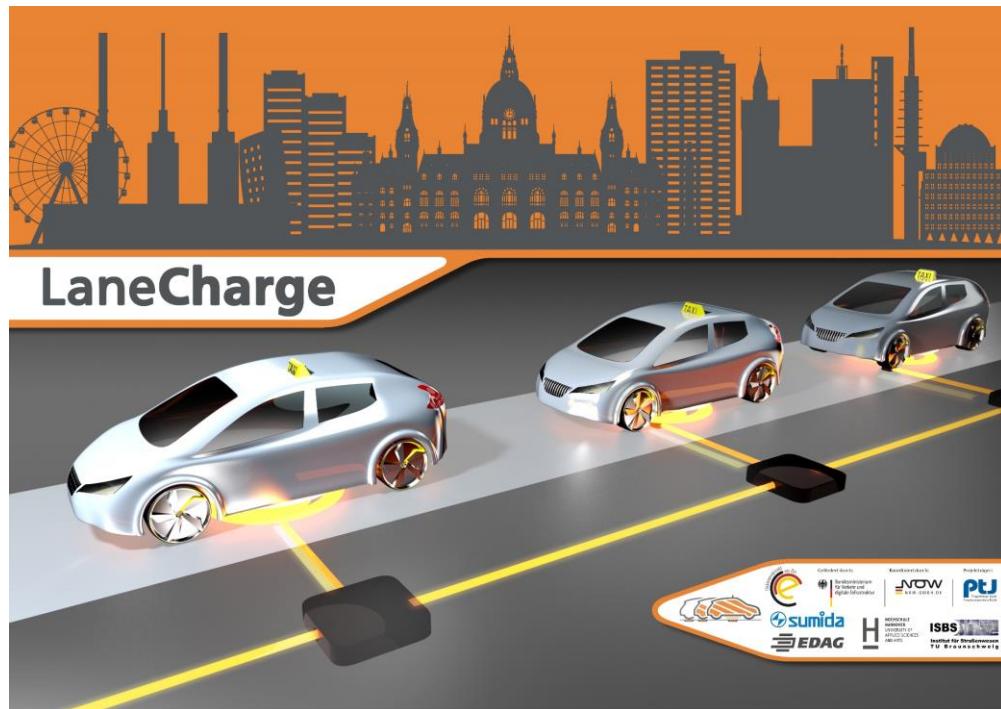


Schlussbericht LaneCharge – Innovationen für eine nachhaltige Mobilität: Semi-dynamische induktive Ladung von E-Fahrzeugen.



Teilvorhaben: Entwicklung eines induktiven Übertragers mit einer asphaltintegrierten Primärspule und fahrzeugseitigen Sekundärspule

Autoren: Philemon Wrensch, Dr. Michael Schmidhuber

Zuschussempfänger:	Förderkennzeichen:
SUMIDA Components & Modules GmbH	03EMF0202D
Vorhabenbezeichnung:	
Verbundprojekt: Innovationen für eine nachhaltige Mobilität: Semi-dynamische induktive Ladung von E-Fahrzeugen – LaneCharge	
Teilvorhaben: Entwicklung eines induktiven Überträgers	
Laufzeit des Vorhabens / Berichtszeitraum:	
01.06.2019 bis 31.12.2023	
Datum:	
07.05.2024	

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) im Rahmen der Förderrichtlinie Elektromobilität gefördert, vom Projektträger PTJ betreut und von der NOW-GmbH koordiniert.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Projektträger:



Der Bericht stellt die Ergebnisse aus dem Teilprojekt vor und nimmt Bezug zum Gesamtprojekt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Autoren und die beteiligten Firmen bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für digitales und Verkehr und für die Betreuung durch den Projektträger Jülich und die NOW-GmbH.



HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS



Assoziierte Partner:

Landeshauptstadt

Hannover



Inhaltsverzeichnis:

I.	Überblick Gesamtvorhaben	9
1.	Aufgabenstellung.....	9
2.	Planung und Ablauf des Teilvorhabens	10
3.	Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn.....	10
4.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	11
II.	Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses: Entwicklung und Test der induktiven Bauelemente	13
1.	AP LC-23-01 Entwicklung der primärseitigen Spulengeometrie	13
1.1.	AP LC-23-01.1 Erstellung eines Lastenhefts und Anforderungsprofils asphaltintegrierte Resonatorspule in Abstimmung mit EDAG & TUBS	13
1.2.	AP LC-23-01.2 Magnetische und elektrische Simulation und Auslegung verschiedener Spulenkonzepte (Zirkular, DD, DS etc.)	17
1.3.	AP LC-23-01.3 Evaluierung und Simulation von geometrischen Abhängigkeiten des induktiven Gesamtübertragersystems.....	27
1.4.	AP LC-23-01.4 Auswahl und Abstimmung eines elektrischen Parameterraums zum Betrieb an der Leistungselektronik (mit EDAG)	32
1.5.	AP LC-23-01.5 Erforschung von thermischen und asphaltrelevanten Integrationsanforderungen (simulativ und prozesstechnisch mit TUBS)	35
1.6.	AP LC-23-01.6 Erforschung einer strassenbautauglichen AVT (Interface) mit EDAG und TUBS	44
1.7.	AP LC-23-01.7 Messung/Prüfung von sicherheitsrelevanten Anforderungen (normativ, gesetzlich) am Primärspulensystem	45
2.	AP LC-23-02: Entwicklung der sekundärseitigen Spulengeometrie	55
2.1.	AP LC-23-02.1 Erstellung eines Lastenhefts und Anforderungsprofils fahrzeugseitige Resonatorspule in Abstimmung mit EDAG.....	55
2.2.	AP LC-23-02.2 Magnetische und elektrische Simulation und Auslegung verschiedener Spulenkonzepte (zirkular, DD, Doppel-S etc.)	57
2.3.	AP LC-23-02.3 Evaluierung und Simulation von geometrischen Schirmungseinflüssen im KFZ-Unterboden	58
2.4.	AP LC-23-02.4 Auswahl und Abstimmung eines elektrischen Parameterraums zum Betrieb im Kfz (mit EDAG)	59
2.5.	AP LC-23-02.5 Erforschung von thermischen und entwärmungstechnischen Integrationsanforderungen (simulativ und prozesstechnisch am Kfz) mit EDAG.....	60
2.6.	AP LC-23-02.6 Erforschung einer automativen AVT (Integration Modulsystem und Gehäuse) mit EDAG	62
2.7.	AP LC-23-02.7 Messung/Prüfung von sicherheitsrelevanten Anforderungen (normative, gesetzlich) am Sekundärspulensystem	63
3.	AP LC-30-03 Aufbau der primärseitigen Spulengeometrie	68
3.1.	AP LC-30-03.1 Auswahl und Beschaffung von Komponenten und Materialien zum Aufbau einer strassenintegrierten Primärspulenlösung	68
3.2.	AP LC-30-03.2 Aufbau und Test (mechanisch und elektrisch/magnetisch von Prototypen (iterativ)).....	69
3.3.	AP LC-30-03.3 Charakterisierung von elektrischen, thermischen und magnetischen Eigenschaften	71

3.4.	AP LC-30-03.4 Evaluierung von verschiedenen Testsystemen im stationären Betrieb	73
3.5.	AP LC-30-03.5 Aufbau einer kaskadierten Anordnung von asphaltintegrierten Primärspulen (mit TUBS und EDAG).....	74
3.6.	AP LC-30-03.6 Evaluierung und Bewertung von asphaltintegrierten Resonatorlösungen für dynamische Ladestrecken	75
3.7.	Wartung und Betreuung der asphaltintegrierten Spulensysteme.....	77
4.	AP LC-30-04 Aufbau der sekundärseitigen Spulengeometrie	77
4.1.	AP LC-30-04.1 Auswahl und Beschaffung von Komponenten und Materialien zum Aufbau neuer Kfz-integrierten Sekundärspulenlösung inkl. Gehäuse	77
4.2.	AP LC-30-04.2 Aufbau und Test (mechanisch und elektrisch/magnetisch) von Prototypen (iterativ).....	78
4.3.	AP LC-30-04.3 Charakterisierung von elektrischen, thermischen und magnetischen Eigenschaften	79
4.4.	AP LC-30-04.4 Evaluierung von verschiedenen Testsystemen im stationären Betrieb (in Abhängigkeit mit Primärsystem).....	80
4.5.	AP LC-30-04.5 Integration von Sekundärspulensystemen in Testfahrzeugen (mech. Integration).....	80
4.6.	AP LC-30-04.6 Wartung und Betreuung der fahrzeuggebundenen Spulensysteme.....	81
III.	Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses	82
IV.	Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	83

Abbildungsverzeichnis:

Abbildung 1: Groundclearance Equivalent (GCE)	17
Abbildung 2: Wickelanordnungen	18
Abbildung 3: Modelle der bodenseitigen Resonatoren für die magnetische Simulation (Zirkular, DD, DS)	18
Abbildung 4: Paarweise 3D-FEM-Simulation der Resonatoren (Zirkular, DS).....	19
Abbildung 5: Magnetische 3D-FEM-Simulation des DS-Systems in JMAG.....	20
Abbildung 6: Flussdichte im Ferritkern des DS-Systems	21
Abbildung 7: Simulationsmodell des DD-Resonators in JMAG	22
Abbildung 8: Messung des DS-Systems und Wärmeverteilung im Ferrit	22
Abbildung 9: Resonanzkreise der Übertragerstrecke.....	24
Abbildung 10: Entwickelte Resonatoren DS V1 und DS V2	26
Abbildung 11: Elektrische Simulation des Systems	27
Abbildung 12: Kopplungsmessung BS Zirkular zu FS DS bei X = 100 mm und Z = 100 mm	28
Abbildung 13: Feldlinienverlauf bei 0/0/150 in der 2D-FEM-Simulation.....	28
Abbildung 14: Feldlinienverlauf bei 0/80/150 in der 2D-FEM-Simulation.....	29
Abbildung 15: Aufbau der zirkularen Resonatoren in der magnetischen Simulation.....	29
Abbildung 16: Induktivitäts- und Kopplungsverlauf bei der Änderung des Abstands zwischen Schirm und Resonator (zirkulares System).....	30
Abbildung 17: Aufbau der DS-Resonatoren in der magnetischen Simulation	30
Abbildung 18: Induktivitäts- und Kopplungsverlauf bei der Änderung des Abstands zwischen Schirm und Resonator.	31
Abbildung 19: Einfluss der Größe des Schirms auf die Kopplung im DS-System	31
Abbildung 20: Kopplungsänderung bei Schirmgrößenänderung im DD-System	32
Abbildung 21: Ersatzschaltbild der Übertragerstrecke	33
Abbildung 22: EI 190 601 11 24 finaler fahrzeugseitiger Resonator	34
Abbildung 23: EI 190 601 11 34 finaler bodenseitiger Resonator.....	34
Abbildung 24: Schichtaufbauten mit Asphaltdecke für Fahrbahnen	36
Abbildung 25: Testspulen für Temperaturtests	36
Abbildung 26: Versuchsaufbau vor (linke Spalte) und nach (rechte Spalte) dem Vergießen mit Bitumen mit Messung der Induktivität und des frequenzabhängigen Widerstands.....	37
Abbildung 27: Halber DS-Aufbau für die Untersuchung des Asphaltierprozesses	38
Abbildung 28: DS-Muster im Asphalt	38
Abbildung 29: Vergleich der Messwerte vor und nach dem Asphaltieren	39
Abbildung 30: Kleinsignalmessung mit und ohne Asphaltmuster im Zwischenraum.....	39
Abbildung 31: DD-Resonator in einer Asphaltsschicht	40
Abbildung 32: Thermographie des Resonators im Betrieb bei EDAG (Quelle: EDAG)	41
Abbildung 33: Primärresonatoren für den Teststand beim Projektpartner HsH	42
Abbildung 34: Vorbereitete Plätze auf der Asphalttragschicht (Quelle: HsH)	43
Abbildung 35: Platzierte Resonatoren (DS, Zirkular), (Quelle: HsH)	43
Abbildung 36: Asphaltdeckschicht nach Abschluss der Asphaltarbeiten (Quelle: HsH)	44
Abbildung 37: Position Hin- und Rückleiter in der Schaltung. Bodenseite.	45
Abbildung 38: Verschlagung des Hin- und Rückleiters.....	46
Abbildung 39: Zuleitungskabel mit Anschlüssen zum Resonator.....	46
Abbildung 40: Prüflinge zur Teilentladungsuntersuchung	47
Abbildung 41: Teilentladungsprüfstand	48

Abbildung 42: Einsetzspannung der Teilentladung	48
Abbildung 43: Zuleitungen zum Austausch Stammestraße 2	49
Abbildung 44: Darstellung des primärseitigen elektrischen Systems	49
Abbildung 45: Aufbau der Leitung zwischen Schaltschrank und asphaltintegriertem Resonator ...	50
Abbildung 46 Übersicht der durchgeführten Prüfungen mit der Basisisolierung 1: Kunststoffrohr .	51
Abbildung 47: Übersicht der durchgeführten Prüfungen mit der Isolation 2: Glasgewebebeschlauch und Kunststoffgewebe.....	51
Abbildung 48: Prüfung des Stahlpanzerrohrs als Erdung	52
Abbildung 49: PFC-Stufe Platine von EDAG mit Ringkerndrosseln (Quelle: EDAG)	53
Abbildung 50: PFC-Induktivität (EI 190 601 11 84).....	53
Abbildung 51: Gekoppelte Variante der PFC-Drossel (EI 190 601 11 83)	53
Abbildung 52: Stromformen Vergleich zwischen gekoppelter und diskreter Aufbauform der PFC- Drosseln (Quelle: EDAG)	54
Abbildung 53: Schaltungsaufbau mit Regelung aus der Simulation von EDAG (Quelle: EDAG)	55
<i>Abbildung 54: Zeichnung und Simulationsmodell zirkular fahrzeugseitig</i>	58
<i>Abbildung 55: Zeichnung und Simulationsmodell Doppel-S fahrzeugseitig</i>	58
Abbildung 56: Größenvergleich der Filterdrossel ES1906011171 und ES19060173	61
Abbildung 57: Erwärmungsbetrachtung ES1906011171 und ES1906011173	61
Abbildung 58: Explosionszeichnung der Filterinduktivität	62
Abbildung 59: Konstruktion des fahrzeugseitigen Resonators mit Gehäuse (links) und ohne Gehäuse (rechts).....	62
Abbildung 60: fahrzeugseitiger Resonator mit Gehäuse und Schirm	63
Abbildung 61: Simulationsmodell des DD zu DS-Systems	64
Abbildung 62: FlussdichteVerteilung in 20 bis 30 mm Abstand zum bodenseitigen Resonator bei Nullversatz (0/0/130) (links) und voll Versatz (100/100/170) (rechts); DD/DS-System	64
Abbildung 63: Maximale mittlere Flussdichte in Abhängigkeit des Abstands zum bodenseitigen Resonator bei Maximalversatz (rot) und Nullversatz (blau)	65
Abbildung 64: FlussdichteVerteilung in 20 bis 30 mm Abstand zum bodenseitigen Resonator bei Nullversatz (0/0/130) (links) und voll Versatz (100/100/170) (rechts)	65
Abbildung 65: Maximale mittlere Flussdichte in Abhängigkeit des Abstands zum bodenseitigen Resonator bei Maximalversatz (rot) und Nullversatz (blau)	66
Abbildung 66: Vergleich der maximalen Flussdichte der verschiedenen Systeme in Abhängigkeit des Abstands zum primären Resonator	66
Abbildung 67: Ringkerndrossel EI1906011199 für die Erkennung des Stromnulldurchgangs.....	67
Abbildung 68: Wechselrichterinduktivität EI1906011195	67
Abbildung 69: Strommessung in Litzen mit und ohne Mittelstrang	68
Abbildung 70: Beispiel einer Litzenspezifikation	68
Abbildung 71: Primärseitige Resonatoren.....	70
Abbildung 72: Betrieb und thermische Untersuchung des DS-Systems inklusive asphaltintegriertem DD-Resonator [Quelle: EDAG]	72
Abbildung 73: Inbetriebnahme des Teststands Stammesstraße (Funktionstest)	73
Abbildung 74: Vorbereitete Muster für den Einbau im Testfeld.....	74
Abbildung 75: Vorbereitete Zuleitungen für den Einbau im Testfeld	74
Abbildung 76: Asphalttragfläche und positionierte Resonatoren am Testfeld (Quelle: HsH)	75
Abbildung 77: Oberflächenansicht, nach dem Abschluss der Baumaßnahme (Quelle: HsH)	75
Abbildung 78: Feldführung DD/DS-System (links) vs. zirkularer Aufbau (rechts)	76
Abbildung 79: Wechsel der Zuleitungen und Messung der Funktion Stammestraße 2	77

Abbildung 80: Resonator zirkular sekundärseitig.....	78
Abbildung 81: Resonator Doppel-S sekundärseitig	78
Abbildung 82: Resonator Doppel-S sekundärseitig V2.....	78
Abbildung 83: Baugruppe zur Anbringung ans Fahrzeug: Resonator im Gehäuse am Schirmblech.	79
Abbildung 84: Auszüge aus dem Datenblatt der Resonanzdrossel EI1906011176.....	79
Abbildung 85: Beispiel eines Messprotokolls.....	80
Abbildung 86: Mechanisch integrierter Resonator am Fahrzeug [EDAG].....	81

Tabellenverzeichnis:

Tabelle 1: Projektpartner	11
Tabelle 2: Gegenüberstellung und Zusammenfassung LCC-LCC-Topologie und Serien-Serien-Topologie	13
Tabelle 3: Übersicht über die induktiven Bauelemente der Übertragerstrecke für Teststand Stammestraße 1	14
Tabelle 4: Lastenheft Resonator Bodenseite	15
Tabelle 5: Lastenheft Resonator Fahrzeugseite	15
Tabelle 6: Lastenheft Filterdrossel	16
Tabelle 7: Zusammenfassung der magnetischen Simulation	19
Tabelle 8: Induktivitätsmatrizen bei minimaler Kopplung (100/100/170) und maximaler Kopplung (0/0/130)	20
Tabelle 9: Kopplungsverhältnisse aus der Simulation	20
Tabelle 10: Simulierte und gemessene Kopplung DD zu DS	22
Tabelle 11: Übersicht der bodenseitigen Resonatoren	23
Tabelle 12: Vergleich der drei Systeme hinsichtlich Schwingkreisgüte (idealisiert)	24
Tabelle 13: Elektrische und geometrische Kenngrößen der überarbeiteten Resonatoren	25
Tabelle 14: Kenngrößen des Gussasphalts (Quelle: TUBS)	35
Tabelle 15: Messergebnisse mit und ohne Asphalt im Zwischenraum (Doppel-S)	40
Tabelle 16: Prüfplan zur Klassifizierung "Basisisolierung" in Anlehnung an EN 60664	50
Tabelle 17: Prüfplan zur Klassifizierung als "Erdung" in Anlehnung an EN 60664	50
Tabelle 18: Übersicht induktive Bauelemente der Bodenseite in LaneCharge	54
Tabelle 19: Lastenheft Resonator Fahrzeugseite	56
Tabelle 20: Lastenheft Filterdrosseln	57
Tabelle 21: Lastenheft Resonator Fahrzeugseite	59
Tabelle 22: Lastenheft Filterdrossel	60
Tabelle 23: Entwickelt und gelieferte induktive Bauteile	71

I. Überblick Gesamtvorhaben

1. Aufgabenstellung

Das Hauptziel des Projekts LaneCharge war die Entwicklung eines induktiven Ladesystems für Elektrofahrzeuge, welches über mehrere, unabhängig ansteuerbare bodenintegrierte Ladepunkte verfügt. Dies erlaubt dem System – im Gegensatz zu den auf dem Markt verfügbaren, stationären Lösungen – die Fahrzeuge quasi-dynamisch zu laden. Das Fahrzeug fährt von Ladepunkt zu Ladepunkt und kann dadurch die verbrauchte Akkuladung der letzten Fahrt zu großen Teilen wieder aufladen oder sogar die Ladung des Akkus erhöhen. Insbesondere für einen Taxistand ist dieses Ladeszenario vorteilhaft. Eine besondere Herausforderung bestand darin, die Ladetechnik direkt in den Asphalt zu integrieren und dadurch im Stadtbild verschwinden zu lassen. Zu Beginn des Projektes LaneCharge bestand deshalb das Ziel, am Hauptbahnhof in Hannover einen Taxistand mit dem im Forschungsprojekt neu entwickelten System auszustatten und den Betrieb zweier Taxis zu untersuchen.

