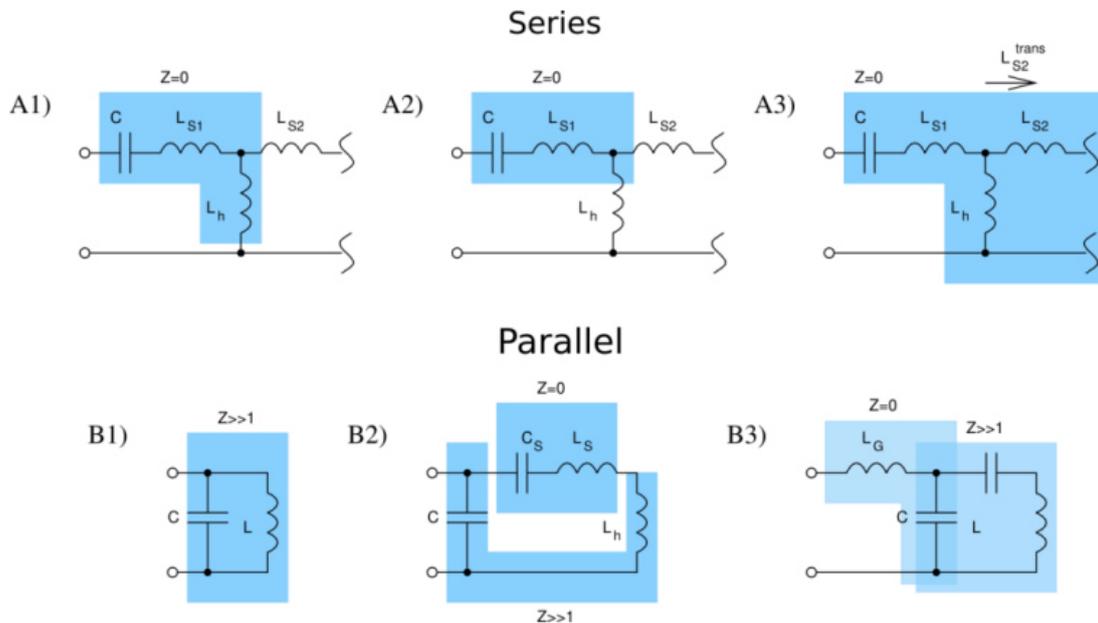


Abbildung 15: Verschiedene Resonanztopologien als elektrische Ersatzschaltbilder dargestellt.

In Abbildung 16 sind wesentliche Eigenschaften dieser Topologien in einer Matrix eingebracht:

	A1	A2	A3	B1	B2	B3
A1	$\frac{X_h^2}{R}$				R^\dagger	$\frac{X^2}{X_h^2} R$
A2		R^\dagger			R	
A3				$\frac{X^2}{X_h^2} R$		
B1			$\frac{X_h^2}{X^2} R$			
B2	R^\dagger	R			R	$\frac{X^2}{R}$
B3	$\frac{X_h^2}{X^2} R$				$\frac{X^2}{R}$	$\frac{X^4}{X_h^2 R}$

Abbildung 16: Matrix betrachteter Resonanztopologien Erläuterungen in (2).

Im Laufe der Arbeiten werden die verschiedenen Varianten bewertet in Bezug auf Regeleigenschaften und Wirkungsgrad.

Die Wahl der Resonanztopologie wirkt sich ebenso direkt auf die Eigenschaften der

- Verwendbarkeit verschieden großer Pickups,
- Ladbarkeit bei unterschiedlichen Bodenfreiheiten,
- sowie Feldstärkeverteilung unter und neben dem Auto (Schnittmenge zum Thema Sicherheit!) aus. Die Wahl der Resonanztopologie steht also auch in direktem Zusammenhang mit den möglichen Bauvarianten (also der Systemauslegung). So besteht auch eine Verknüpfung zur Frage

wie gut, mit großen und kleinen Pickups bei den gleichen Primärsystemen geladen werden kann (Abbildung 3).

Zu Beginn des Jahres 2014 wurde die Auswahl der leistungselektronischen Topologie intensiv diskutiert. Diese Frage war für das Projekt technisch von entscheidender Bedeutung. Sie wirkt sich auch auf andere Bereiche wie z.B. die Kommunikation oder die Sicherheitsbetrachtung aus.

Etwas vereinfacht lässt sich die Ausgangssituation wie folgt in Form einer Aufteilung in Primär- und Sekundärseite des gesamten induktiven Energieübertragungssystems darstellen.

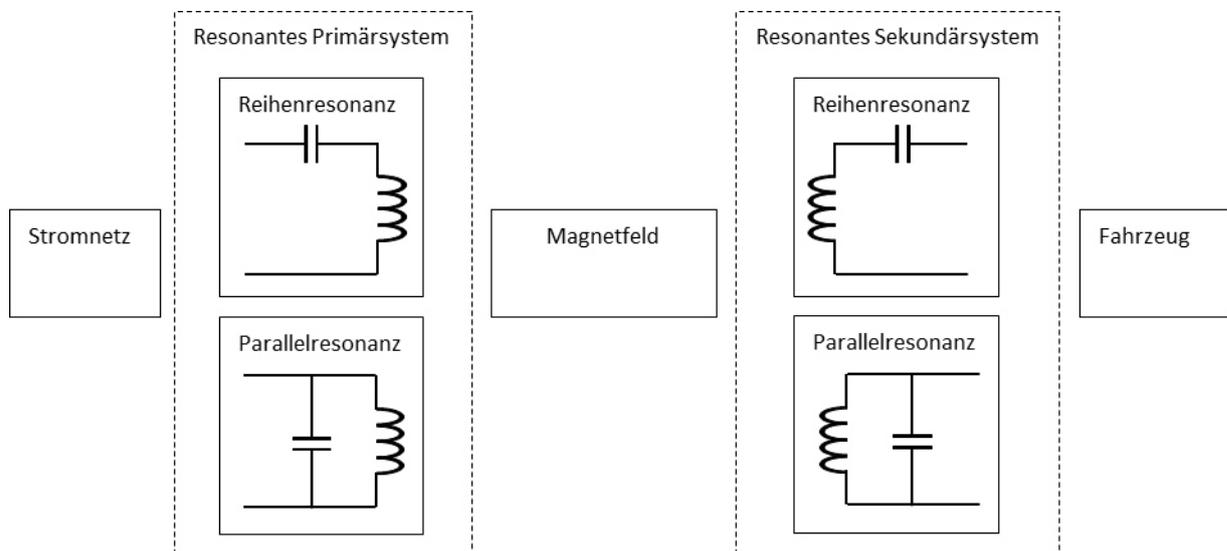


Abbildung 1: Übersicht zu den betrachteten Topologien der Leistungselektronik.

Bei den Überlegungen, welche Topologie für das Projekt InterOp am besten geeignet ist, ging es neben Kosten und Effizienz auch um Fragen zu den Auswirkungen auf das Gesamtsystem. So führt beispielsweise eine Reihenresonanz im Sekundärteil des Systems dazu, dass die Energiequelle am Fahrzeug, welche mit der Autobatterie verbunden ist, sich als Spannungsquelle verhält. Hingegen verhält sie sich wie eine Stromquelle, wenn die Sekundärseite als Parallelresonanz gestaltet wird, was in großen Teilen des Ladevorganges durchaus positiv sein kann.

Da die Auswirkung einer solchen Topologie-Auswahl auch von großer wirtschaftlicher Bedeutung ist, kam es zu mehreren Konferenzen und zahlreichen Untersuchungen bei den Technologielieferanten. Gegen Mitte des Jahres 2014 wurde eine Einigung erzielt, zu der eine ausführliche Beschreibung formuliert wurde. Etwas vereinfacht und nicht abschließend lässt sich die gemeinsame Topologieentscheidung der Technologielieferanten charakterisieren durch folgende stichpunktartige Beschreibung:

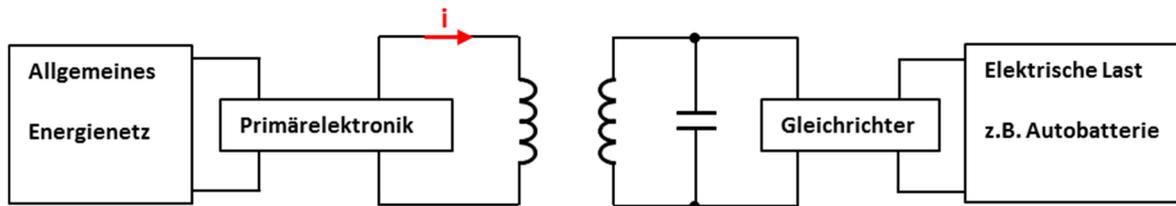


Abbildung 2: Grafische Darstellung zur Übereinkunft der leistungselektronischen Topologie[6].

- Die Stromquelle wird im Regelfall so gesteuert, dass sich eine primäre Netzanschlussleistung von 3,3kW +-10% aus dem allgemeinen Energienetz entnommen wird.
- Die Primärelektronik bildet durch aktive oder passive Maßnahmen eine gesteuerte Stromquelle, die eine Nenndurchflutung von $\Theta = 120 \text{ Aeff}$ erzeugt. Typischerweise macht sie dies durch eine Steuerung des Stromes i in der Primärspule.
- Als Sekundärkreis wird ein auf die Arbeitsfrequenz abgeglicherer Parallelschwingkreis empfohlen.

Mit diesen drei Punkten ist die Übereinkunft technisch noch nicht abschließend wiedergegeben. Sie ist bewusst so gefasst worden, dass noch eine gewisse Freiheit für die Entwicklung bei jedem der Technologielieferanten bleibt, was zur Förderung der Innovation des Projektes beitragen soll. Zudem ist sie in erster Näherung völlig unabhängig von einer Frequenzfestlegung zum interoperablen Betrieb.

Diese Ausarbeitung und Festlegung wurde zusammen mit einer Beschreibung des Spulendesignes der Primärspule, welches bereits Ende 2013 im InterOp-Kreis festgelegt worden war, schriftlich in die internationale Normung (IEC 61508) eingebracht.

Im Hause VAHLE wurden basierend auf der Topologieentscheidung zwei Technologiezweige weiter verfolgt.

- Type 1: Magnetische Linse
- Type 2: Kapazitiver Spannungsteiler

2.2.1 Topologie Typ 1 - Magnetische Linse

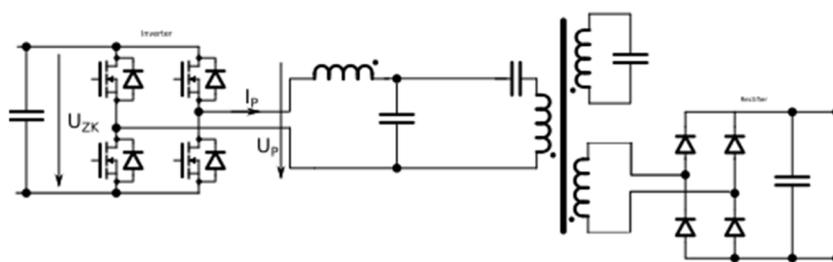


Abbildung 17: Ersatzschaltbild der magnetischen Linse

Die Topologie setzt sich aus einer Magnetisierungswicklung mit Kompensationskondensator sowie einer Auskoppelwicklung mit angeschlossenem Gleichrichter zusammen. Diese verhält sich grundlegend wie eine Stromquelle mit gleichzeitig schonendem Verhalten gegenüber dem Gleichrichter.