Ein solches Gesamtsystem in dem hier vorgestellten Umfang ist weder auf dem Markt verfügbar noch in dieser Form entwickelt worden. Das gesteckte Ziel von einer kompletten Neuentwicklung hin zu einem innovativen System, dass alle Anforderungen nicht nur technisch, sondern auch normativ erfüllt, erwies sich im Nachhinein als sehr ambitioniert.

Aus dem skizzierten Ziel ergaben sich die folgenden weiterführenden Ziele des Projekts:

- Entwicklung unterschiedlicher Teilsysteme der notwendigen Leistungselektronik (PFC-Stufe, Gleichrichter, Wechselrichter, Übertragerstrecke, Gleichrichter (im Kfz), Wechselrichter (im Kfz))
- Entwicklung der Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladeplatz
- Leistungsregelung der Ladestelle
- Einbringung der Ladestelle in den Asphalt
- Projektierung der Anschlussinfrastruktur der Ladestrecke
- Entwicklung einer Positionierungshilfe

Insbesondere die Integration der bodenseitigen Resonatorspule direkt in den Asphalt erfüllte eine große Forschungshöhe und ist nicht Stand der Technik. Dies umfasst sowohl die straßenbauseitige Integration hinsichtlich Asphaltbauweise als auch den mechanischen Aufbau der primärseitigen Spule selbst. Ein weiterer Entwicklungsschwerpunkt lag im Positionierungssystem, das auch ohne optische Abhebung der Ladepunkte funktionsfähig ist. Dadurch wird es ermöglicht, den Ladepunkt gänzlich aus dem Sichtfeld verschwinden zu lassen.

Die aufgeführten einzelnen Entwicklungsschritte in den Teilvorhaben mündeten zunächst im Aufbau eines Testfelds, mit dem die Entwicklung des Gesamtsystems erprobt wurde. Die daraus hervorgehenden Erkenntnisse sollten beim Aufbau des Anwendungsfelds am Hauptbahnhof Hannover Berücksichtigung finden. Das entwickelte Gesamtsystem sollte auf einem der dort befindlichen Taxi-Stände installiert werden und die wirtschaftliche Evaluation aus Sicht von Taxi- und Energiewirtschaft vorgenommen werden. Durch die hohen Anforderungen an Fahrzeuge mit Personenbeförderung im öffentlichen Raum (normativ, EMV, TÜV, etc.) konnten die notwendigen Genehmigungen zur Erstellung und Betrieb des Taxi-Standes am Hauptbahnhof nicht innerhalb des Projektzeitraums erreicht werden. Die technische Reife des Systems LaneCharge wurde durch den Betrieb des Teststandes in der Stammstraße 2 mit zwölf Ladepunkten an der Hochschule Hannover nachgewiesen und dargestellt.

2. Planung und Ablauf des Teilvorhabens

Das Gesamtprojekt startete in der zweiten Hälfte des Jahres 2019. Die sehr ambitionierten Ziele, zusammen mit Auswirkungen der Lockdowns der COVID-19-Pandemie und Engpässen bei der Verfügbarkeit von Halbleitertechnik führten im Laufe des Projekts zu Verschiebungen im Zeitplan. Alle Projektpartner arbeiteten daran, diese Verschiebungen aufzuarbeiten. Lange Zeit konnten die ursprünglichen Ziele durch zusätzliches zeitliches und finanzielles Engagement der Projektpartner im Blick behalten werden. Im Laufe des Projekts zeichnete sich schließlich ab, dass das Erreichen eines Teststandes im öffentlichen Raum mit Einbindung von Passanten als Fahrgäste an verschiedenen Normungs- und Sicherheitsregelungen scheitert. Insbesondere technische Abnahmen hinsichtlich der EMV erwiesen sich als nicht mehr im Projektzeitraum umsetzbar. Durch die kostenneutrale Verlängerung des Projektzeitraums bis Ende 2023 konnte der Teststand an der Hochschule Hannover (Stammestraße 2) erfolgreich in Betrieb genommen werden. Zwölf Ladepunkte mit einem vollständig umgerüsteten Fahrzeug und Assistenz bei der Spurführung konnten den technischen Erfolg des Projekts darstellen. Auch wenn das Gesamtvorhaben nicht vollumfänglich durchgeführt wurde, wurde damit das Teilvorhaben „**Entwicklung eines induktiven Übertragers mit einer asphaltintegrierten Primärsple und fahrzeugseitiger Sekundärspule**“ vollumfänglich und erfolgreich abgeschlossen. Für den Betrieb im öffentlichen Raum war lediglich eine Kopie des in Betrieb genommenen Teststandes vorgesehen.

3. Wissenschaftlicher und technischer Stand bei Projektbeginn

Zur Zeit der Projektfindung und Einreichung von LaneCharge existierten bereits konduktive Ladetechnologien für ein Leistungsspektrum bis 22 kW bei Wechselstrom und bis zu 50 kW bei Gleichstrom. Dieser technische Stand ist inzwischen deutlich überholt. E-Fahrzeuge sind inzwischen dazu in der Lage, Ladeleistungen von bis zu 200 kW zu ermöglichen. Im Bereich des konduktiven Ladens mit Gleichstromtechnik werden diese hohen Ladeleistungen erreicht.

Induktive Ladesysteme

Die induktive Leistungsübertragung war zu Projektbeginn in vielen Bereichen bereits erforscht, hatte aber keinen Einzug in die Ladetechnik der Serien Automobile gefunden.

Im größeren Leistungsbereich wurden bereits Systeme entwickelt und betrieben, wie z. B. die induktive Ladetechnologie IPT® Charge von der Firma Conductix-Wampfler. Mit dieser Technologie werden seit 2002 in Turin Elektrobusse an bestimmten Haltestellen mit einer Leistung von 30 kW bis 60 kW nachgeladen. Auch während der Projektlaufzeit von LaneCharge ist die induktive Ladetechnik nicht zum Standard neuer Automobile geworden. Als Hauptgründe werden fehlende Normen und Sicherheitsstandards angeführt. Die Gesamtwirkungsgrade induktiver Ladesysteme von ca. 90 % zu Projektbeginn bieten noch Verbesserungspotential. Der notwendige Normungsprozess wird vor allem in der SAE J2954 vorangetrieben. Zu Projektbeginn konnte diese Norm nur bedingt auf das System LaneCharge angewendet werden. Unter anderem ist der Anwendungsfall einer primärseitigen Spulenanordnung unter der Asphaltdecke explizit nicht abgedeckt. Während des Projekts wurde die SAE zweimalig erneuert und befindet sich weiter in Bearbeitung. Inzwischen wird darauf hingewiesen, dass die

Anwendung mit bodenintegrierten Spulen in der Diskussion ist. Tatsächlich auf das Forschungsprojekt anwendbar ist die aktuelle Fassung SAE J2954_202208 jedoch nicht. Das Projekt LaneCharge ist somit auch nach Ablauf der Projektlaufzeit innovativ gegenüber dem Stand der Technik. Neben der Integration in den Asphalt und den damit verbundenen Potentialen von Akzeptanz bis Sicherheit, ist an dieser Stelle die Leistungsregelung auf Fahrzeugeite zu nennen. Diese Art der Systemstruktur ist ein großer Schritt in Richtung dynamisches Laden.

4. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts wurde intensiv mit den folgenden Verbundpartnern zusammengearbeitet:

Tabelle 1: Projektpartner

Firma	Straße	PLZ	Ort	Webseite	Ansprechpartner
Hochschule Hannover	Ricklinger Stadtweg 120	30459	Hannover	www.hs-hannover.de	Stephen Hölzel
EDAG Engineering GmbH	Reesbergstraße 1	36039	Fulda	www.edag.com	Jörg Hölig
Technische Universität Braunschweig	Beethovenstraße 51 b	38106	Braunschweig	www.tu-bs.de	Frederik Kollmus
SUMIDA Components & Modules GmbH	Dr. Hans-Vogt-Platz 1	94130	Obernzell	www.sumida.com	Dr. Michael Schmidhuber

Projektstruktur und Teilaufgaben des Konsortiums

Das Hauptziel im Projekt LaneCharge bestand darin, ein induktives Ladesystem zu entwickeln, das sich durch Integration in den Asphalt optimal in das Straßenbild einfügt bzw. nicht mehr sichtbar ist. Dabei sollten alle benötigten Teilsysteme neu entwickelt und am Ende in einem Langzeittest im öffentlichen Raum an einem Taxistand betrieben werden.

Um die ambitionierten Ziele zu erreichen wurden die verschiedenen Teilbereiche unter den Projektpartnern wie folgt aufgeteilt:

Nach einer gemeinsamen Konzept- und Spezifikationsphase erforschte SUMIDA zunächst magnetische und elektrische Randbedingungen für Resonatoren einer Übertragerstrecke, die zum Teil im Asphalt platziert wird. Anschließend wurden verschiedene induktive Baulemente entwickelt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Hauptaugenmerk lag dabei auf den Resonatoren, zusätzlich wurden mehr als 30 Versionsstände unterschiedlichster induktiver Bauelemente untersucht und bereitgestellt.

Der Projektpartner EDAG entwickelte die elektrische Umgebung und die Schaltungstechnik vom Netzanschluss bis ins Fahrzeug. Dabei wurde eine neuartige Regelung gewählt, die die Leistungsanpassung nicht straßenseitig, sondern fahrzeugseitig ermöglicht. Dadurch kann die notwendige Kommunikation zwischen Ladestation und Fahrzeug minimiert werden. Diese neue Art des Schaltungsaufbaus stellt einen großen Schritt in Richtung dynamisches Laden dar.

Neben der Projektkoordinierung entwickelte der Projektpartner Hochschule Hannover die Software und das Positioniersystem von LaneCharge.

Die Technische Universität Braunschweig untersuchte Möglichkeiten, bestehende Asphalte mit Hilfe von Additiven hin zu geringeren Verarbeitungstemperaturen zu entwickeln, um die Belastung der direkt eingebrachten induktiven Bauteile zu mindern.

Durch regelmäßige Arbeitstreffen und Telefonkonferenzen wurde sichergestellt, dass stets eine auf das Gesamtziel fokussierte und abgestimmte Entwicklung in den einzelnen Arbeitspaketen stattfand. Den Einschränkungen durch die Pandemie wurde durch digitale Treffen begegnet. Die Auswirkungen auf das Projekt waren spürbar, konnten aber minimiert werden.

In den Konsortialtreffen (zum Teil digital) wurden die bisher erreichten Ergebnisse im gesamten Projektkontext beurteilt und mit den Planvorgaben verglichen. Meilensteine wurden evaluiert und Korrekturmaßnahmen in Abstimmung mit dem Projekträger bei Bedarf eingeleitet.

Inhaltlich wurden die Arbeiten folgendermaßen im Konsortium aufgeteilt:

- Hochschule Hannover:
 - Entwicklung eines Ladereglers für die Leistungselektronik
 - Aufbau eines Kommunikationssystems
 - Aufbau (und Inbetriebnahme) einer Teststrecke an der HSH
 - Entwicklung von Fahrerassistenzsystemen
 - Demonstration an einem Taxi-Stand am Hauptbahnhof Hannover
- EDAG:
 - Entwicklung der Leistungselektronik
 - Zusammenführung und Systemoptimierung
 - Optimierung der Baugruppen
 - Fahrzeugintegration
- TU Braunschweig:
 - Evaluation der optimalen Integration der primärseitigen Spule unter Berücksichtigung der Straßenkonstruktion aus Asphalt
- SUMIDA:
 - Entwicklung eines induktiven Resonatorspulensystems zum induktiven statischen bzw. quasi-dynamischen Laden mit 3,7 kW Leistung
 - Untersuchung verschiedener Resonatorgeometrien (Zirkular, DD, DS) im Gesamtsystem.
 - Integration des primärseitigen Resonators direkt in die Asphaltdecke und Untersuchung der damit verbundenen Herausforderungen (thermisch, mechanisch, magnetisch)
 - Entwicklung und Bereitstellung induktiver Bauelemente im Gesamtsystem LaneCharge (vom Netzanschluss bis ins Fahrzeug)

II. Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses: Entwicklung und Test der induktiven Bauelemente

SUMIDA hatte als Hersteller induktiver Bauelemente die Aufgabe der Entwicklung aller notwendigen Induktivitäten im Projekt LaneCharge. Im Zentrum der Entwicklung stand dabei die Übertrag'erstrecke, insbesondere die Resonatoren. Die Arbeitspakete gliedern die bearbeiteten Themen und werden im Folgenden detailliert dargestellt.

1. AP LC-23-01 Entwicklung der primärseitigen Spulengeometrie

Das Arbeitspaket LC-23-01 umfasst sieben Teilarbeitspakete. Ziel war die Entwicklung des primärseitigen Resonators der Übertragerstrecke. Dabei wurden sowohl magnetische als auch elektrische Simulationen durchgeführt. Da die Untersuchung und Entwicklung der Übertrag'erstrecke nur mit primärseitigem und sekundärseitigem Resonatorpaar möglich ist, ist das Arbeitspaket eng mit dem Arbeitspaket LC-23-02 „Entwicklung der sekundärseitigen Spulen-geometrie“ verknüpft.

1.1. AP LC-23-01.1 Erstellung eines Lastenhefts und Anforderungsprofils asphaltintegrierte Resonatorspule in Abstimmung mit EDAG & TUBS

- *Schaltungstopologie*
- *Elektrische Anforderungen an die induktiven Bauteile*
- *Lastenhefte der induktiven Bauteile*

Schaltungstopologie

Zur Auswahl der Topologie wurde eine reine Serien-Serien-Kompensation mit einer LCC-LCC-Kompensationsschaltung verglichen.

Tabelle 2: Gegenüberstellung und Zusammenfassung LCC-LCC-Topologie und Serien-Serien-Topologie

	LCC-LCC-Topologie	Serien-Serien-Kompensation
Impedanz	$Z = \frac{P_{out} * \omega_0^2 * L_{f1}^2 * L_{f2}^2}{k^2 * L_1 * L_2 * U_{out}^2}$	$Z = \frac{P_{out} * \omega_0^2 * k^2 * L_1 * L_2}{U_{out}^2}$
Leistung	$P_{in} = \frac{U_{in}^2 * U_{out}^2 * k^2 * L_1 * L_2}{P_{out} * \omega_0^2 * L_{f1}^2 * L_{f2}^2}$	$P_{in} = \frac{U_{in}^2 * U_{out}^2}{P_{out} * \omega_0^2 * k^2 * L_1 * L_2}$
P_{min}	Bei k_{min}	Bei k_{max}
L_1, L_2	Möglichst groß ($> 180 \mu\text{H}$)	Nicht zu groß
L_{f1}, L_{f2}	Nicht zu groß und $L_{f2} \sim L$	-
P_v von $L_{f1}+L_{f2}$ ($48 \mu\text{H}/14 \text{ A}/85 \text{ kHz}$)	$2 \times 10 \text{ W}$ $-0,55 \% \eta @ P_{in} = 3600 \text{ W}$	-

Die LCC-LCC-Topologie bietet durch die zusätzlichen Bauteile etwas mehr Möglichkeiten auf die Schaltung Einfluss zu nehmen. Der Wirkungsgradverlust durch die zusätzlichen Bauteile kann durch optimierte Induktivitäten gering gehalten werden. Die Kopplung wirkt in beiden Topologien entgegengesetzt auf die Impedanz und die übertragene Leistung. Da der Projekt-partner EDAG mit der LCC-LCC-Topologie Vorteile bzgl. der Regelung vermutete und effizientes Schalten im Stromnulldurchgang ermöglicht wird, wurde die LCC-LCC-Topologie untersucht und aufgebaut. Die Primär- und Sekundärseite wurden in Bezug auf die elektrischen Bauteilwerte identisch aufgebaut.

Elektrische Anforderungen an die induktiven Bauteile

Der erste Teststand an der Hochschule Hannover (Stammestraße 1) bestand aus vier Ladepunkten mit unterschiedlichen Resonatoren. Diese Resonatoren sollten die gängigen geometrischen Aufbauarten (Zirkular, DD, DS) darstellen. Es wurden Muster für Untersuchungen bereitgestellt. Die folgende Tabelle enthält eine Auflistung der induktiven Bauelemente für die Übertragerstrecke (primärseitiger und sekundärseitiger Resonator, Eingangs- und Ausgangs-induktivität).

Tabelle 3: Übersicht über die induktiven Bauelemente der Übertragerstrecke für Teststand Stammestraße 1

Bezeichnung	Beschreibung	Nummer	Anzahl pro Aufbau
L_{BS}	Resonator Bodenseite Aufbauart 1	EI 190 601 11 1X	1
L_{BS}	Resonator Bodenseite Aufbauart 2	EI 190 601 11 2X	1
L_{BS}	Resonator Bodenseite Aufbauart 3	EI 190 601 11 3X	1
L_{BS}	Resonator Bodenseite Aufbauart 4	EI 190 601 11 4X	1
L_{FS}	Resonator Fahrzeugeite	EI 190 601 11 5X	1
L_f	Filterinduktivität	EI 190 601 11 7	2

Lastenheft der Bauteile

Tabelle 4 und Tabelle 5 fassen die elektrischen Anforderungen an die induktiven Bauteile zusammen. Die Werte wurden einer elektrischen Simulation des Projektpartners EDAG entnommen. Dabei wurde die Kopplung auf 13 % eingestellt. Dies stellt den minimalen Kopplungswert dar, der mit den Resonatoren im festgelegten maximalen Versatzpunkt zu erwarten war.

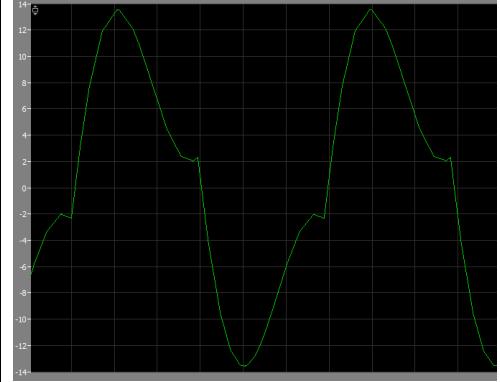
Tabelle 4: Lastenheft Resonator Bodenseite

Resonator Bodenseite L_{BS} (EI 190 601 11 11 bis EI 190 601 11 41)		
Bauteilwert	L ₁	> 180 µH
Maximale Spitzenspannung (peak-to-peak)	U _{pp,max}	4,8 kV
Maximale Effektivspannung	U _{RMS,max}	1,6 kV
Maximaler Spitzenstrom (peak-to-peak)	I _{pp,max}	48 A
Maximaler Effektivstrom	I _{RMS,max}	16,8 A
Strom und Spannungsform	Annähernd ideale Sinusform	

Tabelle 5: Lastenheft Resonator Fahrzeugseite

Resonator Fahrzeugseite L_{FS} (EI 190 601 11 51)		
Bauteilwert	L ₂	> 180 µH
Maximale Spitzenspannung (peak-to-peak)	U _{pp,max}	4,8 kV
Maximale Effektivspannung	U _{RMS,max}	1,6 kV
Maximaler Spitzenstrom (peak-to-peak)	I _{pp,max}	48 A
Maximaler Effektivstrom	I _{RMS,max}	16,8 A
Strom und Spannungsform	Annähernd ideale Sinusform	

Tabelle 6: Lastenheft Filterdrossel

Resonator Bodenseite L_f (EI 190 601 11 71)		
Bauteilwert	L_f	ca. 42 μH
Maximale Spitzenspannung (peak-to-peak)	$U_{pp,\max}$	1,6 kV
Maximaler Spitzenstrom (peak-to-peak)	$I_{pp,\max}$	32 A
Maximaler Effektivstrom	$I_{RMS,\max}$	~11,5 A
Stromform		
Spannungsform		

Zusätzlich zu den bauteilspezifischen Anforderungen ergaben sich allgemeine Anforderungen:

Die Kopplung zwischen bodenseitigem und fahrzeugseitigem Resonator sollte möglichst groß und die Differenz zwischen minimaler und maximaler Kopplung möglichst klein sein. Die Resonatoren – insbesondere der fahrzeugseitige Resonator – sollten möglichst wenig Platz beanspruchen.

Es wurden vier Primärspulen entwickelt, untersucht und miteinander verglichen. Alle sollten mit dem gleichen sekundärseitigen Resonator arbeiten. Die Möglichkeit, verschiedene geometrisch differierende Systeme zu koppeln, wird im Folgenden als Interoperabilität bezeichnet. Die Interoperabilität sollte insofern gegeben sein, dass keine Veränderungen an der Leistungselektronik nötig sind, um Leistung zu übertragen. Die Induktivität der Filterdrossel musste an die Induktivität der Resonatoren angepasst werden, um den resonanten Charakter der LCC-LCC-Topologie zu ermöglichen.