Die gewählten Parameter der verwendeten Materialien für die Simulation sind angepasst. Dabei ist zum Beispiel die Leitfähigkeit von Luft und PVC angehoben worden, um eine Konvergenz der Lösung zu erhalten. Da die Dimensionen zwischen leitenden und nicht leitenden Materialien noch groß genug sind, ist der Fehler zu vernachlässigen.

Materialien	μr	Epsilon r	Sigma (S/m)
Luft	1	1	1.00E-03
Kupfer	1	1	5.60E+07
Aluminium	1	1	3.70E+07
PVC	1	1.6	1.00E-03
Core	2500	1	0.1

Tabelle 1: *Materialkennwerte*

Um die Simulation der Realität anzupassen, ist eine niederpermeable Schicht zwischen den einzelnen Ferritplatten eingebracht.

Nachfolgende Simulationsergebnisse zeigt die magnetische Flussdichte, die entsteht, wenn zum einen die primäre und anschließend die sekundäre Seite bestromt wird, (vgl. Abbildung 18 und Abbildung 19).

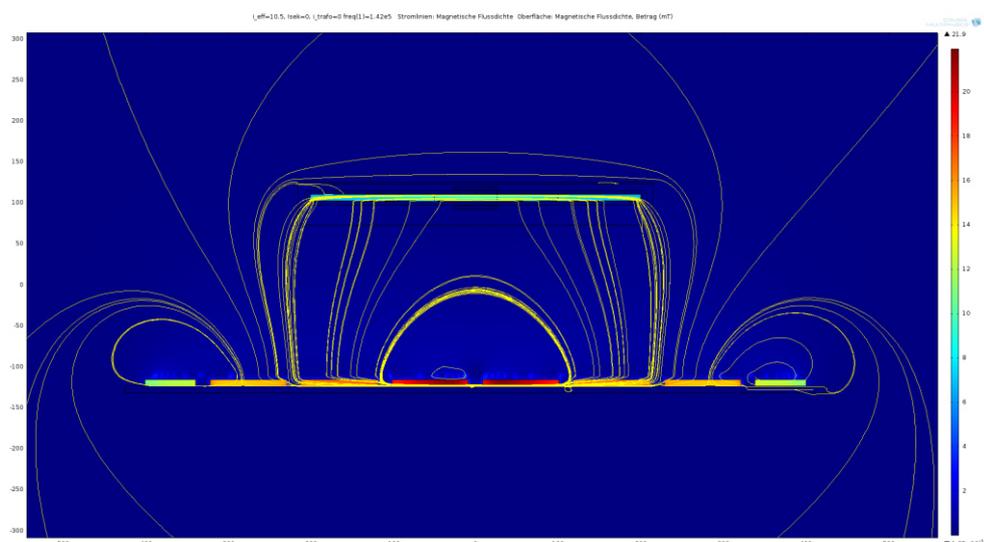


Abbildung 18: *Simulationsergebnis der primär bestromten Wicklung*

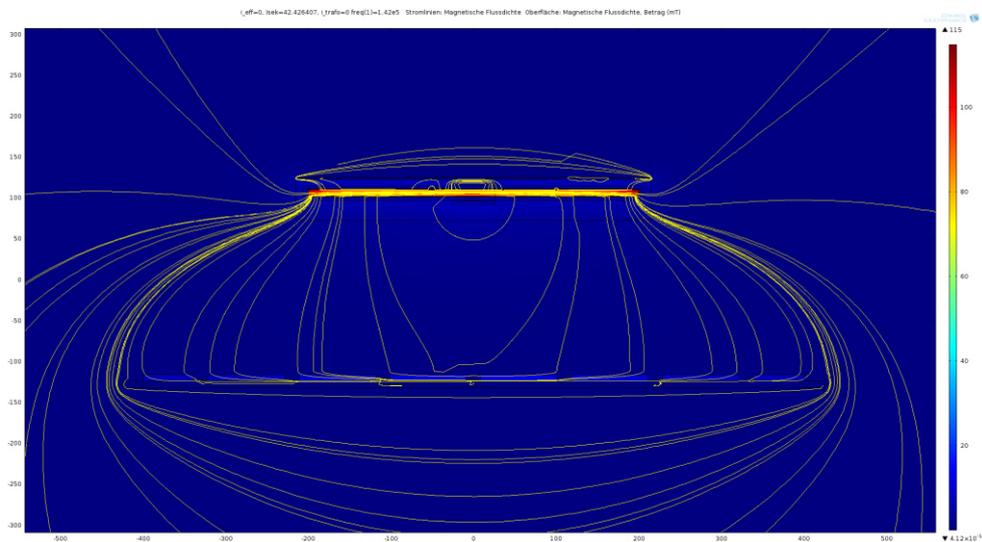


Abbildung 19: Simulationsergebnis der sekundär bestromten Wicklung

Aus der Simulation ließen sich anschließend die Parameter für ein Spice-Model ableiten.

Die Spice-Simulation zeigte, dass einphasig 3 kW mit der Anordnung problemlos zu erreichen sind. In den einzelnen Simulationen wurde die Anzahl der Windungen der Auskoppelwicklung variiert, um zu erfahren, wie sich der Strom dort beeinflussen lassen kann.

Der Zusammenhang ist nachfolgend für eine bessere Nachvollziehbarkeit in einer Kurve, Strom zu Windungszahl in der Auskoppelwicklung, dargestellt, Abbildung 20.

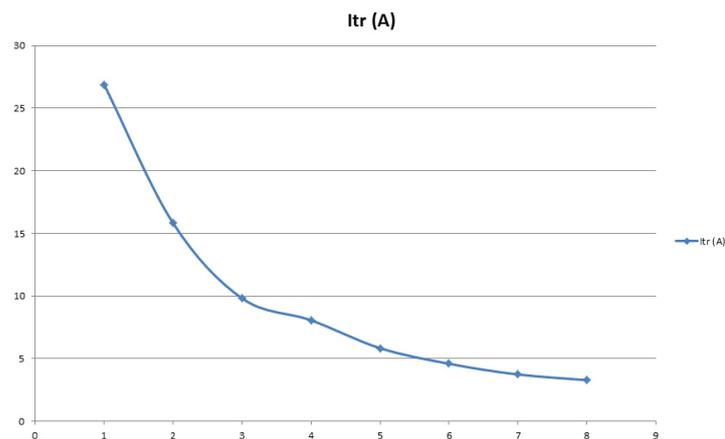


Abbildung 20: Strom zu Windungszahl in der Auskoppelwicklung

Praktischer Nachweis:

Der auf Grund der gewonnen Erkenntnisse aufgebaute Prototyp ist in Abbildung 21 dargestellt. Mittig ist die y-Phase der Primärspule mit Kompensation zu erkennen. Darunter liegt die x-Phase, welche

für den interoperablen Betrieb wichtig ist. Über der Primärseite ist der mechanische Aufbau des Pick-Ups zu sehen.

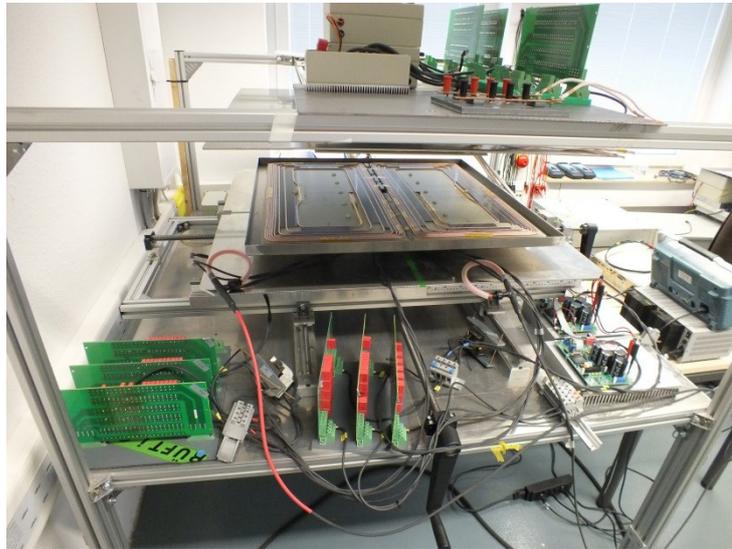


Abbildung 21: Prototyp der magnetischen Linse

Im Oszillogramm der Abbildung 22 wird mit Kanal 1 und 2 der Strom durch die beiden Magnetisierungsspulen dargestellt. Kanal 3 und 4 geben die differentielle Spannung an zwei unterschiedlichen Dioden am Brückengleichrichter wieder.

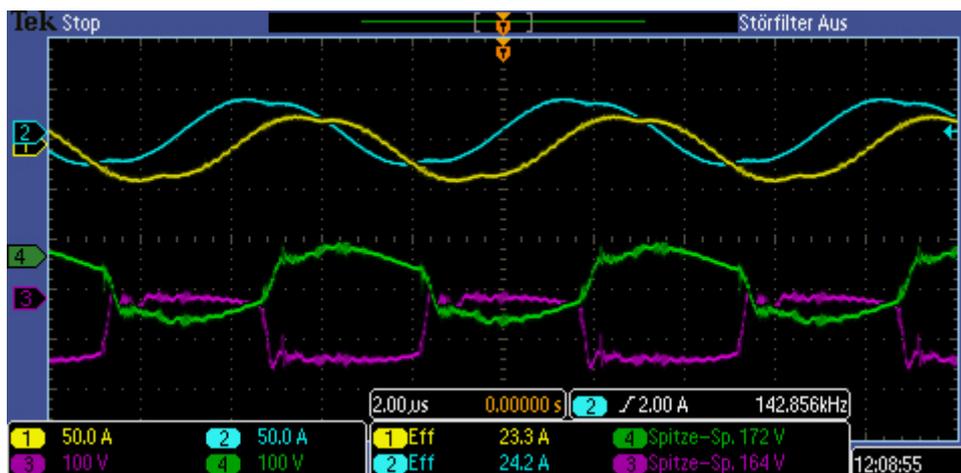


Abbildung 22: Simulationsergebnis des ersten Versuchs mit magnetischer Linse

Fazit:

Ein System mit dieser Konfiguration funktioniert. Es verhält sich allerdings nicht in allen Details exakt gleich wie die folgende Konfiguration. Es mußte zu Gunsten einer sicheren Interoperabilität

eine Entscheidung für eine der beiden möglichen Varianten getroffen werden, die zu Gunsten der zweiten Ausführung fiel. Dieser Lösungszweig wurde nicht mehr weiter verfolgt.