1.2. AP LC-23-01.2 Magnetische und elektrische Simulation und Auslegung verschiedener Spulenkonzepte (Zirkular, DD, DS etc.)

- Ermittlung der aufbaubedingten Randbedingungen für die Übertragerstrecke
- Betrachtung und Auslegung der Übertrager in der magnetischen Simulation
- Wirkungsgradunterschiede der Systeme (Zirkular, DD/DS und DS/DS) und Güte
- Optimierung der DD- und DS-Resonatoren (V1 zu V2)

Im Folgenden sind die Arbeiten des Arbeitspakets AP LC-23-01.2 dargestellt. Neben der Ermittlung von Randbedingungen wurden dabei mit Hilfe von elektrischen und magnetischen Simulationen verschiedene Resonatoren aufgebaut und weiterentwickelt. Dieser Prozess begleitete das gesamte Projekt und wurde auch in anderen Arbeitspaketen bearbeitet.

Ermittlung der Aufbau bedingten Randbedingungen für die Übertragerstrecke

Der Abstand zwischen primärseitigem und sekundärseitigem Resonator wurde analog zur SAE J2954 definiert und als „Groundclearance Equivalent (GCE)“ bezeichnet.

Dieser wird mit den gegebenen Randbedingungen anhand Abbildung 1 berechnet.

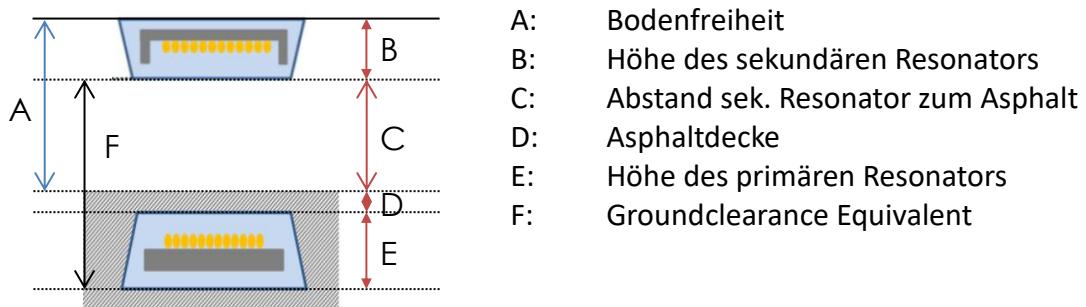


Abbildung 1: Groundclearance Equivalent (GCE)

Für die Simulation wurde der GCE mit 191 mm angenommen. Mit dem ermittelten GCE wurden in der Simulationsumgebung JMAG erste Untersuchungen vorgenommen. Insbesondere die Kopplungswerte und die Induktivität der Resonatoren über den Versatzbereich wurden ermittelt.

Betrachtung und Auslegung der Übertrager in der magnetischen Simulation

Für die magnetische Simulation wurden drei verschiedene Resonatoren modelliert. Es wurden die Aufbauformen „Zirkular“, „Doppel-D“ (DD) und „Doppel-S“ (DS) verglichen. Die Bezeichnungen stehen für die Wickelanordnung.

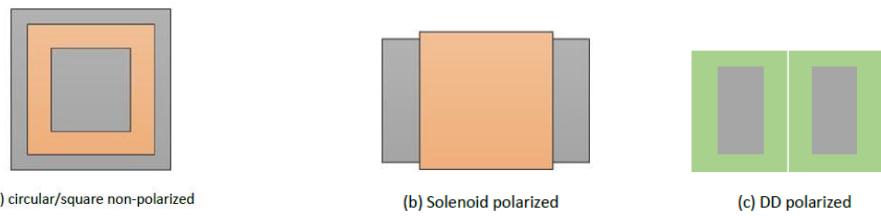
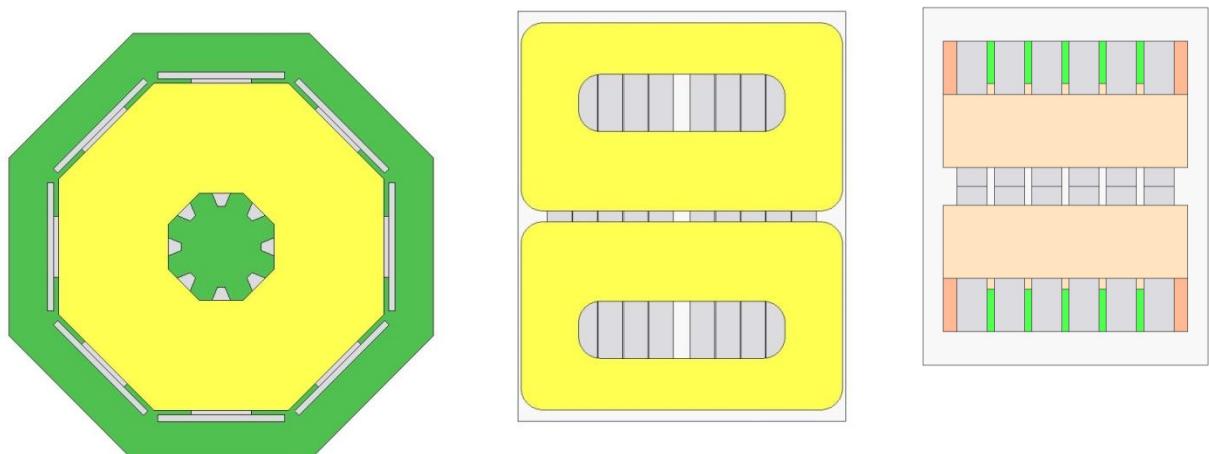
**Abbildung 2: Wickelanordnungen¹**

Abbildung 2 zeigt schematisch die drei verschiedenen Wickelanordnungen. „Zirkular“ steht für eine kreisförmige Wickelanordnung. Beim Betrieb wird ein zylinderförmiges Magnetfeld ausgebildet. Solenoid bezeichnet eine Wickelanordnung, die einen Ferritkern umschließt. Im vorliegenden Fall werden zwei Wicklungen um einen gemeinsamen Kern gelegt. Daraus entsteht die Bezeichnung „Doppel-D“ (DD) bzw. „Doppel-S“ (DS). Im Betrieb entsteht ein gerichtetes Feld mit einer Aus- und einer Eintrittsfläche. Beim Doppel-D Aufbau liegen zwei Wicklungen auf einem gemeinsamen Ferritkern. Jede der Beiden Wicklungen verläuft in einem Rechteck oder beschreibt von oben betrachtet ein „D“. Entsprechend ergibt sich die Bezeichnung „Doppel-D“.

**Abbildung 3: Modelle der bodenseitigen Resonatoren für die magnetische Simulation (Zirkular, DD, DS)**

Aufgrund der unterschiedlichen Feldführung der Systeme Zirkular und DD/DS, wurden zwei sekundärseitige Resonatoren entworfen. Die zirkulare Variante für den zirkularen bodenseitigen Resonator und eine DS-Variante für die Systeme DD und DS.

¹ SAE J2954. Oktober 2020. DOI: 10.4271/J2954_202010

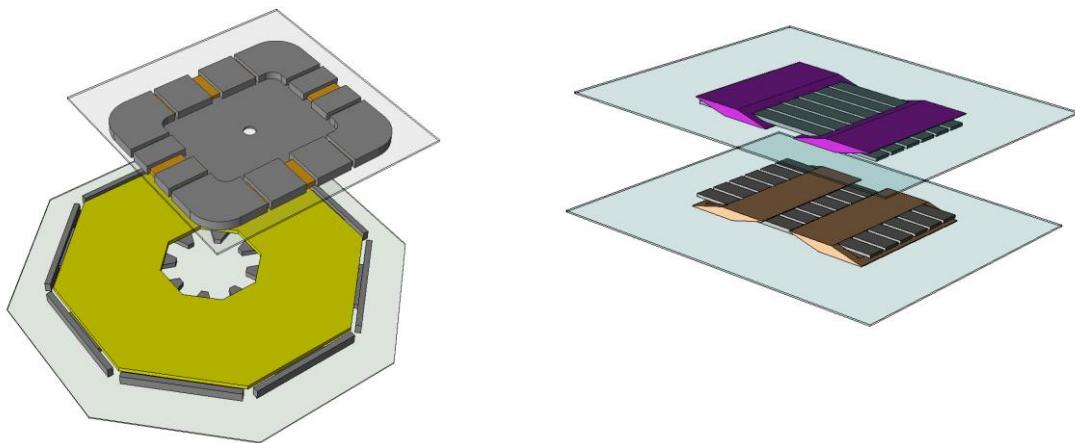


Abbildung 4: Paarweise 3D-FEM-Simulation der Resonatoren (Zirkular, DS)

Für die Auslegung der Resonatoren sind insbesondere die Kopplungsverhältnisse über dem Versatzbereich entscheidend. Abbildung 4 zeigt den Aufbau der Systeme Zirkular und DS in der FEM-Simulationsumgebung JMAG. Im Sinne der Untersuchung der Interoperabilität, wurden auch die Kombinationen aus Zirkular und DS bzw. Zirkular und DD simuliert.

Tabelle 7: Zusammenfassung der magnetischen Simulation

Resonatoren Flächen	Maximale Kopplung	Versatz
Zirkular – Zirkular 1997 cm^2 1084 cm^2	14,8 %	0/0/191
DD – Zirkular 1854 cm^2 1084 cm^2	13,7 %	0/149/191
DS – Zirkular 1395 cm^2 1084 cm^2	9,4 %	0/180/191
Zirkular – DS 1997 cm^2 1395 cm^2	11,6 %	0/153/191
DD – DS 1854 cm^2 1395 cm^2	17,2 %	0/0/191
DS – DS 1395 cm^2 1395 cm^2	16,9 %	0/0/191

Systeme mit unterschiedlicher Feldführung (Zirkular vs. DD und DS) können nur bedingt gekoppelt werden. Es ist dafür eine Versatzstellung notwendig. Genauere Untersuchungen zu den geometrischen Abhängigkeiten werden im Arbeitspaket LC-23-01.3 dargestellt. Die Simulation gezeigt, dass die minimalen Kopplungswerte im Bereich von 10 % liegen und dass bei entsprechender Windungszahl Induktivitätswerte oberhalb von $> 180 \mu\text{H}$ Resonatorinduktivität erreicht werden können.

Beschreibung der magnetischen Simulation eines DS-Systems

Im Folgenden wird die magnetische Simulation für das DS-System näher beschrieben. Analog wurden die Resonatoren in DD- und Zirkularaufbau untersucht. Da jeder Resonator zwei elektrisch parallele Wicklungen aufweist handelt es sich magnetisch um ein Vier-Spulen-System. Aus der magnetischen Simulation kann die Induktivitätsmatrix bestimmt werden. Entsprechend der Anzahl der Wicklungen ergibt sich eine symmetrische 4x4-Matrix. Die Induktivitätsmatrix liefert neben den Hauptinduktivitäten die Kopplungsverhältnisse zwischen den Wicklungen.

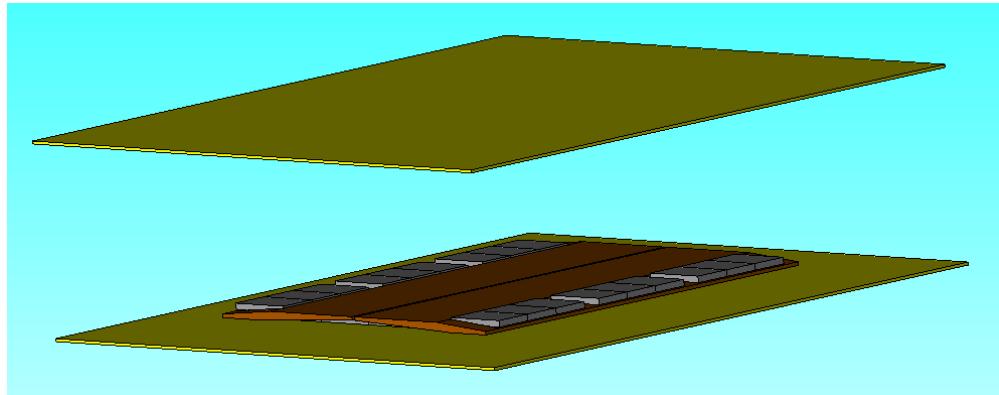


Abbildung 5: Magnetische 3D-FEM-Simulation des DS-Systems in JMAG

Tabelle 8: Induktivitätsmatrizen bei minimaler Kopplung (100/100/170) und maximaler Kopplung (0/0/130)

100/100/170	W1	W2	W3	W4	0/0/130	W1	W2	W3	W4
W1	227	93	-23	-10	W1	238	102	-62	-48
W2	93	230	-34	-23	W2	102	238	-48	-62
W3	-23	-34	231	93	W3	-62	-48	239	102
W4	-10	-23	93	228	W4	-48	-62	102	239

Je nach Versatz zwischen boden- und fahrzeugseitigem Resonator ergeben sich unterschiedliche Kopplungsverhältnisse. Tabelle 8 zeigt die Induktivitätsmatrizen bei minimalem Versatz und somit maximaler Kopplung (0/0/130) sowie maximalem Versatz und somit minimaler Kopplung (100/100/170). Aus den Induktivitätsmatrizen können die jeweiligen Kopplungsverhältnisse bestimmt werden. Die dargestellten Induktivitäten wurden in Mikrohenry angegeben.

Tabelle 9: Kopplungsverhältnisse aus der Simulation

	k12	k13	k14	k23	k24	k34	k12/34
0/0/130	0,43	-0,26	-0,20	-0,20	-0,26	0,43	-0,33
100/100/170	0,41	-0,10	-0,04	-0,15	-0,10	0,41	-0,14

Es ergeben sich für die Parallelschaltung der Wicklungen Eins und Zwei (Bodenseite) sowie Drei und Vier (Fahrzeugseite) die Kopplung von 33 % bzw. 14 % (rot markiert).

Flussdichthebetrachtung und erste Verlustabschätzung

Mit Hilfe der magnetischen 3D-FEM-Simulation kann die Flussdichte im Ferritkern der Resonatoren betrachtet werden. Sie ist entscheidend für die Verlustentwicklung im Kern.

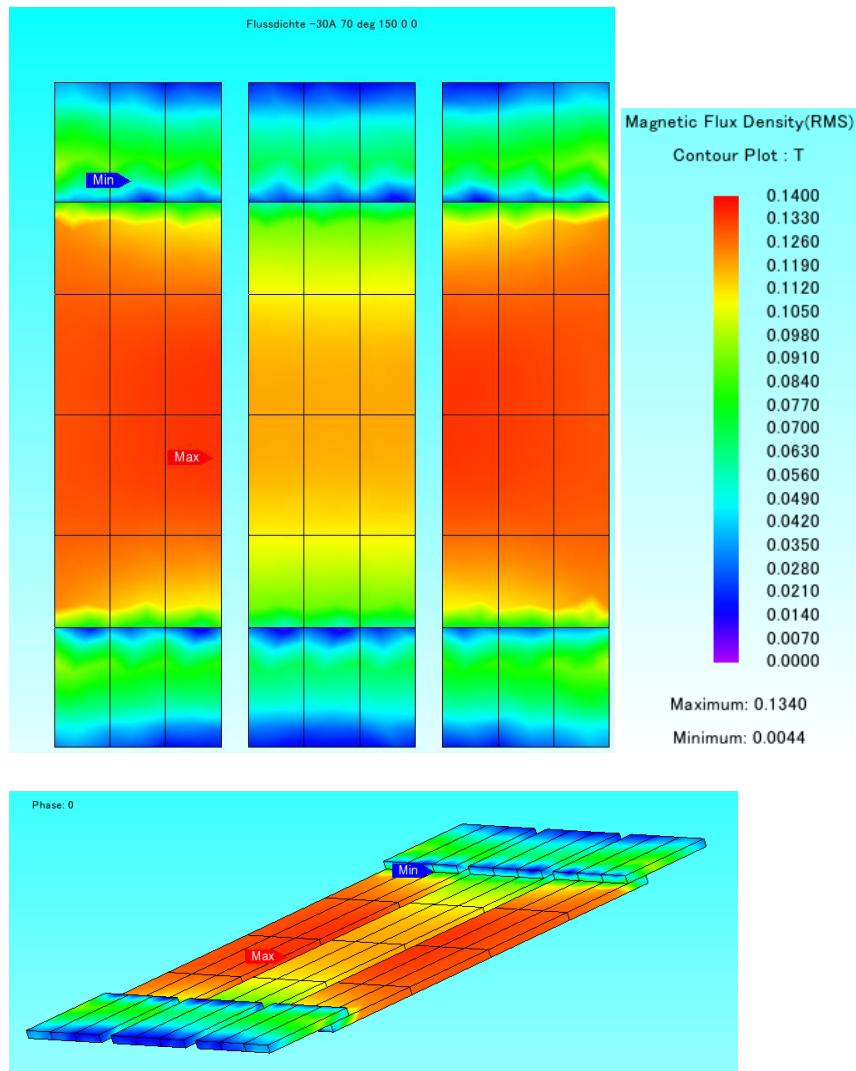


Abbildung 6: Flussdichte im Ferritkern des DS-Systems

Die Simulation ergibt eine maximale Flussdichte von ca. 140 mT und Kernverluste von etwa 100 W pro Resonator im simulierten Arbeitspunkt. Um diese Verluste zu minimieren, wurde die Ferritstärke erhöht und dadurch die Flussdichte gesenkt.

Magnetische Simulation einer Kombination aus DD- und DS-Resonatoren

Analog zur beschriebenen Simulation des DS-Systems wurde eine magnetische Simulation eines Resonators in DD-Bauweise durchgeführt. Der DD-Resonator wurde auf der Bodenseite (primärseitig) eingesetzt. Auf der Fahrzeugseite befindet sich der bereits modellierte DS-Resonator.

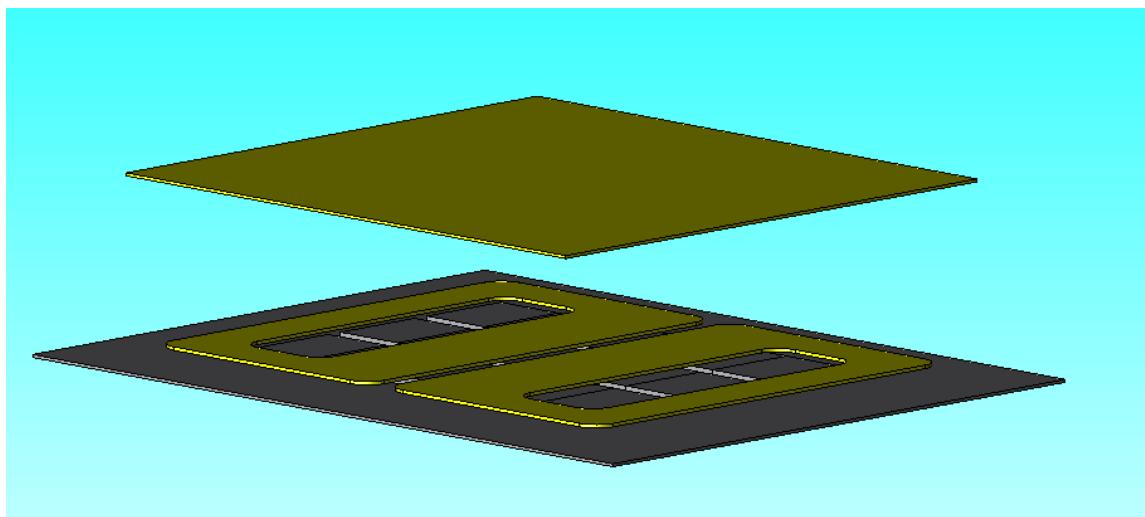


Abbildung 7: Simulationsmodell des DD-Resonators in JMAG

Die Simulation ergibt annähernd identische Kopplungswerte wie die des reinen DS-Systems. Die Kopplungswerte konnten nach dem Aufbau der ersten Labormuster auch messtechnisch bestätigt werden. Die Abweichung zwischen Simulation und Messung sind dabei sehr klein.