2.2.2 Topologie Typ 2 - Kapazitiver Spannungsteiler

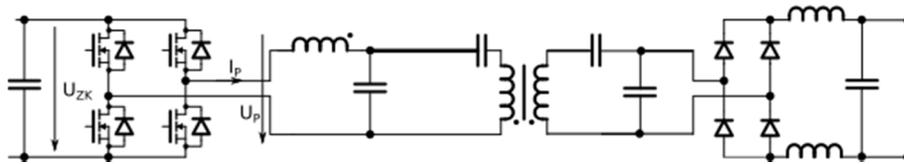


Abbildung 23: Ersatzschaltbild des Kapazitiven Spannungsteilers

Die Topologie setzt sich aus einem seriellen Reihenschwingkreis und einem kapazitiven Teiler auf der sekundären Seite für die Energieübertragung zusammen. Um rudimentäres Verhalten der Topologie zu erhalten, sind mehrere Simulationen angefertigt worden. Die Parameter sind so definiert, dass bei einem Abstand von 138 mm der beiden GFK-Platten zueinander und mittlerer Anordnung gerade ein induktiver Schaltwinkel von $\approx 20^\circ$ entsteht.

Nachdem der mechanische Aufbau nach obigen Parametern entstand, wurde dieser unter mehreren Testszenarien auf Tauglichkeit der Auslegung geprüft. Dabei wurde für die Spannungsversorgung der ersten Experimente die Zwischenkreisspannung U_{ZK} mit externen Netzteilen eingepreßt. Somit sind nachfolgende Ergebnisse auf die DC/DC-mäßige Übertragung bezogen. Randbedingungen für den Durchlauf waren folgende:

- Die Zwischenkreisspannung wurde solange erhöht, bis 3kW an der elektronischen Last anliegen.
- Die geregelte Ausgangsspannung der PFC, welche im abschließenden Aufbau die Zwischenkreisspannung zur Verfügung stellt, kann eine maximale Spannung von 390 V bereitstellen.
- Die Last stellt eine elektronische dar.

Nachfolgende Oszillogramme zeigen die Kurvenverläufe zu in den diskreten Testszenarien, (vgl. Abbildung 24 bis Abbildung 27).

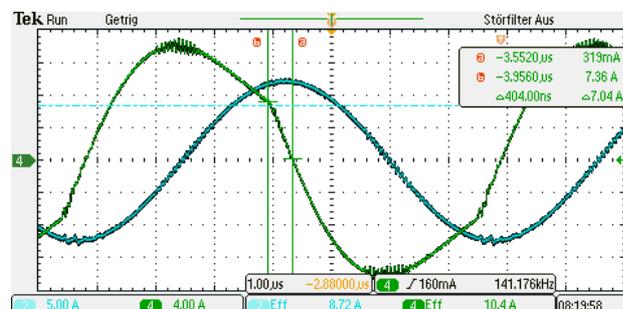


Abbildung 24: Luftspalt 138mm, mittig

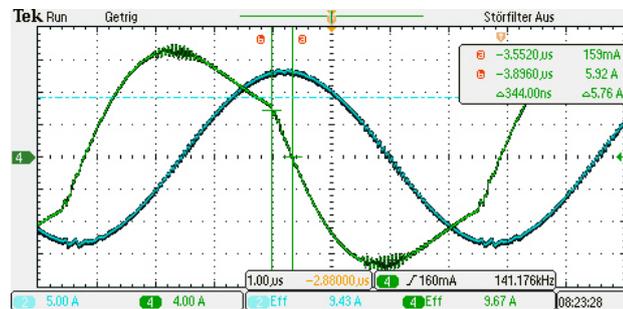


Abbildung 25: Luftspalt 150mm, mittig

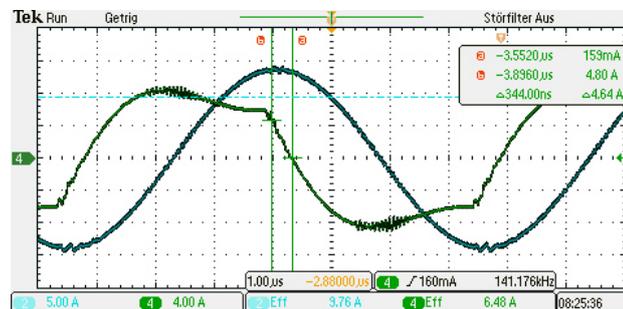


Abbildung 26: Luftspalt 150mm, 100/0

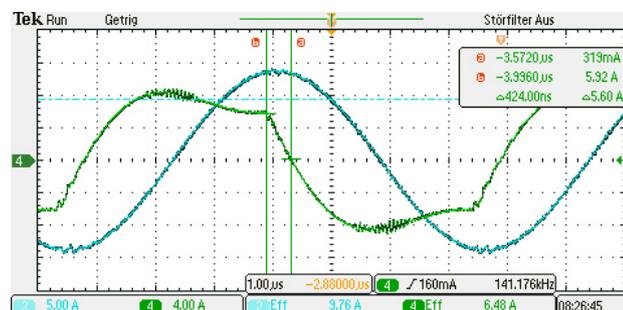


Abbildung 27: Luftspalt 150mm, 100/100

Anschließend wurden die gleichen Testszenarien wiederholt. Der Unterschied liegt darin, dass folglich die Zwischenkreisspannung mit den geregelten PFC für die Einprägung der Zwischenkreisspannung verantwortlich ist. Somit sind nachfolgende Ergebnisse auf die AC/DC-mäßige Übertragung bezogen. Durch die realisierte interne Leistungsregelung wird die Eingangsleistung auf 3,3kW geregelt. Durch den jeweiligen Versatz und Luftspalt stellt sich die Ausgangsleistung ein. Nachfolgende Oszillogramme zeigen die Kurvenverläufe zu in den diskreten Testszenarien, (vgl. Abbildung 28 bis Abbildung 31).

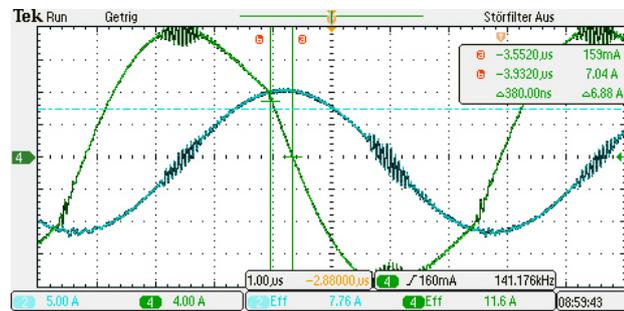


Abbildung 28: Luftspalt 122mm, mittig

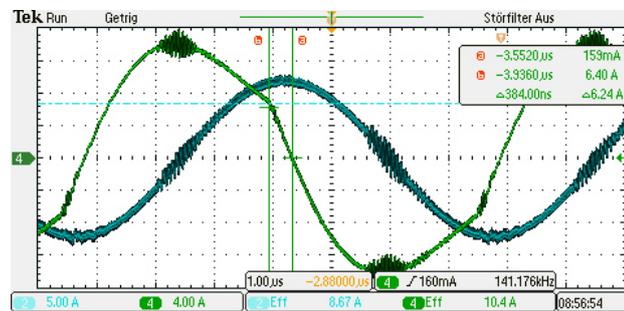


Abbildung 29: Luftspalt 138mm, mittig

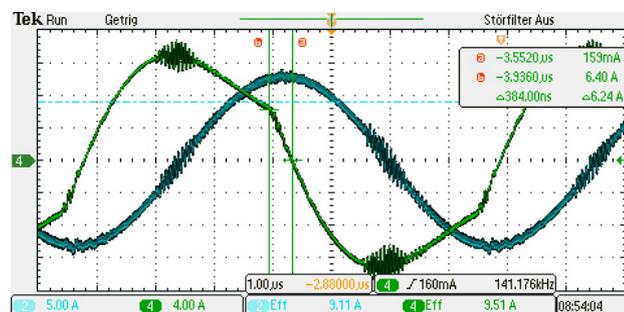


Abbildung 30: Luftspalt 155mm, 100/0

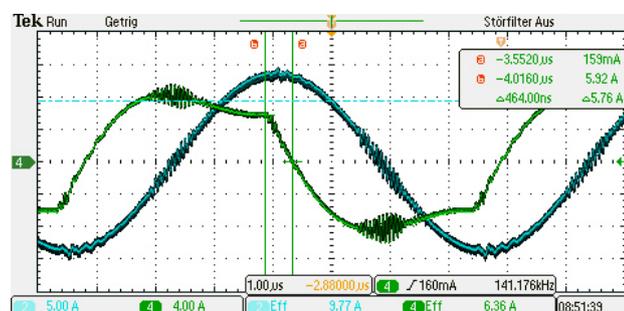


Abbildung 31: Luftspalt 150mm, 100/100

Das anschließende Diagramm zeigt die Temperaturerwärmung der verschlossenen Pickup im inneren an zwei Messpunkten durch einen Langzeittest, welches ein Ladezyklus einer leeren

Batterie bis zur Aufladung entspricht, (vgl. Abbildung 32). Der Abstand betrug 138 mm ohne jeglichen Versatz. Beide Kurven zeigen einen statischen Endwert von ca. 88°C bzw. 73°C. Da die Bauteile im inneren diese thermische Entwicklung problemlos verkraften, kann der Prototyp des Pickups genutzt werden. Jedoch ist die hohe Endtemperatur ein Indiz dafür, dass weiterer Entwicklungsbedarf vorhanden ist, um die stationäre Endtemperatur zu senken und damit den Wirkungsgrad zu erhöhen.