Tabelle 10: Simulierte und gemessene Kopplung DD zu DS

Position (DD zu DS) [mm]		Kopplung Simulation	Kopplung Kleinsignalmessung
0	0	0,34	0,29
100	100	0,17	
0	0	0,24	0,20
100	100	0,13	0,12

Erster Aufbau und Betrieb der DS-Resonatoren

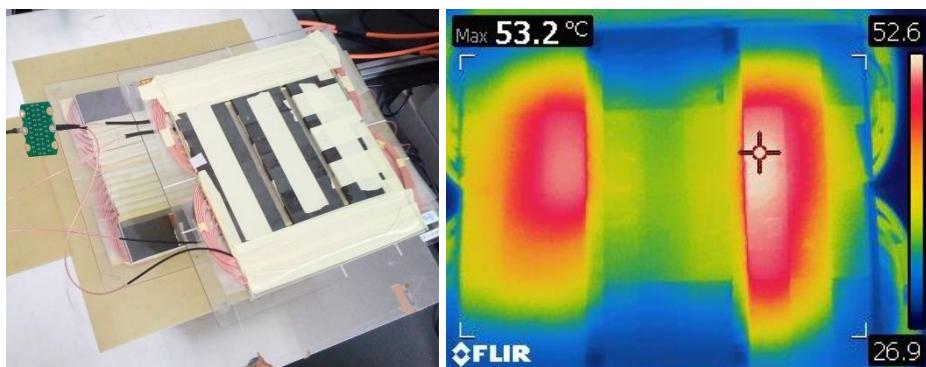


Abbildung 8: Messung des DS-Systems und Wärmeverteilung im Ferrit

Zum Nachweis der Funktionalität des Systems und zur Verifizierung der 3D-FEM-Simulationen wurde ein erstes Musterpaar aufgebaut und im Labor betrieben. Dabei wurden 3,3 kW Leistung im Maximalversatzpunkt übertragen. Die Temperaturverteilung im Ferrit entsprach der Flussdichteverteilung der Simulation. Auf der Grundlage der beschriebenen Ergebnisse wurden Muster erstellt und dem Projektpartner EDAG für die Integration in die elektrische Umgebung zur Verfügung gestellt.

Aufbau der Resonatoren

Die erste Iteration der bodenseitigen Resonatoren wurde mit dem Aufbau und der Lieferung von drei unterschiedlichen Resonatoren abgeschlossen (Zirkular, DS, DD)

Tabelle 11: Übersicht der bodenseitigen Resonatoren

Interne Projektnummer	EI 190 601 11 11	EI 190 601 11 21	EI 190 601 11 31
Aufbauform	Zirkular	DS	DD
Windungszahl	13,5	2x20	2x20
Induktivität (mit Sekundärseite) [μH]	ca. 200	ca. 160	ca. 155
R_{DC} [m Ω]	108	50	63
LxBxH [mm]	491x491x20,5	383x361x20,81	520x440x19
Kopplung min / max	0,09 / 0,19	0,13 / 0,3	0,12 / 0,29

Tabelle 11 zeigt eine Übersicht der aufgebauten Resonatoren. Die DS- und DD-Varianten wurden fahrzeugseitig mit einem DS-Resonator charakterisiert.

Die Kopplungswerte der DD/DS-Variante und der DS/DS-Variante sind annähernd identisch. Das DD-System kommt ohne eine zusätzliche Schirmung zur Feldführung aus und lässt sich robuster ausführen. Da die größeren Maße der DD-Variante im Asphalt eine untergeordnete Rolle spielen, wurde diese Variante für die Nutzung in der Lane ausgewählt.

Wirkungsgrad Unterschiede der Systeme (Zirkular, DD/DS und DS/DS)

Im Laufe des Projekts wurden drei verschiedene Aufbauformen der Resonatoren (Zirkular, DD, DS) ausgelegt und als Labormuster aufgebaut. Diese Muster wurden dem Projektpartner EDAG zum Laborbetrieb und für Untersuchen der Eigenschaften übergeben. Beim Betrieb wurden signifikante Unterschiede in Bezug auf den Wirkungsgrad festgestellt. Das zirkulare System zeigte einen um etwa 5 % bis 10 % höheren Wirkungsgrad als die Systeme DD/DS und DS/DS. Dieses Verhalten wurde bei der Entwicklung der Systeme nicht erwartet. Da die Resonatoren in DD- bzw. DS-Bauweise deutlich höhere Kopplungswerte erreichen, waren analog höhere Wirkungsgrade prognostiziert worden. Hier zeigte sich, dass die Kopplung zwischen Primär- und Sekundärseite kein Maß für die Effizienz des Systems ist.

Güte der Schwingkreise

Die Übertragerstrecke des Wireless-Charging-Systems im Projekt besteht aus mehreren, hintereinander liegenden Schwingkreisen. Jeder Schwingkreis wird auf die Resonanzfrequenz von 85 kHz ausgelegt und abgestimmt. Um die Effizienz eines Schwingkreises zu beschreiben, wird die Güte herangezogen. Die Güte ist dabei indirekt proportional zum Anteil der gespeicherten Energie, der in Wärme gewandelt wird. Dieser Anteil entspricht den Verlusten und mindert den Wirkungsgrad.

$$Q = \frac{1}{R} * \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

Die Güte eines Schwingkreises kann durch (1) beschrieben werden. Die ohmschen Widerstände aller Bauelemente werden in R zusammengefasst. Im idealisierten System werden die ohmschen Verluste gering. Die Güte wird zunehmend vom Quotienten der Blindanteile bestimmt. Das Verhältnis aus Induktivität und Kapazität muss möglichst groß sein, um einen verlustarmen Schwingkreis zu beschreiben.

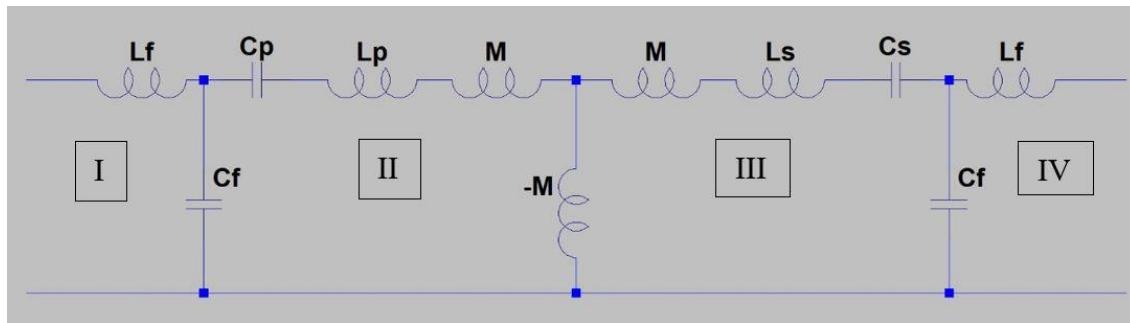


Abbildung 9: Resonanzkreise der Übertragerstrecke

In Abbildung 9 ist die Übertragerstrecke mit den Resonanzkreisen I bis IV dargestellt. Die ohmschen Anteile der Impedanzen sind nicht dargestellt. Um die Effizienz der einzelnen Systeme zu vergleichen (Zirkular, DD/DS, DS/DS) wurde jeweils die Güte der einzelnen Schwingkreise berechnet. Dabei wurden ähnliche ohmsche Verluste angenommen und entsprechend nur die Blindanteile betrachtet.

Tabelle 12: Vergleich der drei Systeme hinsichtlich Schwingkreisgüte (idealisiert)

	Zirkular	DD/DS	DS/DS
\$L_p\$ [\$\mu\$H]	200	158	158
\$L_s\$ [\$\mu\$H]	217	158	158
\$Q_I\$	18,7	20,8	18,7
\$Q_{II}\$	106,9	84,4	91,7
\$Q_{III}\$	116	84,4	91,7
\$Q_{VI}\$	18,7	20,8	18,7

Anhand der Tabelle 12 können Wirkungsgradunterschiede der Systeme eingeordnet werden. Insbesondere die Güte des zweiten und dritten Schwingkreises (\$Q_{II}\$, \$Q_{III}\$) liegt beim zirkularen System deutlich höher als die der Systeme DD/DS und DS/DS. Dieser Unterschied ergibt sich aus der niedrigeren Induktivität der DD- bzw. DS-Resonatoren.

Systemauslegung mittels Leistungsbetrachtung

Zu Beginn des Projekts wurden die Zielgrößen der einzelnen Bauelemente der Übertragerstrecke festgelegt. Dabei wurde die Leistungsübertragung mit der folgenden Formel beschrieben:

$$P_{in} = \frac{U_{in}^2 * U_{out}^2 * k^2 * L_p * L_s}{P_{out} * \omega^2 * L_{f1}^2 * L_{f2}^2} \quad (2)$$

Der erreichbare Kopplungswert ist beim zirkularen System deutlich niedriger als bei DD- und DS-Systemen. Um die Systeme im gleichen Leistungspunkt zu betreiben, wurden die Induktivitäten der Resonatoren im zirkularen System entsprechend größer gewählt. Die Auswirkung auf die Effizienz der Systeme über die Güte wurde dabei nicht betrachtet. Diese Beobachtungen führten zu einer Änderung der Zielgrößen im DS- und DD-System. Zur Optimierung hinsichtlich Effizienz wurde entsprechend die Induktivität der Resonatoren erhöht und gleichzeitig die Kopplung gesenkt. Dadurch steigt die Güte der Schwingkreise bei gleichzeitiger Beibehaltung des angestrebten Arbeitspunkts (vgl. (2)). Die Resonatoren können kleiner und gleichzeitig verlustärmer aufgebaut werden. Durch die gesteigerte Schwingkreisgüte wurde eine Steigerung des Wirkungsgrads des Systems angestrebt.

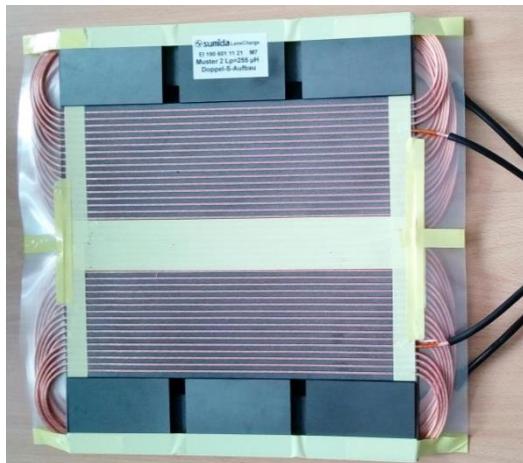
Optimierung der DD- und DS-Resonatoren

Im Zuge der Optimierung der DS/DD-Resonatoren wurden simulationsunterstützt zwei Größen angepasst. Zielstellung war eine höhere Resonatorinduktivität bei gleichzeitig geminderter Kopplung. Diese beiden Größen sind annähernd unabhängig. Um die Kopplung zu mindern, wurde die Fläche der Resonatoren verkleinert. Dabei wurde die größere Einsparung beim fahrzeugseitigen Resonator (DS) umgesetzt. Die damit verbundenen Platz- und Gewichtseinsparungen haben im Fahrzeug einen größeren Wert als in der Asphaltdecke. Um die Resonatorinduktivität zu steigern, wurde die Windungszahl angehoben und die Wicklung überarbeitet.

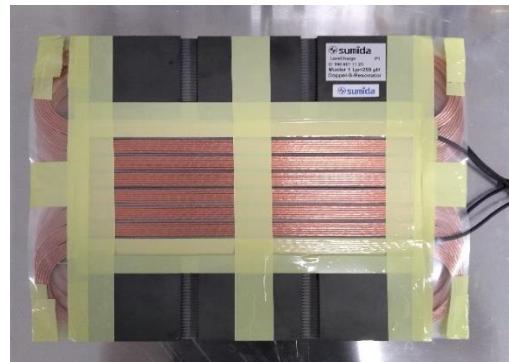
Tabelle 13: Elektrische und geometrische Kenngrößen der überarbeiteten Resonatoren

	Zirkular	DD V1	DD V2	DS V1	DS V2
L [μ H]	200	150	229	158	255
R [mOhm]	110	65	70	50	65
Länge [mm]	491	520	520	383	383
Breite [mm]	491	440	430	361	290
Fläche [cm^2]	189	229	224	138	111
dFläche [%]			ca. 2		ca. 19

Die optimierten Muster EI 190 601 11 23 (DS) und EI 190 601 11 33 (DD) wurden aufgebaut und dem Projektpartner EDAG übergeben.



EI 190 601 11 21 DS-Resonator V1



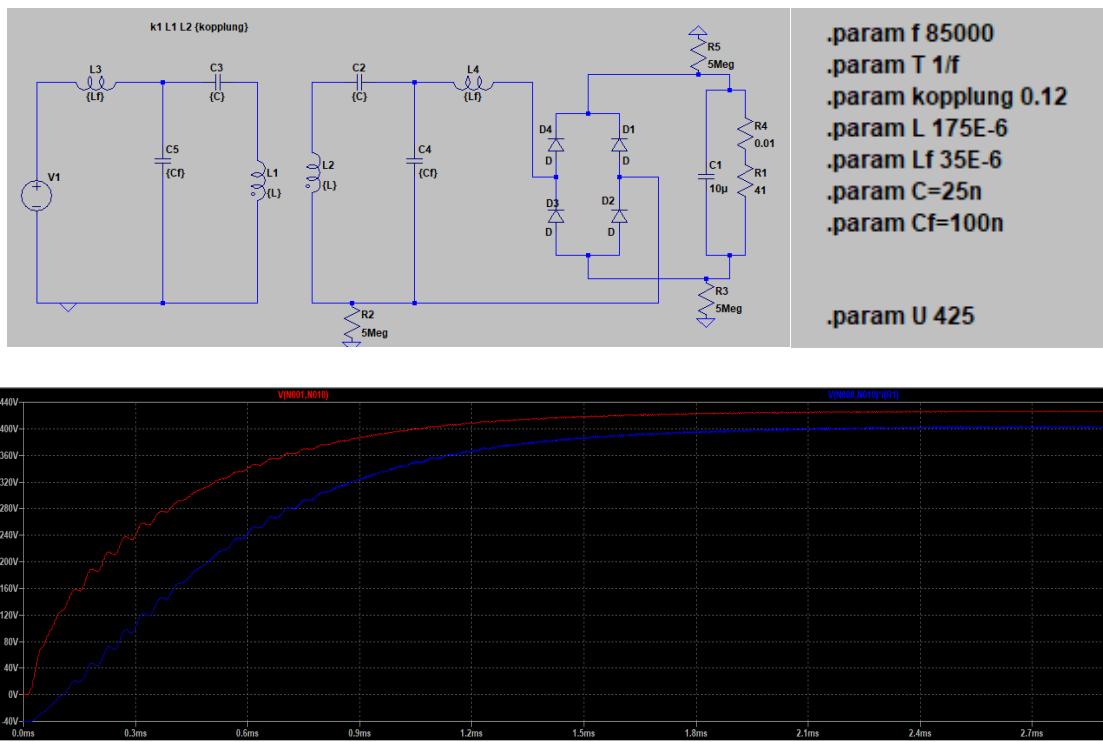
EI 190 601 11 23 DS-Resonator V2

Abbildung 10: Entwickelte Resonatoren DS V1 und DS V2

Abbildung 10 zeigt exemplarisch die Optimierung des DS-Resonators. Neben der Anpassung der Induktivität durch die Wicklungsanordnung, wurde die Kopplung des Gesamtsystems durch die kleinere Fläche des Resonators gemindert.

Elektrische Simulation der Übertragerstrecke mit DS-Resonatoren

In die oben gezeigte Optimierung flossen neben der Betrachtung der Güte von Schwingkreisen ebenfalls die Ergebnisse von elektrischen Simulationen des Systems ein. Die Simulationen wurden mit der Software LT-Spice durchgeführt. Als Kopplung wurde der zu erwartende Wert bei Maximalversatz (100/100/170) eingestellt. Es stellte sich eine Leistungsabgabe von 4,4 kW ein.

**Abbildung 11: Elektrische Simulation des Systems**

Die elektrische Simulation ergab im Arbeitspunkt mit minimaler Kopplung eine höhere Leistungsaufnahme als die angestrebten 3,7 kW. Dies bedeutet, dass die Regelung in jedem Arbeitspunkt eingreifen und die Leistungsaufnahme drosseln muss. Effizienter ist es im Arbeitspunkt mit minimaler Kopplung genau 3,7 kW Leistung zu übertragen. Um die übertragene Leistung zu mindern, können entweder die Filterinduktivitäten erhöht oder die Resonatorinduktivität reduziert werden (vgl. (2)).

1.3. AP LC-23-01.3 Evaluierung und Simulation von geometrischen Abhängigkeiten des induktiven Gesamtübertragersystems

- *Feldführung bei Kopplung eines zirkularen Resonators mit einem DS-Resonator*
- *Einfluss des Schirms der Resonatoren auf die Kopplung*

Im Folgenden wird eine Untersuchung zur Interoperabilität von Resonatoren mit unterschiedlicher Feldführung dargestellt. Dafür wurde ein zirkularer Resonator mit einem Resonator in DS-Aufbau mittels Kleinsignalmessung untersucht.

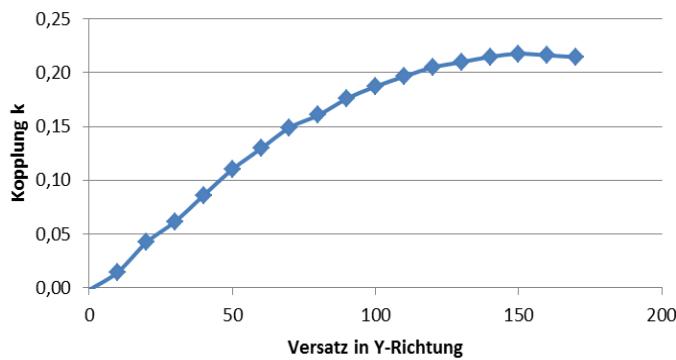
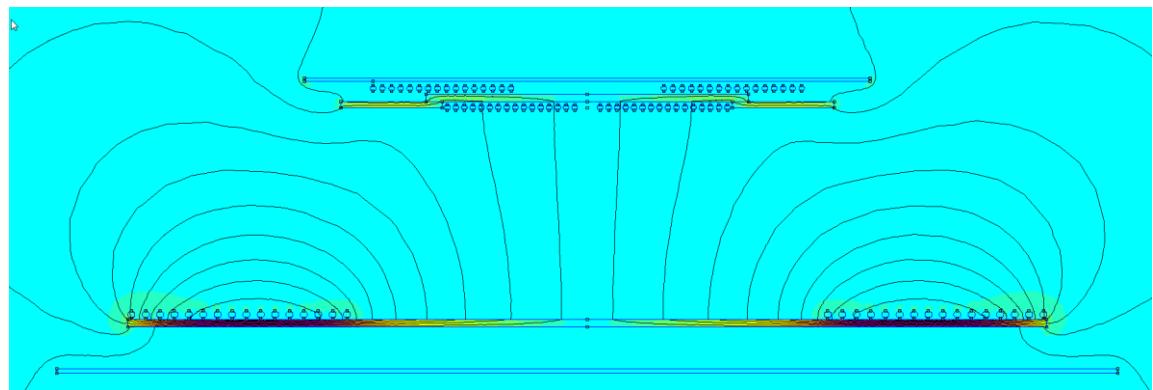
**Abbildung 12: Kopplungsmessung BS Zirkular zu FS DS bei X = 100 mm und Z = 100 mm**

Abbildung 12 zeigt die Ergebnisse der Kopplungsmessung. Bei einer optimalen Positionierung in X/Y Richtung von 0/0 (also direkt über dem Zentrum) stellt sich die Kopplung von Null ein. Mit steigendem Versatz (insbesondere in Y-Richtung) steigt die Kopplung. Das Maximum der Kopplung ist neben der Spulengeometrie vom Abstand der Spulen abhängig.

Untersuchung des magnetischen Feldes mittels 2D-Simulation

Um das beschriebene Verhalten sichtbar zu machen, wurde eine 2D-FEM-Simulation mit der Software FEMM durchgeführt. In der dargestellten Schnittebene können die Feldlinien dargestellt werden. Es kann gezeigt werden, dass sich das Magnetfeld bei einer Nullversatz-Positionierung (0/0) (vgl. Abbildung 13) in der fahrzeugseitigen Spule (DS) genau in der Mitte der Ferritkerne in beide Richtungen verdrängt. Somit sind die induzierten Ströme in den Spulen entgegengesetzt gerichtet und kompensieren sich.

**Abbildung 13: Feldlinienverlauf bei 0/0/150 in der 2D-FEM-Simulation**

Bei einem Versatz in Y-Richtung resultiert ein magnetisches Feld in eine Richtung im Ferrit der DS-Spule und somit ein gesamt induzierter Strom in der Spule, d. h. dass eine magnetische Kopplung vorhanden ist.