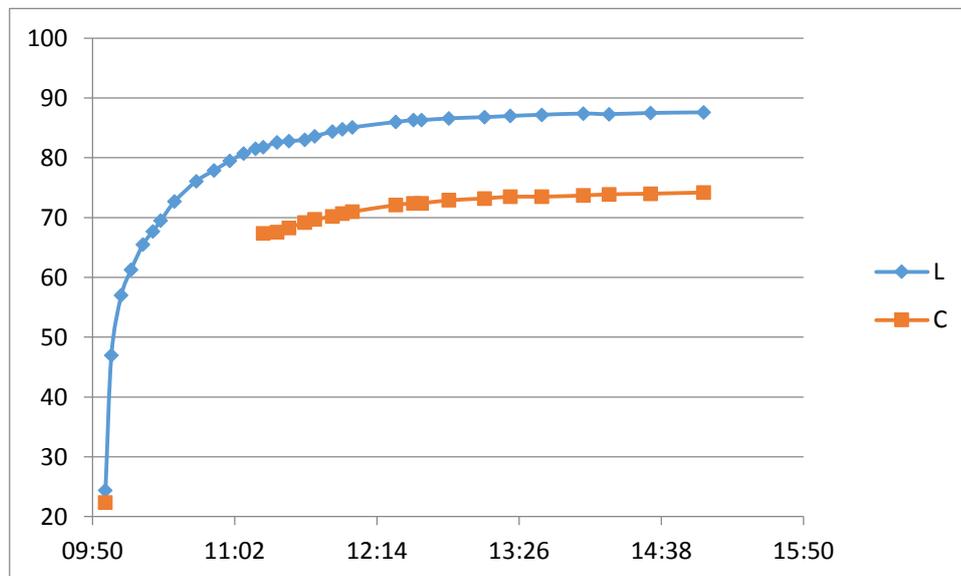


Abbildung 32: Dauertest

2.3 Gegenüberstellung der Wirkungsgrade gemessen am Referenzsystem

Nach Verifikation der Messergebnisse wurde im letzten Schritt die elektronische Last gegen die reale Hochvoltbatterie eines KFZ ausgetauscht. Sämtliche Testszenarien wurden anschließend ein weiteres Mal durchgeführt sowie für eine bessere Aufnahme in einem Balkendiagramm illustriert.

Für die Verifikation, dass die VAHLE Pick-Up mit dem Referenzsystem einen interoperablen Betrieb aufnehmen kann, wurden sämtliche Szenarien ein weiteres Mal unternommen, (vgl. Abbildung 33).

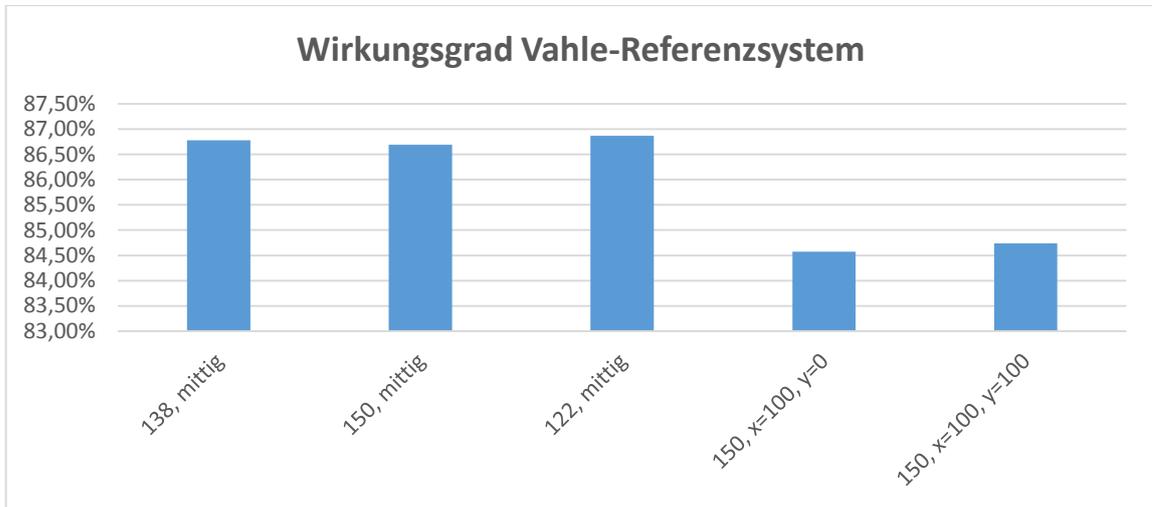


Abbildung 33: Wirkungsgrad der VAHLE Pick-Up unter Einprägung der Leistung durch das Referenzsystem

Nachfolgendes Diagramm zeigt die verschiedenen Wirkungsgrade gemessen am Referenzsystem. Daraus ist abzuleiten, dass die geforderten 90% Wirkungsgrad von allen Technologiepartnern im ersten Ansatz verfehlt wurden (siehe Abbildung 34). Gleichwohl ist ein höherer Wirkungsgrad möglich, wenn höherwertige Peripherieteile eingebaut werden. Hier ist insbesondere zu nennen die Netzanbindung über eine PFC-Schaltung. Zwecks Konzentration auf die spezifische Leistungselektronik der induktiven Übertragung wurden für die bekannte Technik der PFC-Schaltung käufliche Module eingesetzt, die nicht auf höchste Effizienz hin ausgelegt sind.

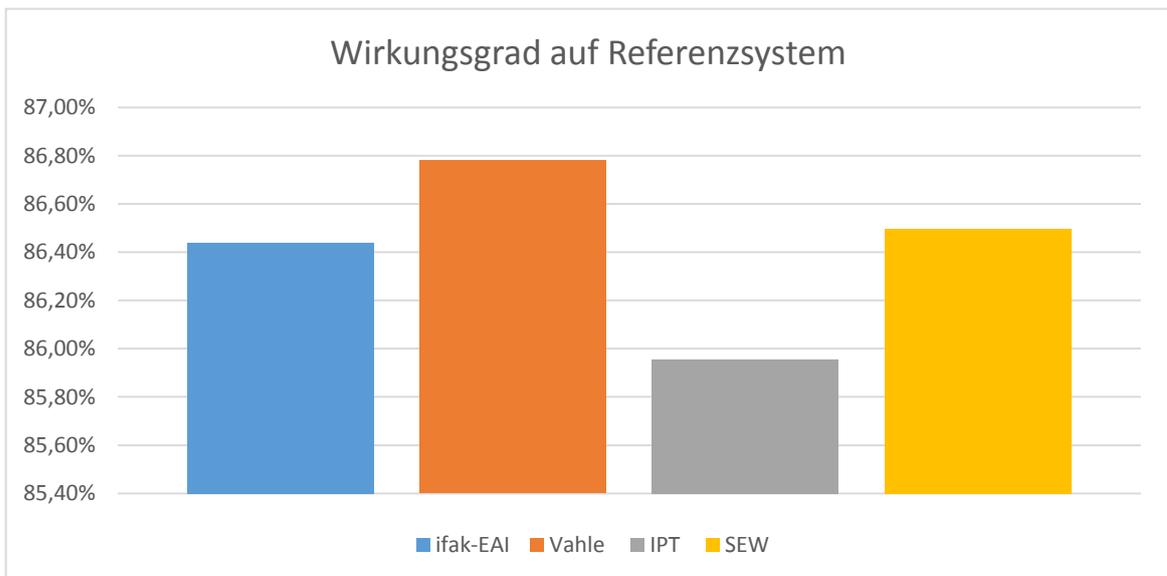


Abbildung 34: Wirkungsgrad der Technologielieferanten gemessen an Referenzsystem

2.4 Untersuchungen zur Ermittlung der optimalen Arbeitsfrequenz

Eine von mehreren Voraussetzungen für das Funktionieren eines interoperablen Ladens ist die Verwendung einer einheitlichen Arbeitsfrequenz der induktiven Ladesysteme. Seit Start des DKE-Arbeitskreises 353.0.1 wurde aus Gründen der Erwärmungsfrage von Metall im magnetischen Luftspalt sowie der EMF-Abstrahlung im Umfeld 140 kHz als optimale Arbeitsfrequenz für die Anwendung des Ladens eines PKWs angesehen.

Im Laufe des ersten Jahres der Projektlaufzeit wurde von den deutschen OEMs der Wunsch formuliert, als Systemfrequenz 85 kHz zu verwenden. Theoretische Arbeiten im Rahmen dieses Projektes zeigten dann, dass die höhere Frequenz von 140 kHz ein wesentlich geringeres Bauvolumen für die Energieübertragungsanlagen verspricht. Dies wurde anschließend auch in Simulationen und Experimenten bestätigt. Es ließ sich auch zeigen, dass zur Übertragung der gleichen Leistung bei 85 kHz ein deutlich höheres Magnetfeld erzeugt werden muss. Dies ist nachteilig, da sich damit die magnetische Flußdichte im Luftspalt erhöht und sowohl die Erwärmungsthematik als auch die Einhaltung von Grenzwerten im Umfeld erhöht. Damit geht ein her, dass der Wirkungsgrad bei einer Energieübertragung mit 85 kHz für vergleichbare Anlagen schlechter wird. Dies äußerte sich unter anderem auch darin, dass bei der 85 kHz-Übertragung eine größere Erwärmung auf der Sekundärseite (also der Energieabnehmer im Fahrzeug) zu beobachten ist. Dies ist in sofern sehr kritisch, da dies ohne hin ein Ort ist, der seitens des Fahrzeugs bereits mit großer Wärme belastet wird (Abgasstrang).

Bezüglich der Umsetzbarkeit wird in die Diskussion zur Arbeitsfrequenz oft eingebracht, dass angeblich mehr EMV-Probleme bei 140 kHz existieren würden. Ausführliche technische Betrachtungen in diesem Projekt zeigten aber, dass sich diese angeblichen EMV-Probleme mit vertretbarem Aufwand allesamt in den Griff bekommen lassen.

Aufgrund dieser Untersuchungen kam der Projektteilnehmer VAHLE zu dem Ergebnis, sich für die Arbeitsfrequenz 140kHz auszusprechen.

Da es zu diesem Zeitpunkt unsicher war, inwieweit dieser Wunsch nach 85 kHz Bestand haben würde, wurde im InterOp-Kreis entschieden, die 140 kHz weiterhin als Systemfrequenz zu behalten, zumal ein Systemwechsel von der höheren auf die niedrigere Frequenz deutlich einfacher erscheint als umgekehrt.

3 Kommunikation

3.1 Kommunikation normen-ähnlich

Während der Projektlaufzeit lief eine intensive Diskussion in den Normungsgremien um die Ausgestaltung der Kommunikation zwischen der Primär- und Sekundärseite. Betroffen sind die Entwürfe zur IEC/ISO 61980-3 sowie ISO 15118. In diese noch nicht abgeschlossene Diskussion flossen auch Erkenntnisse aus dem InterOp-Projekt ein.

Zunächst erfolgte das Zusammentragen der Anforderungen an ein Kommunikationssystem unter Berücksichtigung von infrastrukturseitigen und automotiven Anforderungen. Im weiteren Verlauf folgten die Detaillierung der Anforderungsanalyse an Kommunikationstechnologien (inkl. Gewichtung) vor dem Hintergrund der verschiedenen Anwendungen (Positionserfassung, Regelung, Identifikation, Kopierschutz, ...) sowie die Abstimmung und anwendungsspezifische Auswahl im Projektkonsortium.

Die Kommunikation zwischen der Primär- und der Sekundärseite ist genauso wichtig wie die Kommunikation unter den verschiedenen Primärseiten. Zumindest dann, wenn sich mehrere Primärseiten auf einem Areal befinden (z.B. Parkhaus oder Parkplatz). Von der Ausrichtung der kommunikativen Infrastruktur ist auch das Thema Sicherheit erheblich betroffen. Es wirkt sich ebenso auf die Akzeptanz dieser Technologie über dieses Projekt hinaus aus.