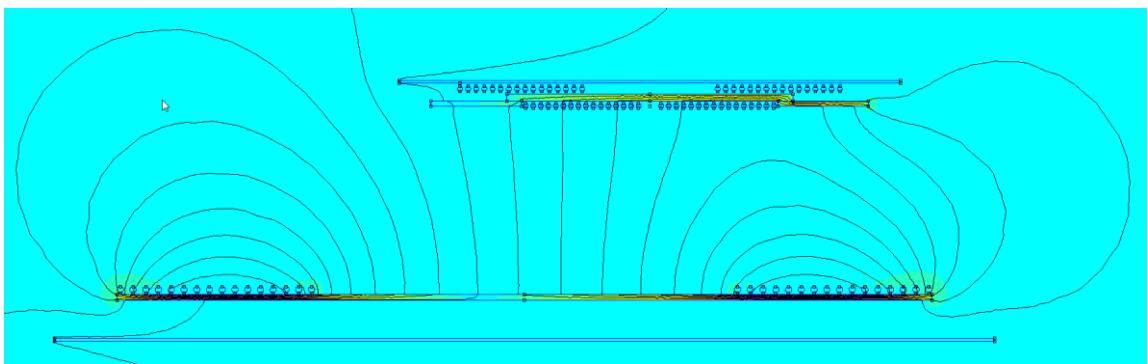


Abbildung 14: Feldlinienverlauf bei 0/80/150 in der 2D-FEM-Simulation

Kopplungs- und Induktivitätsänderung bei Veränderung des Abstands zwischen Resonator und Schirm im zirkularen System

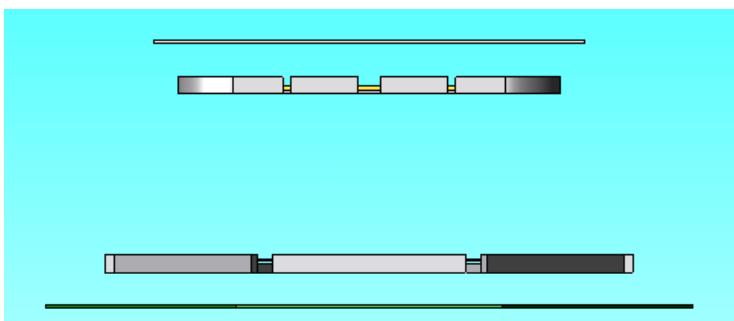


Abbildung 15: Aufbau der zirkularen Resonatoren in der magnetischen Simulation

In der 3D-FEM-Simulation (JMAG) wurde jeweils der Abstand zwischen Schirm und Zirkularem-Resonator variiert und der Einfluss auf die Kopplung betrachtet. Die ermittelten Werte wurden auf 100 mm Abstand genormt. Dadurch ergeben sich die in Abbildung 16 dargestellten Verläufe. Die Induktivitätswerte der Resonatoren steigen mit steigendem Abstand zwischen Schirm und Resonator. Ebenso verhält sich die Kopplung zwischen Primär- und Sekundärseite. Für das System ist deshalb ein möglichst großer Abstand zwischen Schirm und Resonator sinnvoll. Bodenseitig kann auf den Schirm verzichtet werden. Fahrzeugseitig ist eine Schirmung vorhanden (Metall des Fahrzeugunterbodens) und der Abstand kann nicht unendlich groß ausgelegt werden.

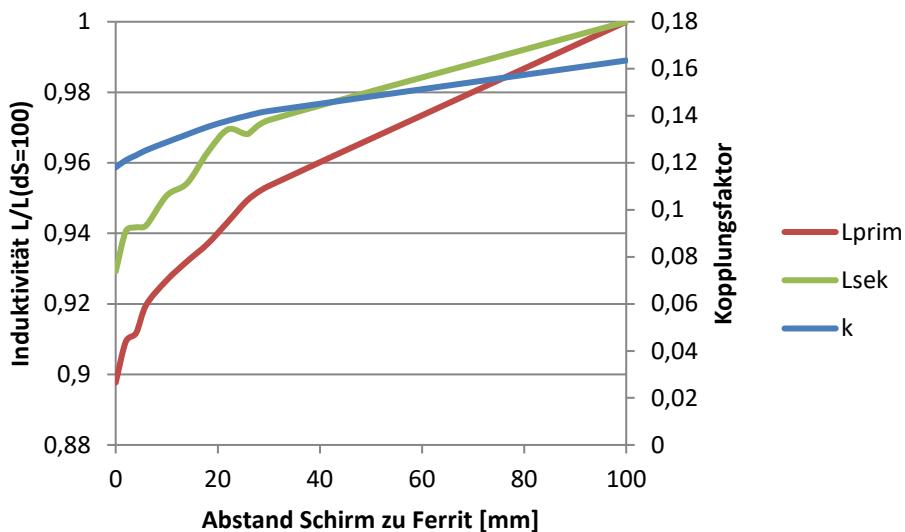


Abbildung 16: Induktivitäts- und Kopplungsverlauf bei der Änderung des Abstands zwischen Schirm und Resonator (zirkuläres System)

Kopplungs- und Induktivitätsänderung bei Veränderung des Abstands zwischen Resonator und Schirm im DS-System bzw. DD-System

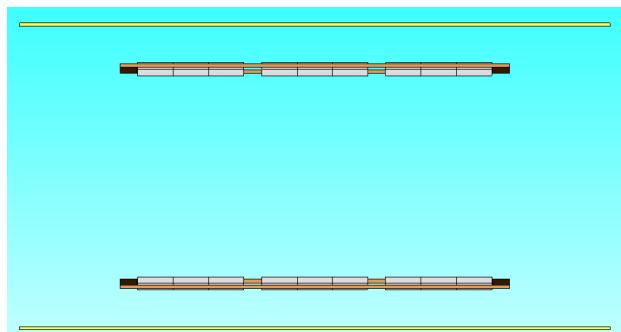


Abbildung 17: Aufbau der DS-Resonatoren in der magnetischen Simulation

In der Simulation wurde der jeweilige Abstand zwischen Schirm und DS-Resonator variiert und dabei der Einfluss auf die Kopplung betrachtet. Die ermittelten Werte wurden auf 100 mm Abstand genormt. Dadurch erhält man die in Abbildung 18 dargestellten Verläufe. Die Induktivitätswerte der Resonatoren steigen mit steigendem Abstand zwischen Schirm und Resonator. Die Kopplung zwischen Primär- und Sekundärseite verhält sich entgegengesetzt. Für das System ist deshalb ein möglichst kleiner Abstand zwischen Schirm und Resonator sinnvoll. Die dargestellten Ergebnisse wurden mit dem DS-System gewonnen. Da ein DD-Resonator die gleiche Feldführung aufweist, verhalten sich die Induktivität und die Kopplung analog.

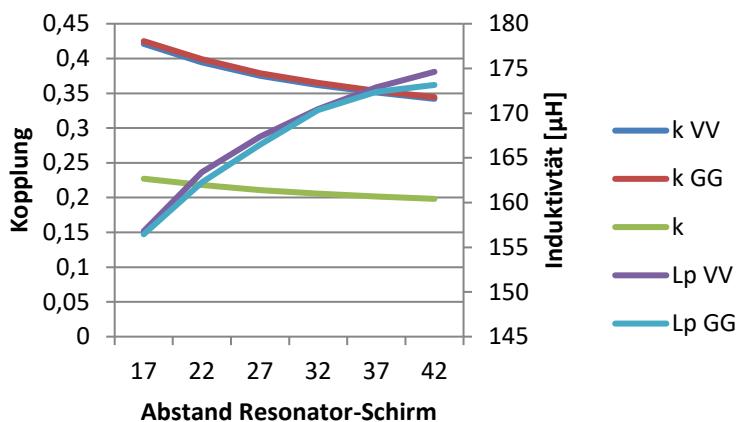


Abbildung 18: Induktivitäts- und Kopplungsverlauf bei der Änderung des Abstands zwischen Schirm und Resonator.

Die Bezeichnung VV bzw. GG steht für die beiden Wicklungen der Fahrzeugseite bzw. der Bodenseite. Deren Kopplung sinkt mit Abstand des Schirms. Die gemeinsame Induktivität steigt entsprechend. Die Kopplung zwischen primärem und sekundärem Wicklungspaar sinkt langsam mit dem steigenden Abstand zwischen Schirm und Resonator.

Einfluss der Größe des Schirms auf die Kopplung (DS-System)

Um den Einfluss der Größe des Schirms auf die Kopplung zu untersuchen, wurde eine simulative Betrachtung mit der Software JMAG durchgeführt. Die Größe des Schirms wurde dabei variiert. Für eine gute Vergleichbarkeit wurde die Größe des Schirms auf die Größe des Resonators normiert.

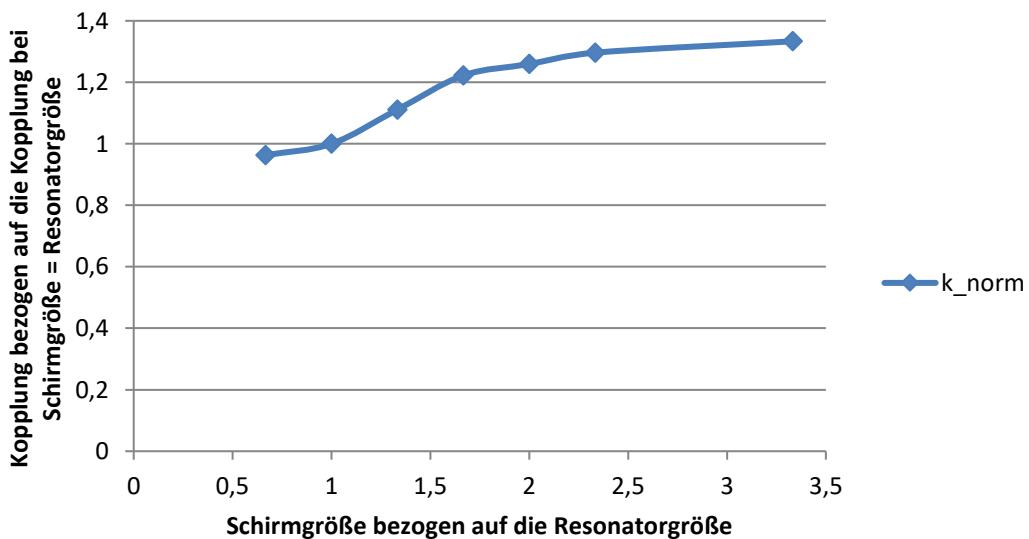


Abbildung 19: Einfluss der Größe des Schirms auf die Kopplung im DS-System

Der Kopplungswert steigt mit der Größe des Schirms zunächst stark an. Wenn die Größe des Schirms das 1,6-fache der Resonatorgröße erreicht hat ändert sich der Kopplungswert nur noch minimal. Eine Auslegung des Schirms auf das 1,6-Fache der Resonatorgröße ist deshalb sinnvoll.

Untersuchung des Schirmeinflusses auf die Kopplung beim Doppel-D-Resonator

Für die Untersuchung des Einflusses des Schirms beim DD-Resonator wurde für die Versatzpunkte 0/0/130 und 0/0/170 die Kopplung zwischen bodenseitigem DD-Resonator und fahrzeugseitigem DS-Resonator bei unterschiedlichen Schirmgrößen simuliert und berechnet.

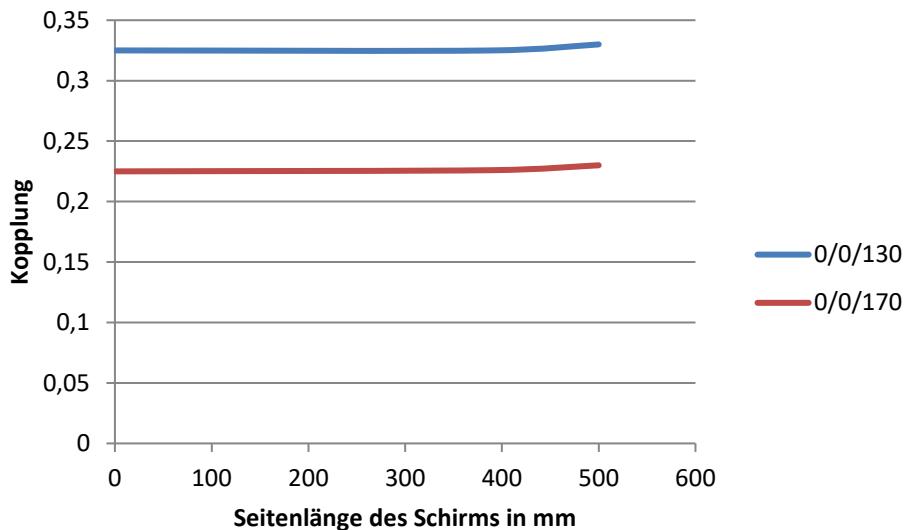


Abbildung 20: Kopplungsänderung bei Schirmgrößenänderung im DD-System

Durch die Änderung der Schirmgröße ändert sich die Kopplung nur unwesentlich. Durch die Geometrie des Wickels im DD-System und die dadurch gewährleistete Feldführung ist eine Schirmung für die Kopplung nicht nötig. Eventuell kann für EMV-Effekte ein Schirm vorteilhaft sein.

1.4. AP LC-23-01.4 Auswahl und Abstimmung eines elektrischen Parameterraums zum Betrieb an der Leistungselektronik (mit EDAG)

- *Topologie*
- *Bauteilwerte*

Zur Abstimmung eines elektrischen Parameterraums wurde zunächst die Topologie der Übertragerstrecke festgelegt und anschließend Bauteilwerte festgeschrieben.

Topologie

Abbildung 21 zeigt den Grundaufbau der Schaltung (vgl. AP LC-23-01.1). Die Filterdrosseln L_{f1} und L_{f2} werden jeweils in Hin- und Rückleitung integriert. Die Serienkondensatoren C_{S1} und C_{S2} werden geteilt und vor und nach den Resonatoren eingebaut.

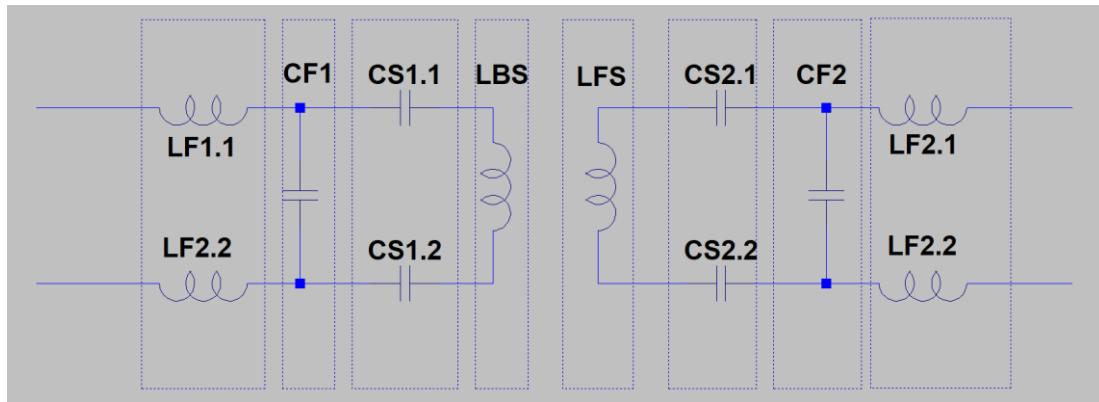


Abbildung 21: Ersatzschaltbild der Übertragerstrecke

Bauteilwerte

Die Bauteilwerte werden so bestimmt, dass bei der kleinsten zugelassenen Kopplung (maximaler Versatz) die Zielleistung übertragen wird. Bei höherer Kopplung würde die übertragene Leistung ansteigen. Um weiterhin die Zielleistung zu übertragen, wird eine sekundärseitige Regelung an die Schaltung angeschlossen. Das Funktionsprinzip der Regelung entspricht einem Kurzschluss der Sekundärseite. Idealisiert wird im sekundären Kurzschlussfall die Impedanz der Schaltung unendlich groß und entsprechend der aufgenommene Eingangsstrom gleich Null. Über das zeitlich anteilige Kurzschalten lässt sich die Impedanz und damit die Strom- und Leistungsaufnahme der Schaltung senken und je nach Kopplung anpassen.

Tabelle 7: Berechnete elektrische Größen der Bauelemente für 3,7 kW bei minimaler Kopplung (vgl. (2))

Resonanzfrequenz	f_0	85 kHz
Minimale Kopplung	k_{\min}	9 %
Eingangsspannung	U_{in}	425 V
Ausgangsspannung	U_{out}	400 V
Leistung	P	3700 W
Kompensationskondensator	C_{S1}	21 nF
Kompensationskondensator	C_{S2}	21 nF
Filterinduktivität	L_{f1}	35 μ H
Filterinduktivität	L_{f2}	35 μ H
Filterkondensator	C_{f1}	100 nF
Filterkondensator	C_{f2}	100 nF

Für eine stabile Funktion einer elektrischen Schaltung ist ein möglichst symmetrischer Aufbau förderlich. Deshalb wird die Filterinduktivität L_{f1} bzw. L_{f2} in jeweils beide elektrische Leiter integriert. Dazu werden die Windungen auf zwei Kammern aufgeteilt und über den Ferritkern magnetisch gekoppelt. Die Kapazität C_{S1} bzw. C_{S2} werden auf zwei Kapazitäten aufgeteilt. Die berechneten Werte können für den realen Aufbau angepasst werden. Wichtig ist dabei die möglichst punktgenaue Einstellung der Resonanzfrequenz.

Die in AP LC-23-01.2 beschriebene Optimierung des DS/DD-Systems für höhere Güte der Schwingkreise brachte nicht die gewünschte Wirkungsgradsteigerung. Die Schwingkreisgüte hat Einfluss auf die Systemeffizienz. Entscheidender ist aber die optimale Abstimmung von minimaler Kopplung und Bauteilwerten, um möglichst wenig Regeleingriff zu benötigen. Um

einen Vergleich der Systeme zu ermöglichen, ist es sehr wichtig die gleichen Arbeitspunkte zu betrachten. Dabei ist nicht nur die gleiche Leistungsaufnahme einzustellen, sondern auch gleiche Koppelverhältnisse und die Betrachtung der sich ergebenden Stromformen. Da die Optimierung hinsichtlich der Schwingkreisgüte nicht zum gewünschten Erfolg geführt hatte, wurde die Übertragerstrecke hinsichtlich der Leistungsaufnahme bei minimaler Kopplung optimiert. Daraus entstanden die finalen, im Teststand Stammestraße 2 eingesetzten Resonatoren EI 190 601 11 34 (Bodenseite) und EI 190 601 11 24 (Fahrzeugseite)

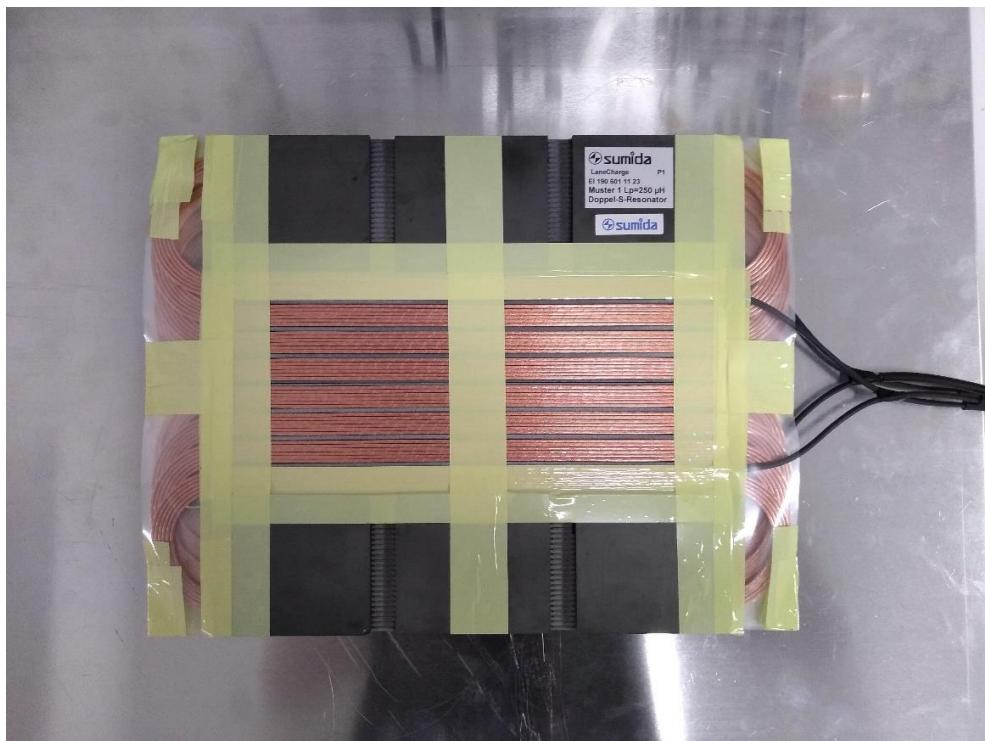


Abbildung 22: EI 190 601 11 24 finaler fahrzeugseitiger Resonator



Abbildung 23: EI 190 601 11 34 finaler bodenseitiger Resonator

1.5. AP LC-23-01.5 Erforschung von thermischen und asphaltrelevanten Integrationsanforderungen (simulativ und prozesstechnisch mit TUBS)

- *Simulationsrelevante Kenngrößen des Asphalt*
- *Anforderungen an den primärseitigen Resonator hinsichtlich Einbringung in die Asphaltdecke*
- *Thermische Untersuchungen von Materialien der Resonatoren*
- *Testasphaltierung, Erstellung von vier Mustern und Einbringung in den Asphalt im Teststand Stammestraße 1*
- *Untersuchung von Asphalt im Luftspalt*

Simulationsrelevante Kenngrößen des Asphalt

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner TUBS wurden Kenngrößen zusammengetragen, die für die Simulation notwendig sind. Magnetisch ist durch den Asphalt nicht mit Beeinflussung der Energieübertragung zu rechnen.

Tabelle 14: Kenngrößen des Gussasphalts (Quelle: TUBS)

Bezeichnung	Größe
Dichte	2500 g/cm ³
E-Modul	22000 MPa @ -30 °C bis 1000 MPa @ +40 °C
Wärmeausdehnungskoeffizient	$2,5 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$ bis $5,8 \cdot 10^{-6} \frac{1}{K}$
Wärmeleitfähigkeit	0,6 W/mK bis 1,4 W/mK
Elektrischer spezifischer Widerstand	$1010 \frac{\Omega}{cm}$ bis $1012 \frac{\Omega}{cm}$
Spezifische Wärmekapazität	0,72 J/kgK

Tabelle 14 beinhaltet Kenngrößen des eingesetzten Gussasphalts. Diese Kenngrößen können in der magnetischen Simulation zur Charakterisierung des Asphalt im Luftspalt eingesetzt werden.

Anforderungen an den primärseitigen Resonator hinsichtlich Einbringung in die Asphaltdecke

Die Einbaudicke der obersten Asphaltsschicht liegt in der Regel bei zwei bis vier cm. Der Asphalt wird beim Einbau mit einer Temperatur von 200 °C bis 230 °C gegossen. Im späteren Betrieb lastet etwa 0,8 MPa bis 1 MPa auf einer Reifenaufstandsfläche (etwa 10 cm * 15 cm). Diese Last wird über den Asphalt verteilt. Wenn der Resonator dieser Krafteinwirkung standhalten kann, ist nicht mit Beschädigungen zu rechnen. Unterhalb der Asphaltdeckschicht befindet sich eine Asphalttragschicht. Diese wird je nach Belastung hinsichtlich der Stärke angepasst. Die Belastung eines Taxistandes ist dabei gering einzuschätzen. Weder große Krafteinwirkung durch Lkw-Verkehr noch Dauerbelastung wie auf Autobahnen ist zu erwarten. Die Belastungsklasse (Bk) wird nach der Beanspruchungszahl (B-Zahl) differenziert. Diese beschreibt die Summe der gewichteten äquivalenten 10 t-Achsübergänge, die bis zum Ende des Beanspruchungszeitraumes (meist 30 Jahre) zu erwarten ist.

Zeile	Bauklasse	(Dickenangaben in cm; \downarrow E_{v2} -Mindestwerte in MN/m ²)								$Bk_{1,0}$	$Bk_{0,3}$
		Bk_{100}	Bk_{32}	Bk_{10}	$Bk_{3,2}$	$Bk_{1,8}$	$Bk_{1,0}$	$Bk_{0,3}$			
		B [Mio]	> 32	> 10 - 32	> 3,2 - 10	> 1,8 - 3,2	> 1,0 - 1,8	> 0,3 - 1,0			
	Dicke des frostsch. Oberbaus ¹	55 65 75 85	55 65 75 85	55 65 75 85	45 55 65 75	45 55 65 75	35 45 55 65	35 45 55 65			
Asphalttragschicht auf Frostschutzschicht											
1	Asphaltdecke		12		12		10	4			
	Asphaltragschicht	$\downarrow 120$	22	$\downarrow 120$	18	$\downarrow 120$	12	16	$\downarrow 120$	14	$\downarrow 100$
	Frostschutzschicht	$\downarrow 45$		$\downarrow 45$		$\downarrow 45$		45	$\downarrow 45$		$\downarrow 45$
	Dicke der Frostschutzschicht	- 31 ² 41 51	25 ³ 35 45 55	29 ³ 39 49 59	- 33 ² 43 53	25 ³ 35 45 55	17 ² 27 37 47	21 31 41 51			

Abbildung 24: Schichtaufbauten mit Asphaltdecke für Fahrbahnen²

Abbildung 24 zeigt eine Übersicht über verschiedene Asphalt-Aufbauweisen. Für LaneCharge sind die Darstellungen mit $Bk_{1,8}$ bis $Bk_{0,3}$ interessant. Die bodenseitige Resonatorspule wird auf die Asphaltragschicht montiert und anschließend die Asphaltdecke darüber gegossen. Um die Krafteinwirkung auf den Resonator gut zu verteilen, sollte die Asphaltdecke über dem Resonator mindestens 2 cm betragen.

Um erste Erkenntnisse der Auswirkungen des Asphaltierens auf die Materialien und Resonatoren zu erlangen, wurden thermische Versuche durchgeführt.

Thermische Untersuchung von Materialen mittels Testaufbau



Abbildung 25: Testspulen für Temperaturtests

Um die Auswirkungen der hohen Temperaturen beim Asphaltieren zu untersuchen, wurde ein Versuchsaufbau mit sechs zirkulären Wicklungen aufgebaut. Die genutzten Materialien waren auch für die Resonatoren vorgesehen. In einem ersten Versuch wurden die Spulen mit 200 °C im Ofen behandelt.

Optisch ist keine Auswirkung auf die Wicklungen zu erkennen und auch der Frequenzgang des Widerstands weist keine signifikante Änderung auf.

Um den Prozess des Asphaltierens etwas besser nachzustellen wurde der Versuchsaufbau in einen Vergussbecher integriert und anschließend mit aufgeheiztem Bitumen bei 180 °C übergossen.

² Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen: RStO 2012. August 2012. ISBN: 978-3-86-446021-0

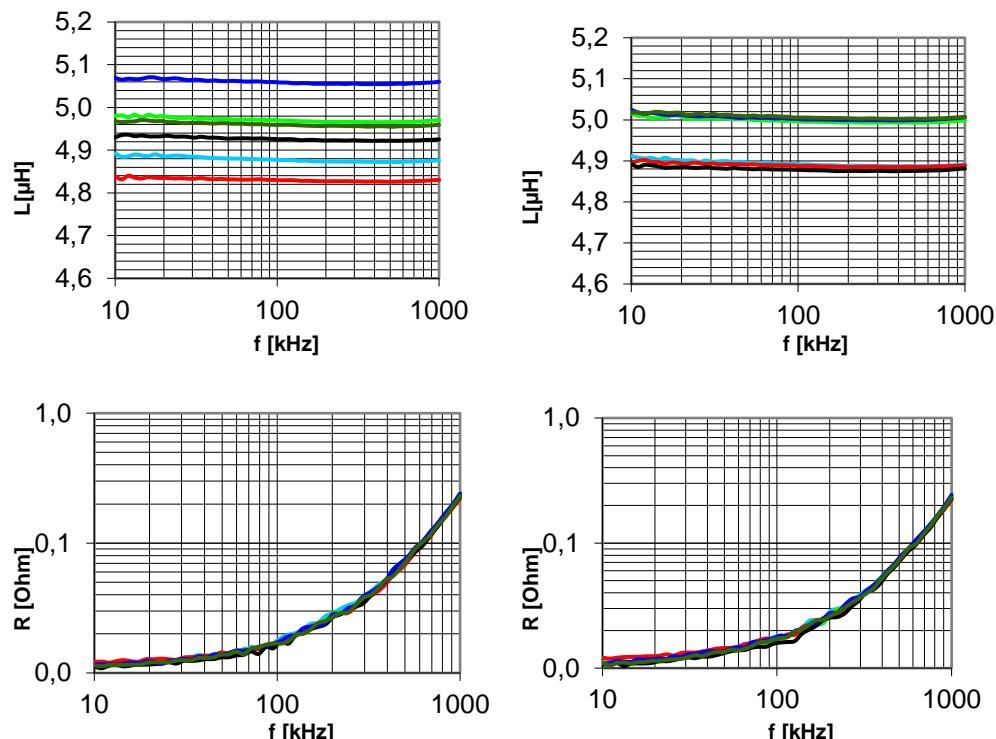
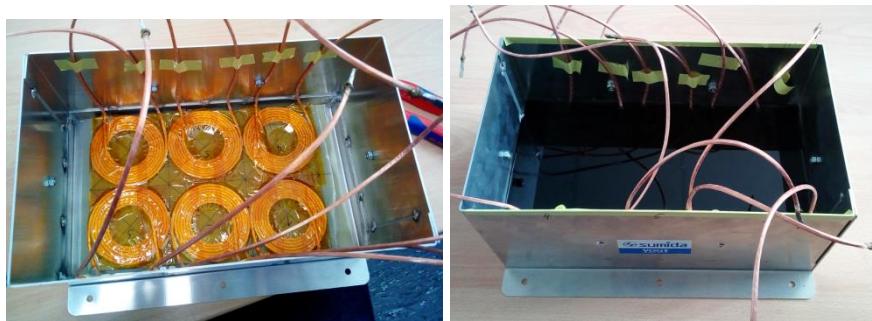


Abbildung 26: Versuchsaufbau vor (linke Spalte) und nach (rechte Spalte) dem Vergießen mit Bitumen mit Messung der Induktivität und des frequenzabhängigen Widerstands.

Die Messung vor und nach dem Vergießen mit aufgeheiztem Bitumen zeigt keine signifikanten Änderungen in Induktivität und Widerstand. Es ist deshalb nicht von einer Beschädigung der Materialien auszugehen. Um den tatsächlichen Asphaltierungsprozess zu untersuchen, wurde ein Muster aufgebaut und dem Projektpartner TUBS zur Untersuchung zur Verfügung gestellt.

Asphaltversuch mit einem halben DS-Muster

Für die Untersuchung des Asphaltierprozesses wurde für den Projektpartner TUBS ein halbes DS-Muster aufgebaut, elektrisch gemessen und an den Projektpartner versendet.

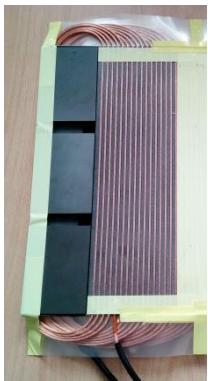


Abbildung 27: Halber DS-Aufbau für die Untersuchung des Asphaltierprozesses

Der DS-Resonator hat in voller Größe zwei parallele Wicklungen. Für die geplanten Untersuchungen beim Projektpartner durfte der Prüfling eine festgelegte Größe nicht überschreiten. Deshalb konnte bei der halben Variante nur eine der Wicklungen realisiert werden. Der Resonator eignet sich so nicht zur Energieübertragung. Es können aber Messwerte vor und nach dem Asphaltierungsprozess aufgenommen und verglichen werden.



Abbildung 28: DS-Muster im Asphalt

Abbildung 28 zeigt den Aufbau nach dem Asphaltieren. Vor dem Einbringen in den Asphalt wurden die Induktivität und der Widerstand bis zu einer Frequenz von 200 kHz gemessen.

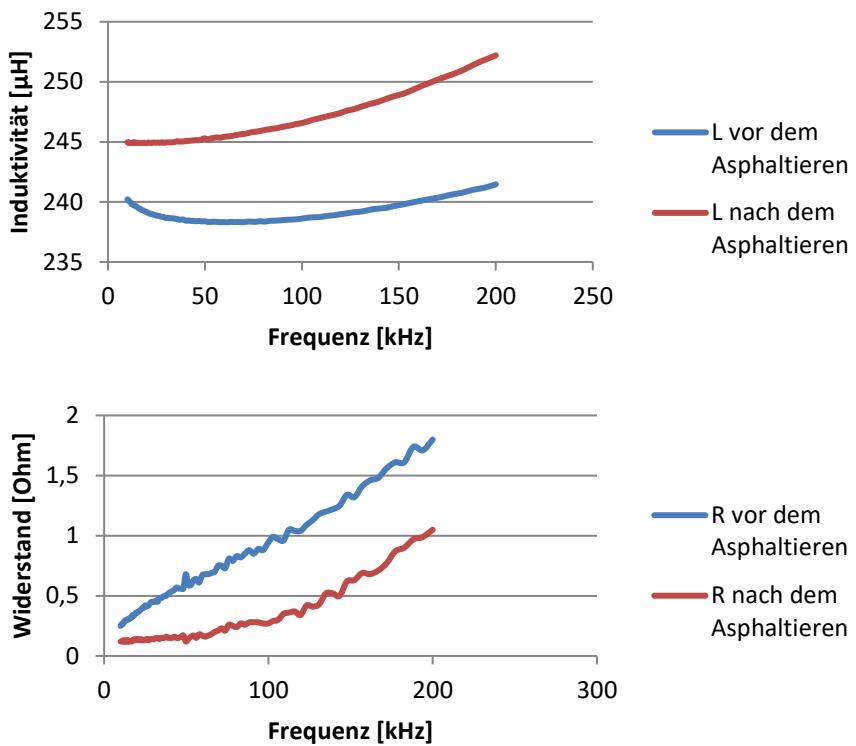


Abbildung 29: Vergleich der Messwerte vor und nach dem Asphaltieren

Abbildung 29 zeigt die Ergebnisse der Messungen vor und nach dem Asphaltierungsprozess. Sowohl die Induktivität als auch der Widerstand weichen nur wenig voneinander ab. Die Änderung der Induktivität befindet sich in einer Größenordnung, wie sie bei jeder Art von Vergrößerung üblich ist. Der Widerstand gibt keinen Anlass eine Beschädigung der verwendeten Hochfrequenzlitze zu vermuten. Die ausgewählten Materialien haben dem Einbringen in Asphalt standgehalten.

Auswirkungen des Asphalt im Zwischenraum

Um die Auswirkungen der Asphaltsschicht zwischen den Resonatoren zu untersuchen, hat der Projektpartner TUBS eine Asphaltprobe zur Verfügung gestellt. Am DS-System wurde eine Kleinsignalmessung mit und ohne diese Asphaltprobe im Luftspalt durchgeführt.

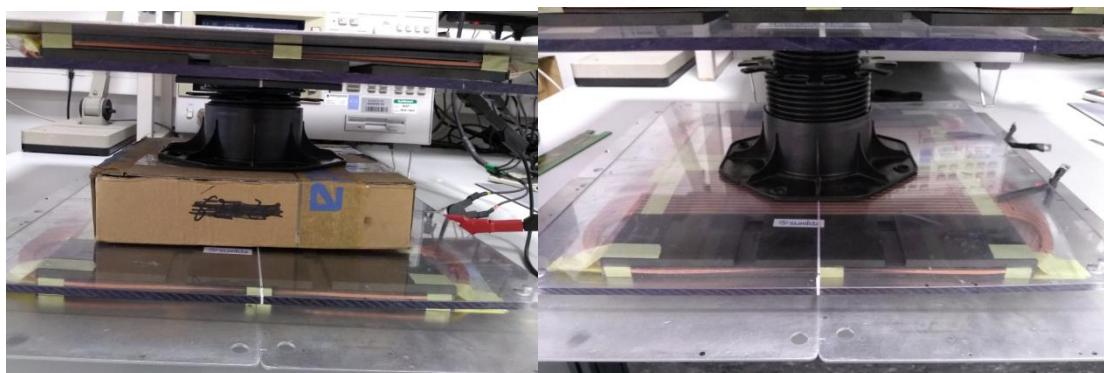


Abbildung 30: Kleinsignalmessung mit und ohne Asphaltmuster im Zwischenraum

Die Asphaltprobe hatte eine Höhe von 6 cm. Im späteren Straßenaufbau wird die Überdeckung nur 2,5 cm betragen.

Tabelle 15: Messergebnisse mit und ohne Asphalt im Zwischenraum (Doppel-S)

	ohne Asphalt	mit ~6cm Asphalt im Luftspalt
Lp	150	149 µH
Ls	162	161 µH
Lp+Ls	240,2	237,4 µH
M	35,9	36,3 µH
k	23	23,4 %

Die Tabelle 15 zeigt die Messergebnisse der Kleinsignalmessung. Die Induktivitätswerte weichen nur minimal voneinander ab und die Kopplung ist nahezu identisch. Die Unterschiede liegen im Bereich der Messungenauigkeit. Entsprechend hat der Asphalt keinen Einfluss auf die magnetische Funktionsfähigkeit des Systems. Es gibt Asphaltmischungen, die Reste von Metallen enthalten können. Insbesondere bei Recyclinganteilen kann der Metallgehalt messbar sein. Dies ist zu vermeiden.

Auf Grundlage der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Resonator in DD-Aufbau in einer Asphaltsschicht eingebracht.

Abbildung 31 zeigt den funktionsfähigen Resonator in der Asphaltsschicht.

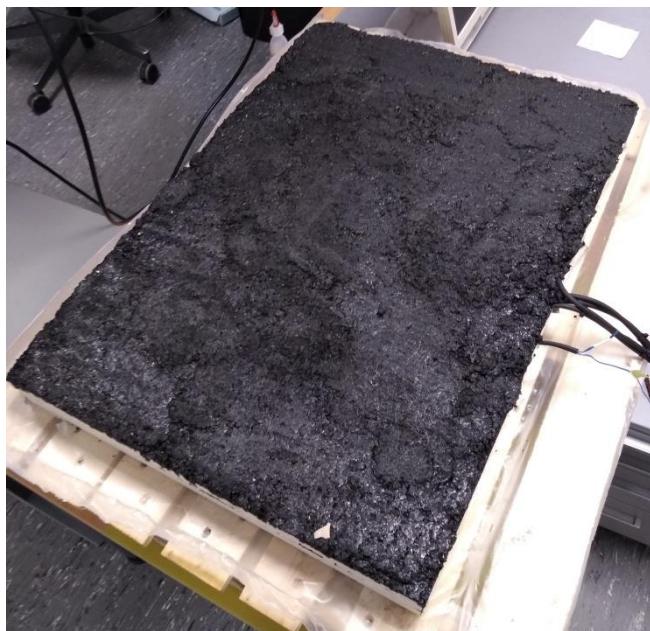


Abbildung 31: DD-Resonator in einer Asphaltsschicht

Das Muster wurde nach dem Asphaltierungsprozess elektrisch vermessen und anschließend dem Projektpartner EDAG zum Funktionstest zur Verfügung gestellt.