Im Vordergrund steht daher, einen geeigneter Aufbau der Kommunikation zu planen, der primär der Anforderung eines ausreichend sicheren Betriebs genügt bzw. dazu beiträgt und der die komfortablen Eigenschaften und die Einfachheit der Technologie des induktiven Ladens optimal herausstellt.

Nach ausführlichen Betrachtungen verschiedener Systeme zeichnet sich ein Weg ab, der zwei Kommunikationskanäle nebeneinander als sinnvoll erscheinen lässt. Dabei wird ein Kommunikationskanal geringer Reichweite (z.B. reichweitenbegrenztes WLAN, induktive Nahfeldkommunikation etc...) im Raum zwischen Fahrzeug und primärer Ladeinheit bereitgestellt. Er grenzt sich zum zweiten Kommunikationskanal also derart ab, dass seine Reichweite so gering ist, dass er durch Sendekomponenten gleicher Art bereits von der Nachbarparkbucht nicht mehr beeinflusst werden kann. Der zweite Kanal soll eine WLAN-Verbindung sein, die typischerweise über mehrere Meter problemlos funktioniert. Damit kann ein Parkplatz, bestehend aus mehreren Parkbuchten, über einen zentralen Punkt (z.B. Accesspoint und Rechner) mit einer Kommunikation versorgen werden. Der Vorteil der WLAN-Kommunikation liegt darin, dass sie das Potenzial für viele Komfortfunktionen bietet. Hingegen liefert die reichweitenbegrenzte Kommunikation eine höhere Robustheit im Hinblick auf die technische Steuerung bzw. Regelung des Ladevorganges, was mit Hinblick auf die Sicherheit von großem Interesse ist.

Um diese beiden Wege sinnvoll in das Projekt einzubringen, ist ein hardwareunabhängiges Vorgehen für die Kommunikationsabläufe erarbeitet worden („Activitymodell“, Sequenzchart ...).

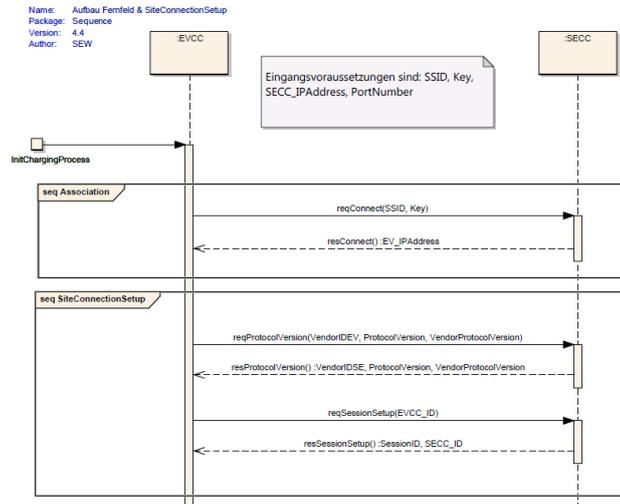


Abbildung 35: Der Ablauf der Kommunikation noch zu Beginn des Jahres 2014 – dargestellt als sogenanntes Activity-Diagramm.

Das Activity-Diagramm diente als Basis für die Erarbeitung einer State machine. Sie bereitzustellen ermöglicht vor allem eine einfache Implementierung. Folgende Abbildung zeigt die State machine mit dem Stand Ende des Jahres 2014:

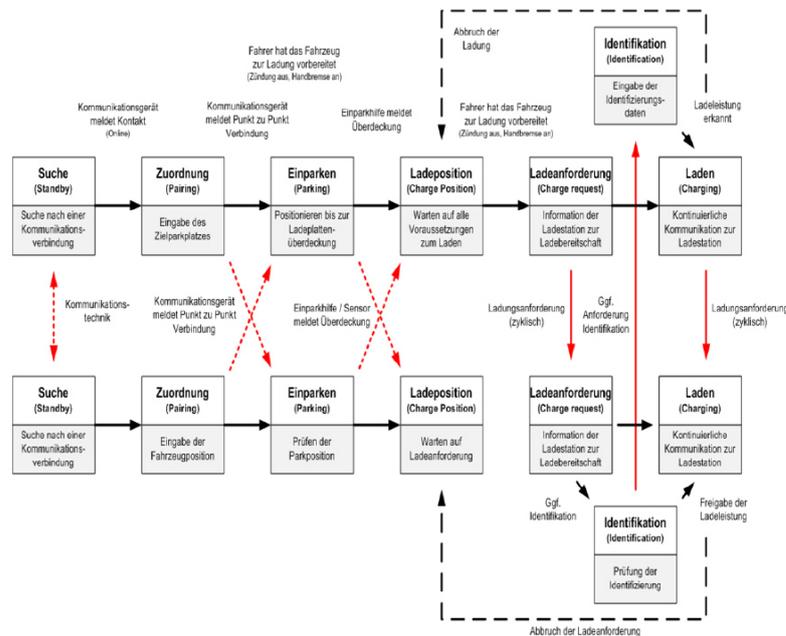
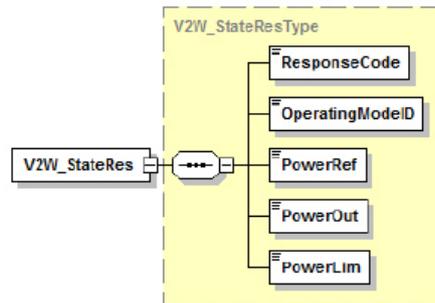


Abbildung 36: State machine erarbeitet im Laufe des Jahres 2014 [6]

Parallel zur State machine ist an dem Protokoll der Kommunikation weitergearbeitet worden. Auch hier ist von einer Grundlage aus dem Jahr 2013 ausgegangen worden. Das Beispiel des Telegramms „State-response“, in dem die Sekundärseite ihren Zustand während des Ladens der Primärseite mitteilt.



Element-Name	Typ	Bedeutung
ResponseCode	Byte[2]	Siehe 3.15
OperatingModelID	Byte	Ausgewählter Arbeitspunkt
PowerRef	Byte[2]	Geforderte Lade-Leistung
PowerOut	Byte[2]	Aktive Lade-Leistung
PowerLim	Byte[2]	Maximal erlaubte Lade-Leistung

V2W_StateRes (Binäre Kodierung)

Byte- No	V2W-Body					
	0-1	2-3	4	5-6	7-8	9-10
MessageID 0x0009	ResponseCode	Operating ModelID	PowerRef	PowerOut	PowerLim	

Abbildung 37: Das Telegramm „States-Response“ vom Fahrzeug zur Primärseite [5].

Bei dem Kreuztest Ende November 2014 in Kamen konnte gezeigt werden, dass leitungsgebunden die Kommunikation zwischen SEW und VAHLE bereits auf Basis des hier vorgestellten Protokolls funktioniert. Es fand ein Zustandswechsel von „Ladebereitschaft“ in „Laden“ statt. Der Sekundärteil war einerseits von VAHLE und das Primärteil andererseits von SEW programmiert worden.

Da über Protokoll und State machine schon wesentliche Kenntnisse bestanden, ist gegen Ende des Jahres 2014 die Diskussion zur physikalischen Realisierung der drahtlosen Kommunikation fortgeführt worden. Dabei sind noch letzte Details bezüglich der Störempfindlichkeit verschiedener Modulationsverfahren untersucht worden.

Die detaillierte Beschreibung des Kommunikationsprotokolls befindet sich im Jahresbericht des Projektteilnehmers SEW.

3.2 Kommunikation in minimalster Ausgestaltung

Eine ausführliche Anforderungsanalyse des Kommunikationssystems hinsichtlich Leistungsparameter, Einsatzszenarien, Kosten etc. wurde erstellt. Dabei zeigten sich neben weiteren betrachteten Systemen (Bluetooth, WLANp etc.) konkrete technische Vorteile einer kombinierten induktiven Energie- und Datenübertragung.

Da die Normen zur Kommunikation letztendlich noch nicht abgeschlossen sind, hat man sich im Konsortium für die realen Umsetzung zum interoperablen Betrieb auf dem EUREF-Campus in Berlin entschlossen, statt der aufwendigen Lösung eine minimalistische Lösung zu verwenden.

Aus Sicherheitsbetrachtungen wurde vereinbart, dass das Fahrzeug ein induktives und in der lokalen Ausbreitung begrenztes Signal an die Primärseite sendet als Kennung dafür, dass sich ein Pickup über der Ladeplatte befindet. Umgekehrt kann über dieses Signal nach Massgabe des Batterie-Management-Systems der Batterie (BMS) im einfachsten Fall der Ladevorgang gezielt beendet werden. In einer komfortableren Version können auch Daten zur konkreten Regelung übersendet werden. Diese Version muss aber trotzdem zur Einfachversion kompatibel sein.

Nebenbei ergibt sich aus diesem Aufbau die Möglichkeit einer minimalistischen Positionsanzeige.

3.2.1 Sendeseitig

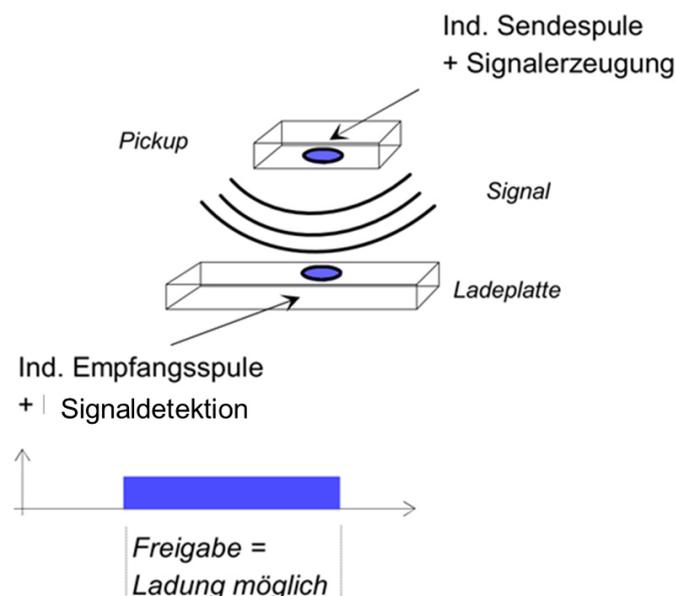


Abbildung 38: Prinzip der Übertragung

Zusätzlich zu den Spulen der Leistungsübertragung enthalten sowohl die Primär- als auch Sekundärplatte separate Spulen zur Signal bzw. Datenübertragung. Die Sendeschaltung moduliert ein 2 MHz-Signal und sendet dieses über die Sendespule im fahrzeugseitigen Pickup aus. Dieses Signal primärseitig über eine Empfangsspule empfangen und weiterverarbeitet.