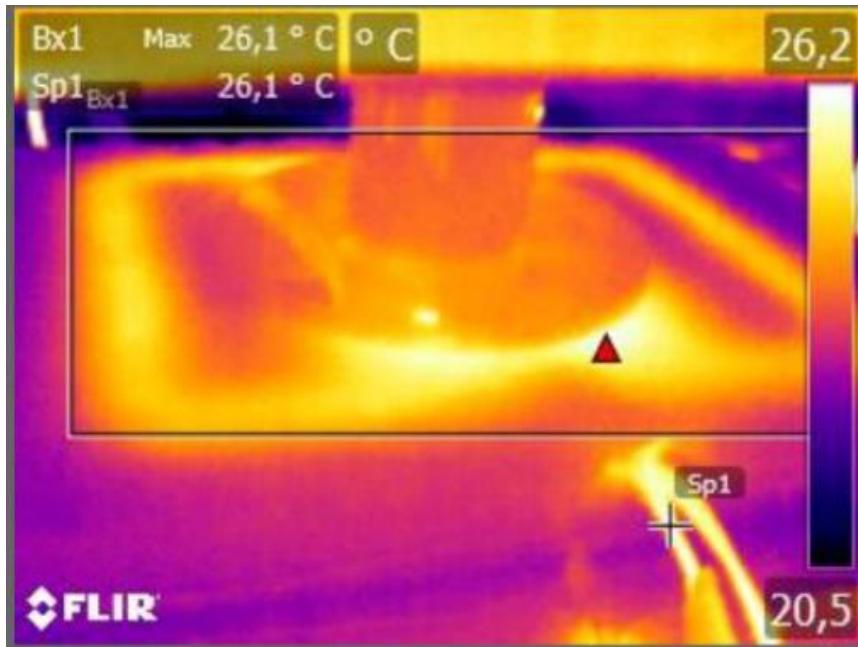
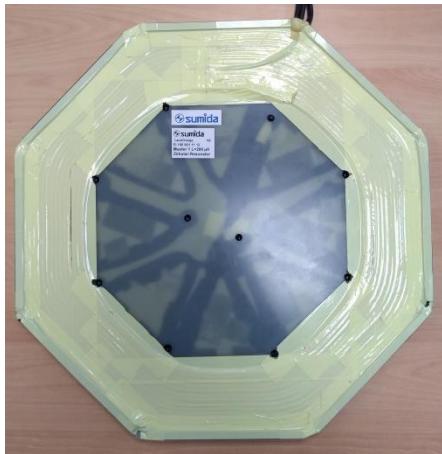


Abbildung 32: Thermographie des Resonators im Betrieb bei EDAG (Quelle: EDAG)

Das Muster konnte ins System eingebunden und die Funktion in einem Arbeitspunkt nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass der Aufbau dem Asphaltierungsprozess standhält.

Erstellung von vier Mustern für die Einbringung an der HsH (Stammestraße 1)

Für die Teststände beim Projektpartner HsH wurden vier Muster aufgebaut.



Zirkular-Resonator (EI 190 601 11 12)



DS-Resonator (EI 190 601 11 22)



DD-Resonator (EI 190 601 11 32)

Abbildung 33: Primärresonatoren für den Teststand beim Projektpartner HsH



DD-Resonator 7,5 kW (EI 190 601 11 42)

Die Muster wurden für den Asphaltierungsprozess vorbereitet und mit Zuleitungen kontaktiert.

Einbringung der Muster in den Asphalt am Teststand Stammestraße 1



Abbildung 34: Vorbereitete Plätze auf der Asphalttragschicht (Quelle: HsH)

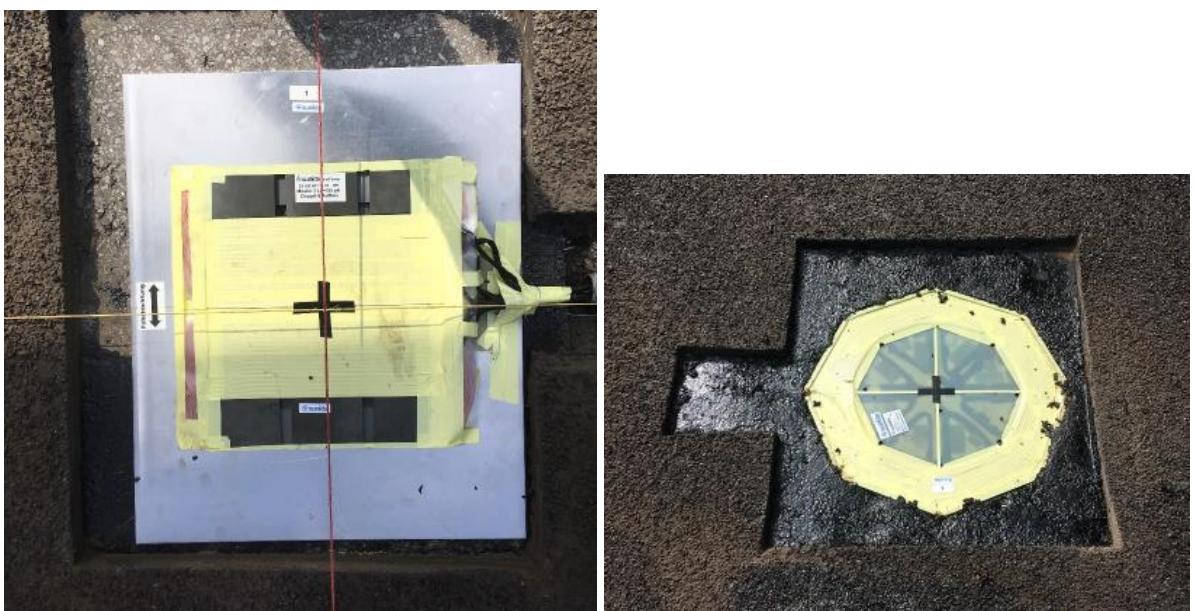


Abbildung 35: Platzierte Resonatoren (DS, Zirkular), (Quelle: HsH)



Abbildung 36: Asphaltdeckschicht nach Abschluss der Asphaltarbeiten (Quelle: HsH)

Abbildung 34, Abbildung 35 und Abbildung 36 dokumentieren die Asphaltierungsarbeiten. Die Resonatoren konnten erfolgreich in den Asphalt integriert und in das Straßenbild eingefügt werden. Die genutzten Materialien sind für den Asphaltierungsprozess geeignet.

1.6. AP LC-23-01.6 Erforschung einer strassenbautauglichen AVT (Interface) mit EDAG und TUBS

Die thermischen Versuche die im AP LC-23-01.5 durchgeführt wurden, mündeten im erfolgreichen Einbau von vier Resonatoren am Teststand Stammestraße 1. Es konnte nachgewiesen werden, dass die verwendeten Materialien dem Asphaltierungsprozess standhalten.

Um den mechanischen Ansprüchen im Straßenaufbau zu genügen, wurde eine Überdeckung der Resonatoren mit Asphalt von 2,5 cm festgelegt. Die Höhe der unterschiedlichen Resonatoren wurde auf 2 cm angepasst. Dadurch ist die Einbausituation für die verschiedenen Resonatoren (Zirkular, DD, DS und die 7,5 kW-Variante) identisch. Die Anschlüsse der Resonatoren wurden mit einem Schrumpfschlauch geschützt. Dieser enthält einen Kleber und legt sich entsprechend flächig um die Leitungen. Dadurch wird eine Absicherung gegen Feuchtigkeit gewährleistet. Gleichzeitig dient der Schlauch als elektrische Isolation und mechanischer Schutz gegen Erde. Die Resonatoren wurden direkt im Asphalt mit den Anschlusskabeln zum Schaltschrank verbunden. Die Anschlussstelle ist dadurch geschützt, eine Revision der Resonatoren ist aber nicht mehr ohne größeren Aufwand möglich.

1.7. AP LC-23-01.7 Messung/Prüfung von sicherheitsrelevanten Anforderungen (normativ, gesetzlich) am Primärspulensystem

Für die Baumaßnahme an der Stammestraße 2 beim Projektpartner HsH wurden zwölf Resonatoren für den Einsatz im Asphalt geliefert. Zur Sicherstellung der Betriebsfähigkeit wurden die Muster hinsichtlich Gleichstromwiderstand, Wechselstromwiderstand und Induktivität gemessen und geprüft. Die Prüfung des Projektpartners HsH nach dem Einbauprozess ergab keine signifikanten Abweichungen. Der Projektpartner EDAG führt die erste Inbetriebnahme durch. Dabei trat ein Überspannungsfall auf.

Spannungsüberschlag bei der Inbetriebnahme des Versuchstands Stammestraße 2

Für den Betrieb der Resonatoren sind lange Anschlussleitungen (bis zu 30 m) erforderlich. Um die Induktivität der Leitung gering zu halten, wird Hin- und Rückleiter verschlagen. Die Leitungen sind im zweiten Resonanzkreis und werden im Betrieb mit 2,5 kV Spannung belastet. Abbildung 37 zeigt die Position der Leitung in der Schaltung der bodenseitigen Resonanzkreise.

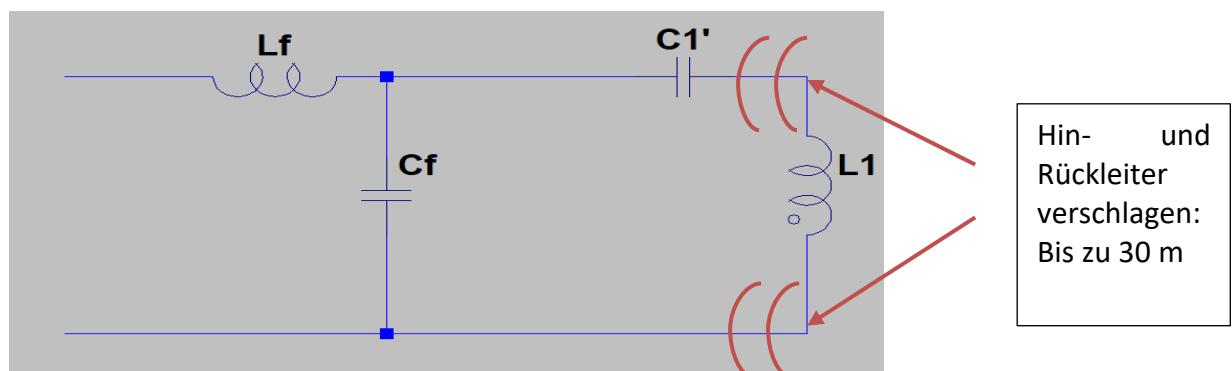


Abbildung 37: Position Hin- und Rückleiter in der Schaltung. Bodenseite.

Bei der Inbetriebnahme des Testaufbaus Stammestraße 2 trat ein Spannungs durchschlag in den Zuleitungen auf. Dabei wurde die Kondensatorplatine C_f zerstört.

Aufbau und Untersuchungen der Zuleitungen in Stammestraße 2

Um die Ursache des Fehlerfalls am Teststand Stammestraße 2 zu ergründen, wurden verschiedene Tests, mit analog zu den eingesetzten Kabeln aufgebauten Leitungen, durchgeführt.

Hin- und Rückleiter wurden aus 1590x0,071 mm Hochfrequenzlitze aufgebaut. Die Litze ist zusätzlich zur Isolierung mit Kupferlack zweifach mit PET-Folie umwickelt. Durch die zusätzliche Isolation liegt die Durchschlagsspannung Litze gegen Litze im Twist bei 10,8 kV laut Herstellerangabe. Auf dieser Grundlage wurde beim Entwicklungsprozess der Zuleitungen auf eine zusätzliche Isolation verzichtet. Abbildung 38 zeigt den Prozess des Verschlagens von Hin- und Rückleiter.



Abbildung 38: Verschlagung des Hin- und Rückleiters

Die verschlagene Litze wird anschließend in ein Kunststoffrohr eingezogen und die Anschlüsse zur Kontaktierung der Resonatoren angebracht. Dieser Zusammenbau wurde anschließend am Teststand Stammestraße 2 in Leerohre vom Schaltschrank zu den jeweiligen Resonatoren eingezogen. Abbildung 39 zeigt ein fertiges Anschlusskabel mit Anschlüssen zum Resonator.



Abbildung 39: Zuleitungskabel mit Anschlüssen zum Resonator

Um die Ursache des Fehlers bei der Inbetriebnahme zu finden, wurden verschiedene Tests durchgeführt.

- Hochspannungsprüfung mit 2,5 kV bei 50 Hz für 1 h
- Hochspannungsmessung mit:
 - 12 kV Gleichspannung
 - 15 kV Gleichspannung
- Teilentladungsuntersuchung bei 50 Hz

Die Untersuchungen ergaben eine Gleichspannungsfestigkeit von 12 kV. Bei 15 kV Spannungsbeaufschlagung konnte ein Stromfluss festgestellt werden. Die Hochspannungsprüfung mit

2,5 kV und 50 Hz ergab keine Schädigung der Litze. Die Teilentladungsuntersuchung ergab eine Einsetzspannung von 800 V.

Teilentladungen (TE) schädigen die Isolation über die Lebensdauer. Dabei spielt sowohl die Betriebsfrequenz als auch die Größe der Übergangsflächen, an denen Teilentladungen auftreten, eine Rolle. Dieser Einfluss wurde bei den Zuleitungen für Stammestraße 2 unterschätzt. Die hohe Betriebsfrequenz von 85 kHz zusammen mit den großen Flächen, die sich aus den langen Zuleitungen (bis zu 30 m) ergeben, führt zur Zerstörung der Isolation und Kurzschluss der Leitung. Zur Verhinderung bzw. Minderung von Teilentladung kann eine zusätzliche Isolation des Hin- und Rückleiters eingebracht werden. Eine zusätzliche Isolation auf ganzer Länge bedeutet einen großen Mehraufwand, bei der Herstellung der Leitungen. Die Nutzung von Schrumpfschlauch, wie es am Teststand Stammestraße 1 vorgenommen wurde ist dabei nicht umsetzbar. Als Möglichkeit kommen verschiedene Isolationsschläuche in Frage. Für die Auswahl der passenden Isolation wurden Teilentladungsmessungen durchgeführt.

Teilentladungsuntersuchung von verschiedenen Isolationsschläuchen

Zur Untersuchung wurden Litzenstücke mit verschiedenen Isolationsschläuchen isoliert und verschlagen. Abbildung 40 zeigt die vorbereiteten Prüflinge für die Teilentladungsuntersuchung.



Glasgewebeschlauch – weiß

DE-C-VSR10 Glasgewebeschlauch imprägniert mit Silikon-Lack



Lackschlauch – gelb

Adaglas-Glasseidenlackschlauch



Schrumpfschlauch

DE-XFRG103 Polyolefin-Schrumpfschlauch mit Kleber



Glasgewebeschlauch – schwarz

DE-H-VSC25 Silikon-Glasgewebschlauch



Fadenschlauch

DE-B-DEAKTEX Dehnbarer Polyester Monofilschlauch

Abbildung 40: Prüflinge zur Teilentladungsuntersuchung

Jeweils fünf Prüflinge wurden am Teilentladungsmessplatz mit einem TE-Messgerät des Herstellers MPS untersucht. Abbildung 41 zeigt den Teilentladungsprüfstand bei SUMIDA.



Abbildung 41: Teilentladungsprüfstand

Die Teilentladungsuntersuchung ergab, dass das Einsetzen der Teilentladungen mit zusätzlicher Isolation erst bei deutlich höheren Spannungen im Vergleich zum Fall ohne zusätzliche Isolation auftritt.

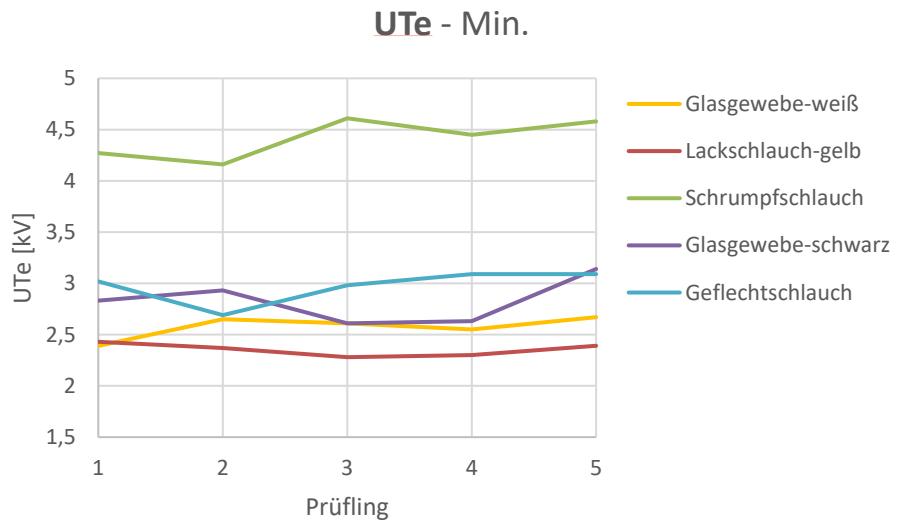


Abbildung 42: Einsetzspannung der Teilentladung

Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der Messungen am Teilentladungsmessplatz. Die Einsetzspannung mit Isolation durch Glasgewebeschläuchen lag oberhalb von 2,5 kV. Die beste Isolationswirkung hatte die Isolation durch den getesteten Schrumpfschlauch.

Da die Isolation der langen Leitungen mit Schrumpfbauteilen praktisch nicht durchführbar ist, wurden die Zuleitungen für den Teststand Stammestraße 2 erneut aufgebaut und mit Glasgewebebeschlauch isoliert.

Abbildung 43 zeigt einen Teil der aufgebauten Zuleitungen zum Austausch am Teststand Stammestraße 2. Die Anschlussleitungen wurden dem Projektpartner HsH zur Verfügung gestellt und zusammen mit dem Projektpartner TUBS eingebaut.

Zusätzlich wurden zwei Leitungen mit ca. 25 m Länge an den Projektpartner EDAG geliefert. Ein Test der Leitungen im Labor bestätigte die Haltbarkeit der Leitungen im Betrieb.



Abbildung 43: Zuleitungen zum Austausch Stammestraße 2

Betrachtung gängiger Normen für das System „Primärseitiger Aufbau“

Eine direkt anwendbare Norm für den Anwendungsfall der Zuleitungen wie im Projekt LaneCharge existiert aktuell nicht. Die Kombination aus Spannung (2,5 kV) und Frequenz (85 kHz) wird von aktuellen Vorschriften nicht direkt abgebildet. Als Grundlage der Bewertung wurde die Norm EN 60664 herangezogen. Danach ist ein System sicher zu betreiben, wenn es eine „Basisisolierung“ und eine „Erdung“ aufweist. Wenn diese Isolationsschichten nachweislich das gesamte System umschließen, kann es als „Blackbox“ angesehen werden. Für den sicheren Betrieb sind dann nur die Bedingungen am Ein- und gegebenenfalls am Ausgang zu betrachten.

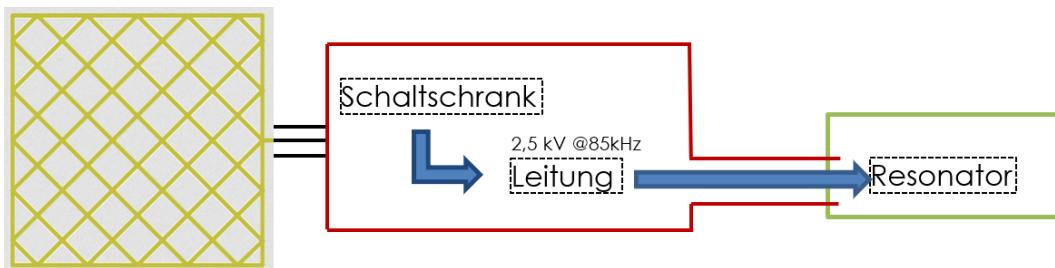


Abbildung 44: Darstellung des primärseitigen elektrischen Systems

Abbildung 44 zeigt den primärseitigen elektrischen Aufbau schematisch. Der Schaltschrank ist am öffentlichen Netz angeschlossen. An der Anschlussstelle liegt eine 400 V-Wechselspannung mit 50 Hz an. Die Elektronik des Schaltschranks mündet in die Zuleitung und diese endet am asphaltintegrierten Resonator. Die Elektronik vom Netzanschluss bis zum Resonator (inkl. Zuleitung) ist von der Basisisolierung und der Erdung umschlossen (rote Umrandung). Wenn die genutzte Isolation die Bedingungen der EN 60664 für Basisisolierung bzw. Erdung erfüllen, sind für den Normen gerechten Betrieb die Bedingungen am Netzeingang entscheidend.

Ableitung eines Testplans für die Klassifizierung der genutzten Isolation nach EN 60664

Die vorhandenen Bedingungen (Spannungshöhe und Frequenz) werden in der Norm EN 60664 nicht direkt abgebildet. Für die Festlegung eines Prüfplans wurden die entsprechenden Prüfgrößen der Norm an den Use-Case angepasst.