Der Sender muss einen Strom von $100 \text{ mA}_{\text{eff}}$ durch eine Spule mit 5 Windungen bei 2 MHz treiben. Außerdem muss der Sender ein- und ausschaltbar sein, um eine PWM aufmodulieren zu können. Der Sender wird mit einer Versorgungsspannung von 12 V versorgt und entnimmt der Spannungsquelle ca. 60 mA. Liegt ein Pegel von 12 V an, wird der Sender aktiviert. Andernfalls wird der Eingang auf Masse gezogen.

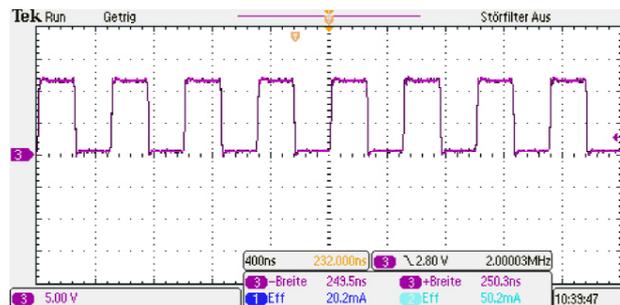


Abbildung 39: Ausgangssignal des Operationsverstärkers

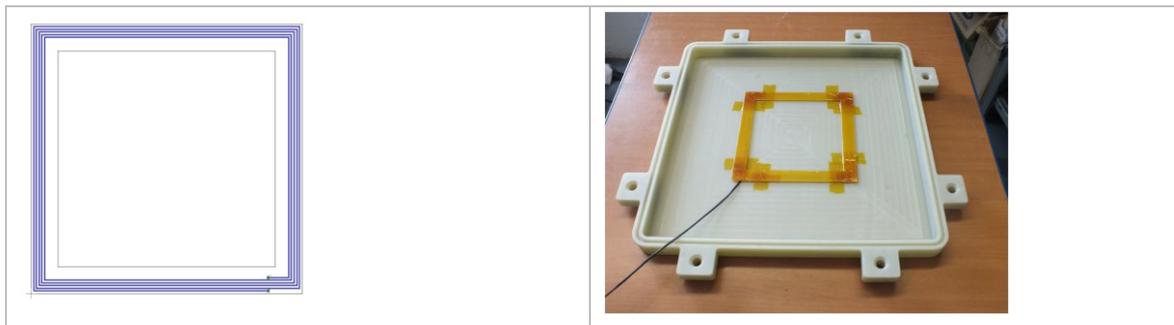


Abbildung 40: Simulationsbild der Rahmenantenne (links), Mechanischer Aufbau der Rahmenantenne (rechts)

Die Sendeantenne ist eine Rahmenspule mit den Außenmaßen von 20cm x 20cm und besteht aus 5 Windungen. Die Sendeantenne wird so angeordnet, dass sie tiefer liegt als die Energiespule im Pick-Up, siehe Abbildung 40.

3.2.2 Empfangsseitig

Bei P2PS muss die Bodenseite das vom KFZ gesendete „Signal“ sicher erkennen. „Sicher“ bezieht sich auf zwei technische Anforderungen:

- Nach dem Einschalten werden auch magnetische Felder durch die Energieübertragung erzeugt. Je nach Art des Schaltens entstehen auch Oberschwingungen über die 140kHz hinaus. Die Gefahr liegt darin, dass auch ein gewisser Anteil im Bereich von 2MHz liegt. Wenn nun das KFZ abschaltet, könnte es vorkommen, dass die Bodenseite weiter ein Signal in der entsprechenden Amplitude empfängt (aufgrund der Oberschwingungen der eigenen Energieübertragung). Dies muß durch Massnahmen auf der Energieseite (Filterung) und der Signalseite verhindert werden.

Als letzte Sicherheit dienen die Schütze in der Batterie ziehen und die Sicherheitsbeschaltung (Crowbar) in der Pick-Up.

- Es wird ein 2MHz Signal von einem externen Gerät aus der Umgebung ausgesendet. Dies könnte dazu führen, dass die Bodenseite fälschlich einschaltet.

Daher muss die Empfangseinheit (Antenne und Empfangselektronik) einen Bandpass aufweisen, der die 2MHz möglichst schmalbandig filtert und die PWM (z.B. 30% - 70%) als solche auch erkennt und von anderen PWM-Varianten unterscheiden kann.

Die Antenne soll in Reihenresonanz betrieben werden. Dazu wird ein 500 Ohm Widerstand in Reihe geschaltet, um einer hohen Stromaufnahme entgegenzuwirken. Parallel an diesen wird mit 500 Ohm das Empfangssignal möglichst rückwirkungsfrei abgegriffen.

In den nachfolgenden Oszillogrammen können die verschiedenen Verzugszeiten nach einem Pegelwechsel ausgelesen werden. Grundsätzlich ist zu sehen, dass es ca. 2 μs dauert, bis die Spannung am Filter abgeklungen ist. Im umgekehrten Fall, beim Einschalteten, dauert es ca. 12 μs , bis das volle Signal anliegt (vgl. Abbildung 41 bis Abbildung 43).

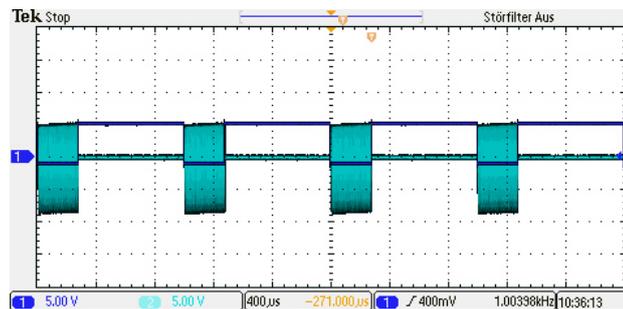


Abbildung 41: Messung mit PWM 30/70

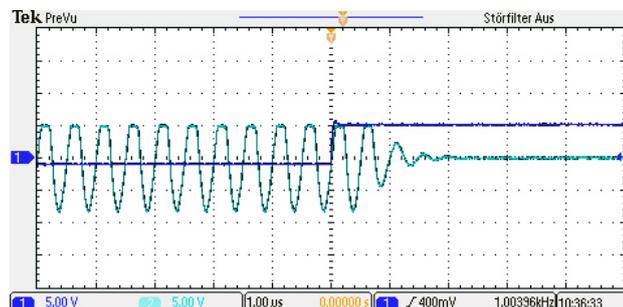


Abbildung 42: Ausschaltverhalten des Senders mit Verzugszeit am Empfänger

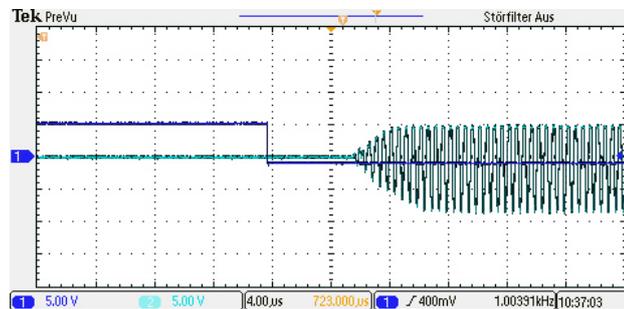


Abbildung 43: Einschaltverhalten und Verzugszeit am Empfänger

Um die Verzögerungszeit zu senken und eine PWM korrekt abbilden zu können, wurde die bestehende Schaltung modifiziert.

Es muss eine entsprechende Welligkeit am Ausgang des Spitzenwertdetektors existieren, um ein mehrmaliges Schalten des nachgeschalteten Komparators zu vermeiden. Zusätzlich musste die Zeitkonstante des Spitzenwertdetektors kleiner als

$$\tau < 5 \% \times 1 \text{ ms} = 50 \mu\text{s}$$

sein. Somit brachte die Reduzierung der Zeitkonstante um

$$\tau = R_8 \times C_7 = 10 \text{ k} \times 1 \text{ nF} = 10 \mu\text{s}$$

den gewünschten Effekt.

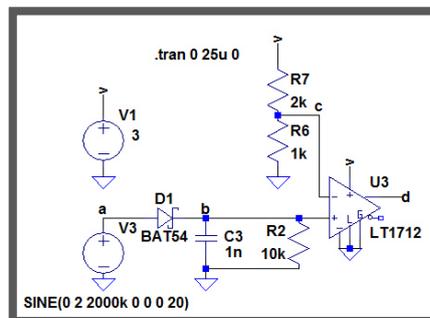


Abbildung 44: Simulation Spitzenwertdetektor

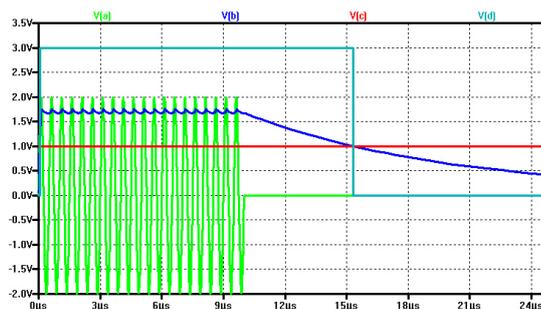


Abbildung 45: Simulationsergebnis des Spitzenwertdetektors.

Die Ausschaltverzögerung hängt von der Schaltschwelle des Komparators ab. Befindet sich der Sender direkt über dem Empfänger, so besitzt der Komparator an dieser Stelle die höchste Ausschaltverzögerung. Somit ist das Signal höher als die Schwelle.

Wenn sich die Sende- und Empfangsspulen mechanisch genau übereinander befinden, ergeben sich die Signalverläufe und Kennwerte gemäß Abbildung 46 bis Abbildung 48.

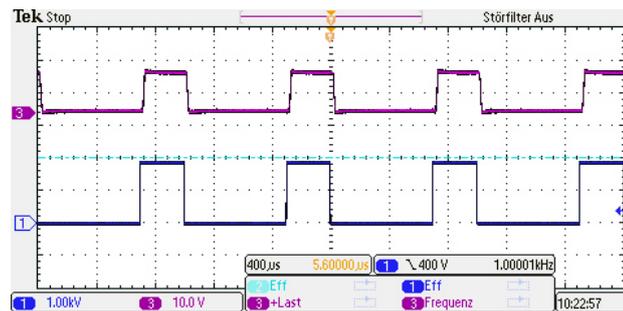


Abbildung 46: Blau – PWM (Auto), Rot – nach dem Komparator OP (IC1A)

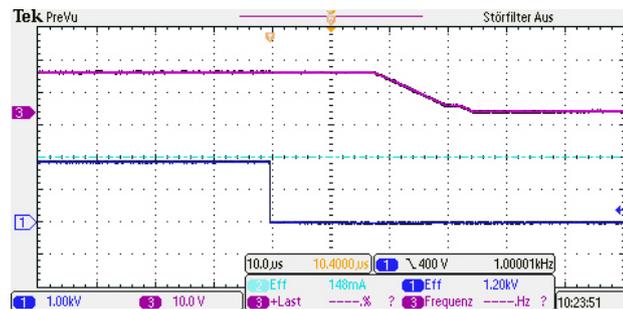


Abbildung 47: Ausschaltverzögerung 20µs + 15µs Flanke

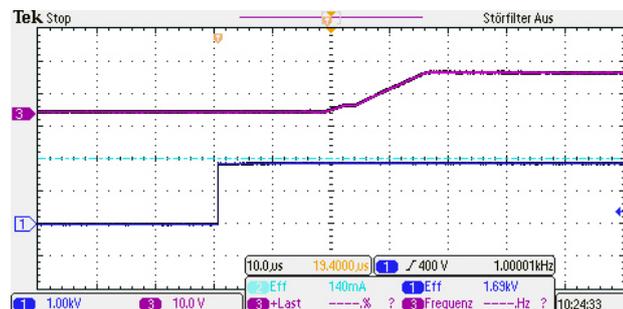


Abbildung 48: Einschaltverzögerung 20µs + 15µs Flanke

Es gibt für den weiteren Entwicklungsprozess viele Möglichkeiten, dieses Signal auszuwerten. In diesem Fall wird mit einem Mikrocontroller gearbeitet (vgl. Abbildung 49). Dazu wurden die Anforderungen an das Kleinsignalverhalten der Schaltung abgeändert.

Zusätzliche Anforderungen:

- Einschaltsignal vom Sender wird mit 1 kHz moduliert, die Einschaltdauer muss zwischen 20% und 30% liegen.
- PWM muss mit einer Genauigkeit von 5 % übertragen werden.
- Liegt die PWM nicht im Arbeitsbereich, so wird abgeschaltet

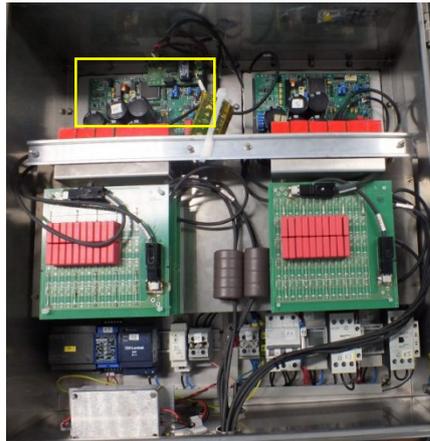


Abbildung 49: Position des Controllers

Über einen Zeitraum von 200 ms wird die High-Zeit des Eingangssignals gemessen. Ist diese größer als 60 ms, was einem Tastverhältnis von 30% entspricht, wird von einer Ladeanforderung des Fahrzeugs ausgegangen und die Leistungsübertragung aktiviert.

Die Schaltschwellen sind so definiert worden, dass der Empfänger ab einem Abstand von 150 mm sicher ausgeschaltet ist. Nachfolgend können diese Schaltschwellen eingesehen werden (vgl. Tabelle 2). Aufgrund der Symmetrie wurde nur der Versatz in y-Richtung betrachtet.

Höhe [mm]	Aus [mm]	Ein [mm]
122	155	150
138	145	140
155	143	139

Tabelle 2: P2PS Schaltschwellen

4 Fahrzeug-Integration der Pickup

Im Vorfeld wurden die Konstruktionsdateien ausgetauscht. Das Hauptaugenmerk wurde bei der Integration auf Verlustleistung gelegt. Die Hauptverluste werden dabei durch die induzierten Wirbelströme des Streufeldes (vgl. Abbildung 50) erzeugt.

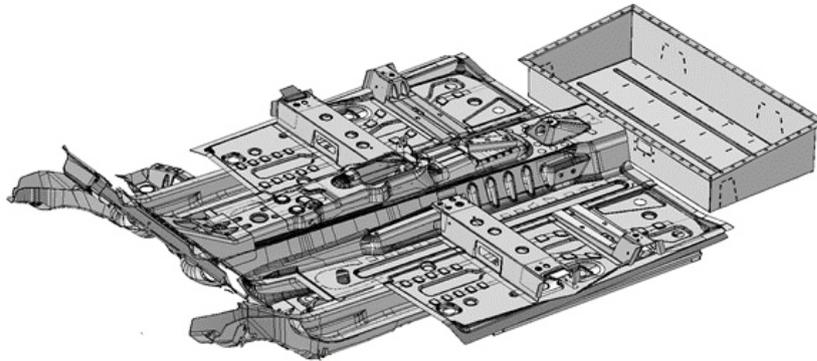


Abbildung 50: Unterboden des KFZ

Um diese Verluste größtmöglich zu vermeiden, ist ein Aluminium-Rückschlussblech über fast die gesamte Breite des Karosseriebodens dimensioniert worden (vgl. Abbildung 51).

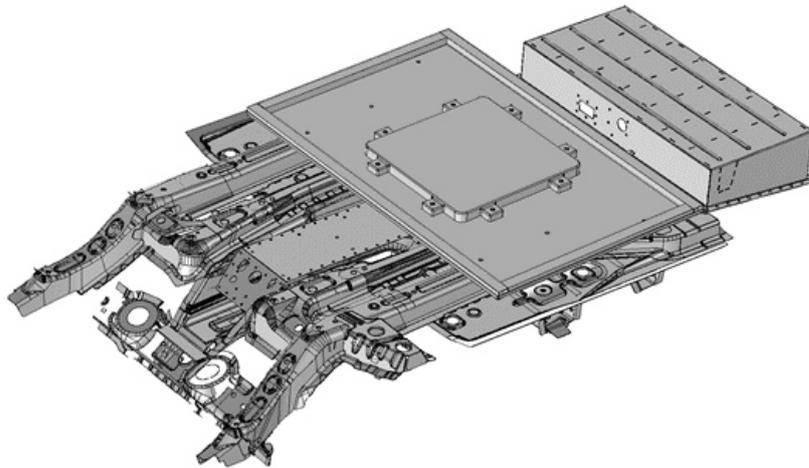
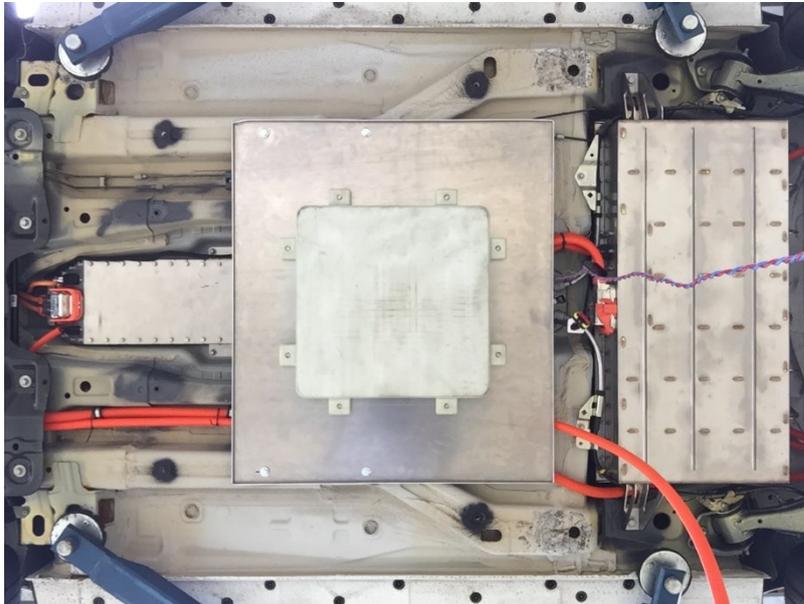
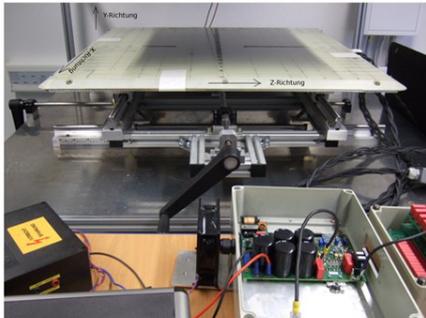


Abbildung 51: Karosserie mit Pick-Up



5 Gefahrenbewertung bzw. Aktivitäten zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs

Sehr früh im Projekt wurde mittels eines 3-achsig verfahrbaren Testaufbaus die Relevanz niederfrequenter Magnetfelder in Ihrer Wirkung auf die in der VDE-Anwendungsregel definierten Prüfkörper überprüft. Exemplarische B-Feld-Charakteristiken wurden vermessen und mit der Simulation verglichen.



- Measurement at 3,3 kW, 140 kHz.
- $B_{max} < 600 \mu T$.

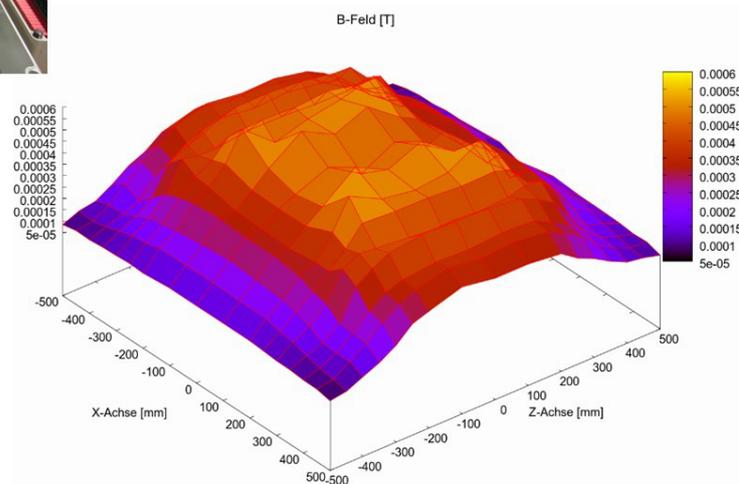


Abbildung 52: Messanordnung zur Ermittlung der Verteilung des magnetischen Flußes im Luftspalt [7]

Anhand der für dieses Projekt angeschafften Magnetfeldmesstechnik wurde die Übereinstimmung zwischen punktuellen Simulationsverfahren (FEM) und dieser räumlich integrierenden Feldmesstechnik verglichen und exemplarische Anordnungen hinsichtlich Ihres EMF-Gefährdungspotenzials geprüft.

Ein sicherer Betrieb ist bei einem Projekt wie InterOP, das derart in der Öffentlichkeit steht, noch wichtiger, als er sonst ohnehin ist. Da in diesem Projekt die Ausstattung von Kraftwagen im und die Bereitstellung einer Infrastruktur für eben diese im Vordergrund steht, wird eine Betrachtung der Gefahren und Risiken und dann folgend ein Ergreifen von entsprechenden Maßnahmen nach ISO 26262 durchgeführt. Im Vordergrund dieses Arbeitspaketes steht also weniger die technische Umsetzung der Maßnahmen zur Realisierung einer ausreichenden Sicherheit als vielmehr das Vorgehen zur Erkennung von Gefahren und Risiken.

Unter Anleitung von auf diesem Gebiet erfahrenen Ingenieuren ist nach ISO 26262 erst eine System- und Schnittstellendefinition vorgenommen worden. Darauf aufbauend wurde eine Gefahrenuntersuchung gemacht. Daran waren auch stets die Entwicklungsingenieure aller Technologielieferanten beteiligt.

Der Prozess ist noch fortzuführen. Es folgen noch Einstufungen nach ASIL und eine Zusammenstellung entsprechender Maßnahmen.

Da das Produkt von einem Endnutzer betrieben werden wird, soll eine Risikoanalyse vorgenommen werden, um Maßnahmen zur Senkung der Risiken für den Nutzer als ausreichend zu qualifizieren.

Man hat sich dafür entschieden, eine Betrachtung der Risiken in Anlehnung an die Norm ISO 26262 durchzuführen. Diese Norm wird typischerweise in der Autoindustrie verwendet. Im Januar des Jahres 2014 fand ein erster Austausch über die identifizierten Risiken durch die Technologielieferanten und die Automobilumrüster statt. Um eine Bewertung der identifizierten Risiken nach eine „ASIL-Einstufung“ abschließen zu können, folgten noch mehrere Web-Konferenzen. Diese sind durch Untersuchungen bereichert worden, die in den einzelnen Häusern der Technologielieferanten erarbeitet wurden. Beispielhaft seien hier erwähnt, Untersuchungen zu der Ausbreitung des magnetischen Feldes über einer Primärplatte, wenn diese unerwarteter Weise eingeschaltet wird, obwohl sich kein Fahrzeug darüber befindet (siehe Abbildung 53).

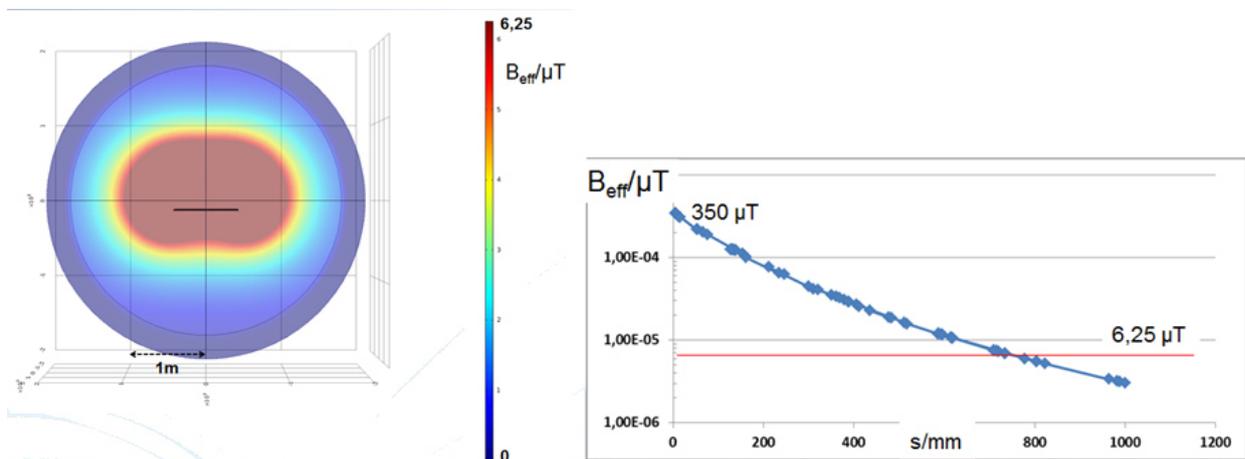


Abbildung 53: Links: Magnetische Flussdichte B um fälschlich eingeschalteter Primärplatte (mittiger schwarzer Strich).
 Rechts: Magnetische Flussdichte entlang einer senkrechten über der Mitte [4].

Die Untersuchung hat gezeigt, dass in einer Höhe von $s > 800\text{mm}$ über der Primärplatte der magnetische Fluss einen Wert von $6,25 \mu\text{T}$ bereits unterschreitet. Eine quantitative Aussage zu magnetischen Größen ist notwendig, um die Auswirkung eines solchen Fehlers der Primärplatte einschätzen zu können. Daraus wird die mindestens notwendige Zuverlässigkeit von Maßnahmen gegen solche Fehler definiert. Es ist bereits ein umfangreiches Dokument zur Risikoanalyse entstanden, in dem die meisten identifizierten Risiken bereits mit ASIL-Einstufungen bewertet worden sind. Nur einige wenige sind noch nicht ganz bewertet, weil dort weitere aufwendige Untersuchungen ausstehen. Dennoch konnte im Jahr 2015 damit begonnen werden, geeignete technische Maßnahmen für die bereits bewerteten Risiken zu erarbeiten. Das gemeinsame Dokument mit den identifizierten und eingestufteten Gefahren befindet sich im Jahresbericht des Projektteilnehmers Siemens AG [5].

6 Anhang

6.1 Verzeichnis der Abbildungen:

Abbildung 1:	unterschiedliche Spulengeometrien.....	4
Abbildung 2:	Verschiedene Spulengeometrien und –größen.....	5
Abbildung 3:	Darstellung zur Diskussion zur Wahl der Baugröße des Pickups (1).	5
Abbildung 4:	Technische Beschreibung eines primären Spulensystems für eine Primärseite als Normungsvorschlag [3].	6
Abbildung 5:	Technische Beschreibung eines Spulensystems für eine Primärseite [2].	6
Abbildung 6:	Simulierte und gemessenen Flussdichte zweier Spulensysteme für Primärseiten. Abszisse: Strecke entlang der Senkrechten in mm.	7
Abbildung 7:	Simulationsmodell mit Andeutung der Prüflast	8
Abbildung 8:	3D-Animation der Bodenplatte mit eingebauten Stützen.....	9
Abbildung 9:	Verformung der Bodenplatte	9
Abbildung 10:	3D-Animation der Bodenplatte mit eingebauten Stützen und Wicklung	10
Abbildung 11:	Magnetischer Fluss über die Platte gemäß Vereinbarung der InterOp-Partner.....	11
Abbildung 12:	Geometrische Abmessungen der Referenzspule.....	11
Abbildung 13:	3D-Animation der von VAHLE gebauten Primärseite.....	12
Abbildung 14:	Flussdichte B (uT) entlang der z-Achse inmitten der Primärspule, Abstand senkrecht über Ferrit.	12
Abbildung 15:	Verschiedene Resonanztopologien als elektrische Ersatzschaltbilder dargestellt.....	14
Abbildung 16:	Matrix betrachteter Resonanztopologien Erläuterungen in (2).	14
Abbildung 17:	Ersatzschaltbild der magnetischen Linse.....	16
Abbildung 18:	Simulationsergebnis der primär bestromten Wicklung	17
Abbildung 19:	Simulationsergebnis der sekundär bestromten Wicklung.....	18
Abbildung 20:	Strom zu Windungszahl in der Auskoppelwicklung.....	18
Abbildung 21:	Prototyp der magnetischen Linse	19
Abbildung 22:	Simulationsergebnis des ersten Versuchs mit magnetischer Linse.....	19
Abbildung 23:	Ersatzschaltbild des Kapazitiven Spannungsteilers	20
Abbildung 24:	Luftspalt 138mm, mittig	20
Abbildung 25:	Luftspalt 150mm, mittig	21
Abbildung 26:	Luftspalt 150mm, 100/0	21
Abbildung 27:	Luftspalt 150mm, 100/100	21
Abbildung 28:	Luftspalt 122mm, mittig	22
Abbildung 29:	Luftspalt 138mm, mittig	22
Abbildung 30:	Luftspalt 155mm, 100/0	22
Abbildung 31:	Luftspalt 150mm, 100/100	22
Abbildung 32:	Dauertest.....	23
Abbildung 33:	Wirkungsgrad der VAHLE Pick-Up unter Einprägung der Leistung durch das Referenzsystem	24
Abbildung 34:	Wirkungsgrad der Technologielieferanten gemessen an Referenzsystem.....	24

Abbildung 35:	Der Ablauf der Kommunikation noch zu Beginn des Jahres 2014 – dargestellt als sogenanntes Activity-Diagramm.....	27
Abbildung 36:	Statemachine erarbeitet im Laufe des Jahres 2014 [6].....	27
Abbildung 37:	Das Telegramm „States-Response“ vom Fahrzeug zur Primärseite [5].	28
Abbildung 38:	Prinzip der Übertragung	29
Abbildung 39:	Ausgangssignal des Operationsverstärkers.....	30
Abbildung 40:	Simulationsbild der Rahmenantenne (links), Mechanischer Aufbau der Rahmenantenne (rechts).....	30
Abbildung 41:	Messung mit PWM 30/70	31
Abbildung 42:	Ausschaltverhalten des Senders mit Verzugszeit am Empfänger	31
Abbildung 43:	Einschaltverhalten und Verzugszeit am Empfänger.....	32
Abbildung 44:	Simulation Spitzenwertdetektor	32
Abbildung 45:	Simulationsergebnis des Spitzenwertdetektors.	32
Abbildung 46:	Blau – PWM (Auto), Rot – nach dem Komparator OP (IC1A)	33
Abbildung 47:	Ausschaltverzögerung 20µs + 15µs Flanke	33
Abbildung 48:	Einschaltverzögerung 20µs + 15µs Flanke	33
Abbildung 49:	Position des Controllers.....	34
Abbildung 50:	Unterboden des KFZ	35
Abbildung 51:	Karosserie mit Pick-Up.....	35
Abbildung 52:	Messanordnung zur Ermittlung der Verteilung des magnetischen Flußes im Luftspalt [7].....	37
Abbildung 53:	Links: Magnetische Flusssdichte B um fälschlich eingeschalteter Primärplatte (mittiger schwarzer Strich). Rechts: Magnetische Flusssdichte entlang einer senkrechten über der Mitte [4].	38

6.2 Verzeichnis der Tabellen:

Tabelle 1:	Materialkennwerte	17
Tabelle 2:	P2PS Schaltschwellen.....	34

6.3 Literaturverzeichnis

1. *gemeinsame Präsentation*. EUREF-Campus Berlin : s.n., 2013. InterOp Gesamttreffen 11.12.2013.
2. *Further Design Approaches of the Standardization: Inductive Charging of Electric Vehicles*. Turki, Dr., Faical und Reker, Ulrich. Nürnberg : s.n., 2012. E|DPC - 2ND INTERNATIONAL ELECTRIC DRIVES PRODUCTION CONFERENCE AND EXHIBITION.
3. *Vortrag zur Interoperabilitätsbeschreibung*. Hoppe, Axel. Stuttgart : Haus der Technik, 2014. Tagung "Kontaktlose Energieübertragung".
4. Häse, Dr., Kerstin - SAG und Kilian, Lennart - SAG.