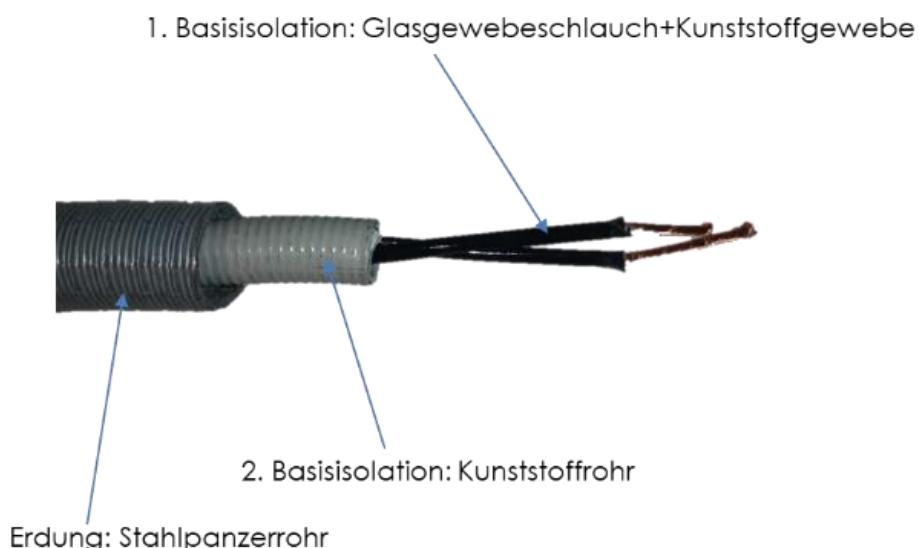


Abbildung 45: Aufbau der Leitung zwischen Schaltschrank und asphaltintegriertem Resonator

Abbildung 45 zeigt den Aufbau der Verbindungsleitungen bestehend aus Hin- und Rückleiter, einer ersten Isolation (Glasgewebebeschlauch und Kunststoffgewebe), einer zweiten Isolation (Kunststoffrohr) und einer Erdung (Stahlpanzerrohr). Um die eingesetzten Materialien nach EN 60664 als Basisisolierung bzw. Erdung zu klassifizieren wurde ein Prüfplan erstellt und die entsprechenden Prüfungen durchgeführt.

Tabelle 16: Prüfplan zur Klassifizierung "Basisisolierung" in Anlehnung an EN 60664

Prüfung	Grenzwert
Teilentladung	Aussetzspannung > 3,5 kV mit 10 pC
Stoßspannung	7,4 kV
Hochspannung	5 kV@50 Hz für 1 min
E-Feld	Rechnung: Abstand zum Leiter min. 1,77 mm

Tabelle 17: Prüfplan zur Klassifizierung als "Erdung" in Anlehnung an EN 60664

Prüfung	Grenzwert
Leitfähigkeit	R < 0,1 Ohm

Prüfung des eingesetzten Kunststoffrohrs als Basisisolierung

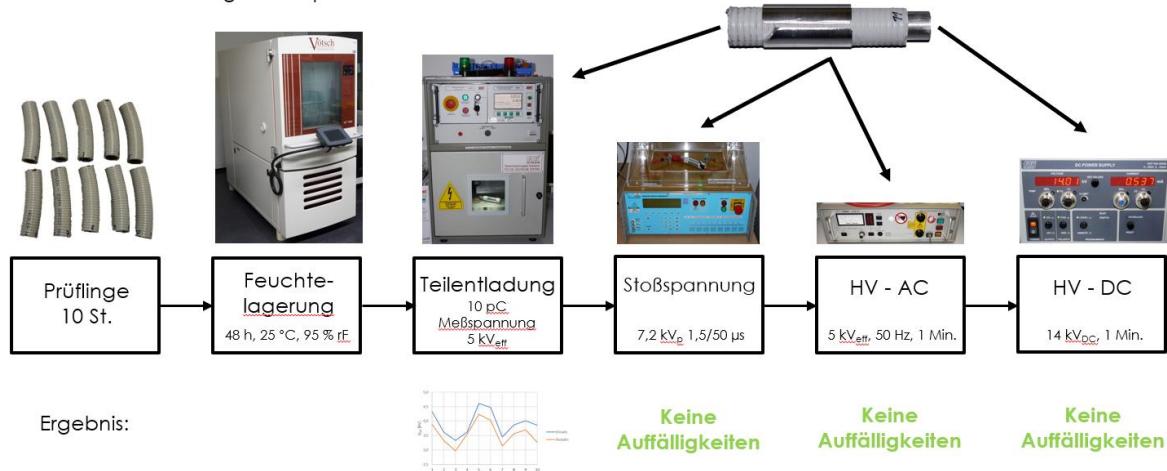


Abbildung 46 Übersicht der durchgeföhrten Prüfungen mit der Basisisolierung 1: Kunststoffrohr

Abbildung 46 zeigt die durchgeföhrten Prüfungen am Kunststoffrohr. Die untersuchte Isolation konnte alle Tests erfolgreich bestehen und kann in Anlehnung an EN 60664 als Basisisolierung bezeichnet werden.

Prüfung der eingesetzten Kombination aus Glasgewebebeschlauch und Kunststoffgewebe als Basisisolierung

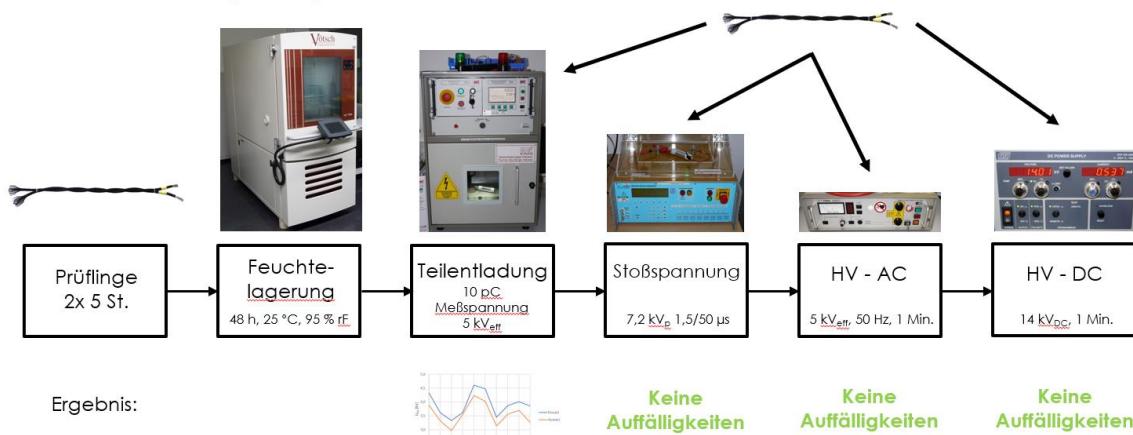


Abbildung 47: Übersicht der durchgeföhrten Prüfungen mit der Isolation 2: Glasgewebebeschlauch und Kunststoffgewebe

Abbildung 47 zeigt die durchgeföhrten Prüfungen an der Kombination Glasgewebebeschlauch und Kunststoffgewebe. Die untersuchte Isolation konnte alle Tests erfolgreich bestehen und kann in Anlehnung an EN 60664 als Basisisolierung bezeichnet werden.

Prüfung des eingesetzten Stahlpanzerrohrs als Erdung

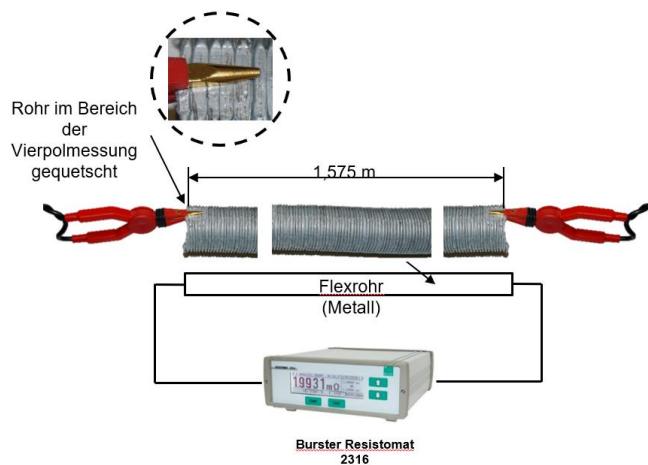


Abbildung 48: Prüfung des Stahlpanzerrohrs als Erdung

Abbildung 48 zeigt die Untersuchung des eingesetzten Rohres als Erdung. Die Untersuchung ergab, dass das Rohr als Erdung in Anlehnung an EN 60664 bezeichnet werden kann. Voraussetzung ist die Sicherstellung der schaltschrankseitigen ordentlichen Anbindung an die Erdung.

Die Untersuchungen der Normenlage und der eingesetzten Isolationen lassen einen sicheren Betrieb der elektrischen Aufbauten zu. Die Anforderungen der Norm EN 60664 konnten mit zwei Basisisolierungen und einer Erdungsschicht übertroffen werden. Dabei ist immer zu beachten, dass die Norm für den vorliegenden Anwendungsfall abgeleitet werden musste. Dies ist ein gängiges Vorgehen und durch die Untersuchungen konnte seitens SUMIDA der Betrieb des Systems als sicher eingeschätzt werden.

Übersicht und weitere entwickelte und gelieferte induktive Bauelemente primärseitig

Neben den bereits ausführlich beschriebenen Entwicklungsprozessen für die bodenseitigen Resonatorgeometrien wurden weitere induktive Bauelemente entwickelt und aufgebaut.

Induktivität für die PFC-Stufe vor der Übertragerstrecke

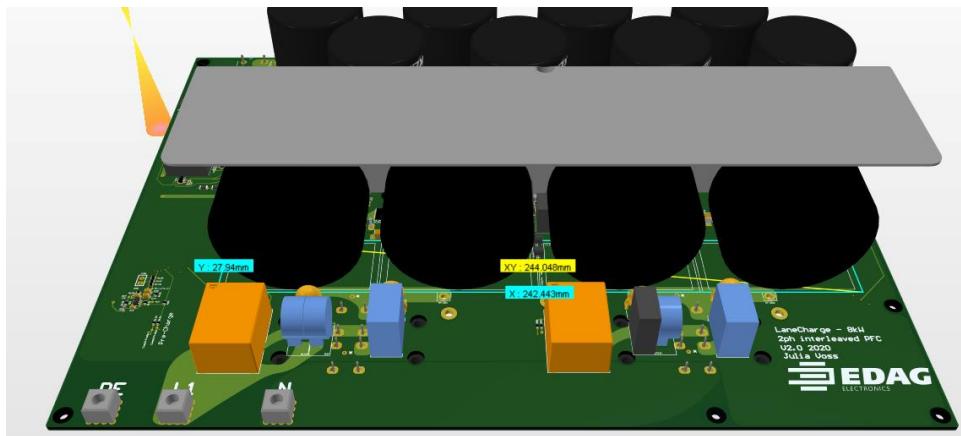


Abbildung 49: PFC-Stufe Platine von EDAG mit Ringkerndrosseln (Quelle: EDAG)

Der Projektpartner EDAG entschied sich dafür die notwendige Eingangs-PFC-Stufe für LaneCharge selbst zu entwickeln und aufzubauen. Darin enthalten sind zwei parallele Leistungszweige mit jeweils zwei Induktivitäten. In Abbildung 49 sind die Induktivitäten mit bewickelten Ringkernen ausgeführt. Diese Ringkerndrosseln wurden durch Induktivitäten mit Ferritkern ersetzt. Ein Versuch, jeweils zwei Induktivitäten magnetisch zu koppeln (vgl. Abbildung 51) und mit einem Bauteil auszuführen, erwies sich als möglich, jedoch stand der komplexere Aufbau nicht im Verhältnis zu den Vorteilen einer gekoppelten Aufbauweise.

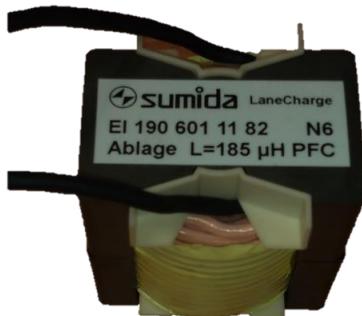


Abbildung 50: PFC-Induktivität (EI 190 601 11 84)

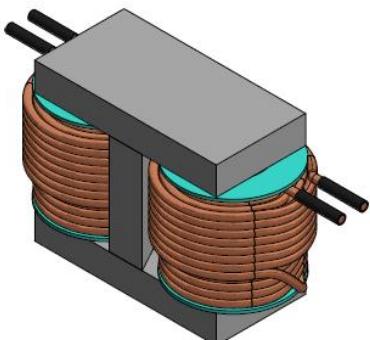


Abbildung 51: Gekoppelte Variante der PFC-Drossel (EI 190 601 11 83)

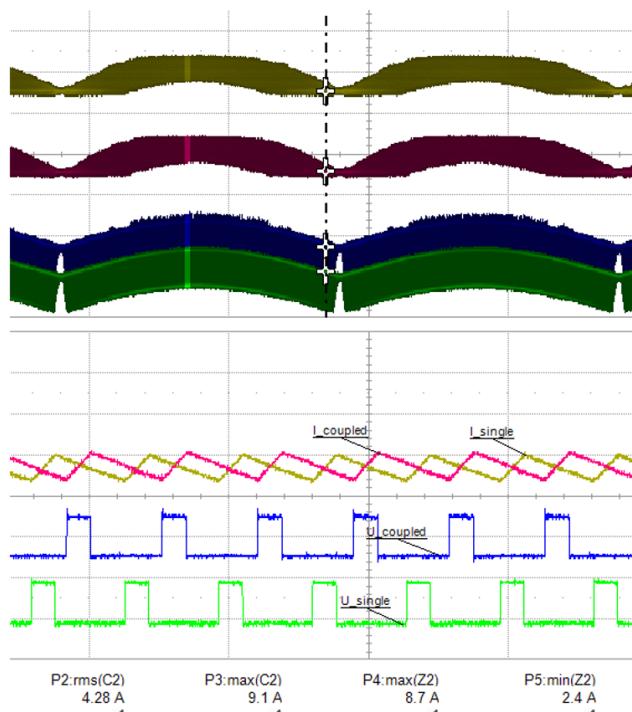


Abbildung 52: Stromformen Vergleich zwischen gekoppelter und diskreter Aufbauform der PFC-Drosseln (Quelle: EDAG)

Beim Projektpartner EDAG wurde die gekoppelte Variante und die Variante mit diskreten Drosseln betrieben und verglichen. Abbildung 52 zeigt Messkurven der Ströme. Für die benötigten PFC-Stufen wurden jeweils vier diskrete PFC-Drosseln (EI 190 601 11 84) aufgebaut und dem Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Übersicht über entwickelte, gelieferte und verbaute Induktivitäten der Bodenseite

Tabelle 18: Übersicht induktive Bauelemente der Bodenseite in LaneCharge

Nummer	Beschreibung	Verbauort
EI 190 601 11 11	Zirkularresonator	Stammestraße 1
EI 190 601 11 12	Zirkularresonator	Stammestraße 1
EI 190 601 11 21	DS-Resonator	Stammestraße 1
EI 190 601 11 22	DS-Resonator	Stammestraße 1
EI 190 601 11 31	DD-Resonator	Stammestraße 1
EI 190 601 11 32	DD-Resonator	Stammestraße 1
EI 190 601 11 33	DD-Resonator V2	Stammestraße 2
EI 190 601 11 34	DD-Resonator V3	Stammestraße 2
EI 190 601 11 41	DD-Resonator 7,5 kW	Stammestraße 1
EI 190 601 11 42	DD-Resonator 7,5 kW	Stammestraße 1
EI 190 601 11 75	Eingangs/Ausgangsinduktivität	Stammestraße 1 und 2
EI 190 601 11 81	PFC-Drossel	
EI 190 601 11 82	PFC-Drossel	
EI 190 601 11 83	PFC-Drossel gekoppelt	
EI 190 601 11 84	PFC-Drossel	PFC-Stufe
EI 190 601 11 85	PFC-Drossel	

2. AP LC-23-02: Entwicklung der sekundärseitigen Spulengeometrie

Das AP LC-23-02 beinhaltet die Entwicklung der sekundärseitigen Spulengeometrie. Da eine Übertragerstrecke nur im Gesamten entwickelt und untersucht werden kann, war das Arbeitspaket sehr eng mit AP LC-23-01 verknüpft.

2.1. AP LC-23-02.1 Erstellung eines Lastenhefts und Anforderungsprofils fahrzeugseitige Resonatorspule in Abstimmung mit EDAG

Für die Erstellung des Lastenhefts für den fahrzeugseitigen Resonator wurde zunächst die sekundäre Regelung betrachtet

Sekundärseitige Regelung

Um die Leistungsaufnahme der Schaltung zu begrenzen, sind mehrere regelungstechnische Möglichkeiten vorhanden. Üblich ist eine primärseitige Regelung durch Spannungsanpassung, Frequenzanpassung oder Anpassung des Duty Cycle im Wechselrichter. Die primärseitige Regelung hat den Nachteil, dass Informationen vom Ausgang der Schaltung zum eingangsseitigen Wechselrichter zurückgeführt werden müssen. Außerdem kann nur eine Sekundärseite den Arbeitspunkt bestimmen. Wenn, wie in LaneCharge vorgesehen, mehrere Fahrzeuge mit einer Leistungselektronik geladen werden sollen, dann kann nur eines beider Fahrzeuge mit voller Leistung geladen werden. Um diese Nachteile zu umgehen, wurde im Projekt die Möglichkeit der sekundärseitigen Regelung untersucht. Dafür wurden zwei Dioden des ausgangsseitigen Gleichrichters durch Halbleiter ersetzt. Steigt die Ausgangsspannung und gleichzeitig die Leistungsaufnahme über einen festgelegten Sollwert, werden die Halbleiter angesteuert und dadurch der sekundärseitige Schwingkreis stark verstimmt. Dadurch sinkt sowohl die Ausgangsleistung als auch die aufgenommene Leistung ab. Abbildung 53 zeigt den Schaltungsaufbau mit Regelung.

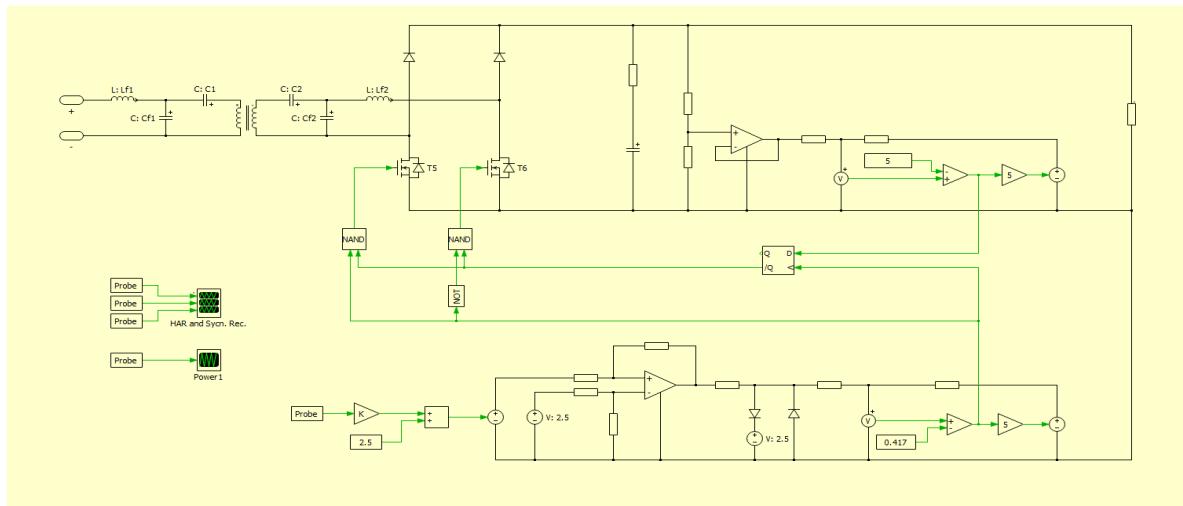


Abbildung 53: Schaltungsaufbau mit Regelung aus der Simulation von EDAG (Quelle: EDAG)

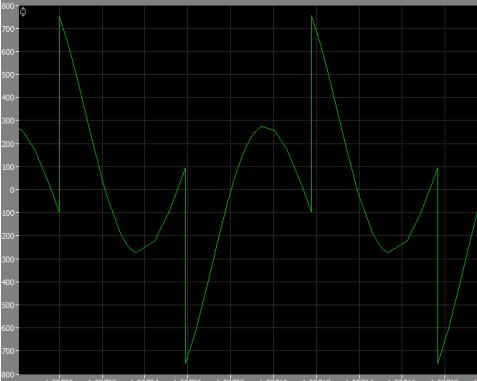
Lastenheft fahrzeugseitiger Resonator und Filterdrossel

Die Anforderungen an den fahrzeugseitigen Resonator und die Filterdrosseln ergeben sich aus verschiedenen elektrischen und schaltungstechnischen Randbedingungen. Ein System zur induktiven Energieübertragung muss immer im Ganzen betrachtet werden. Deshalb wurden die Anforderungen an die fahrzeugseitige Resonatorspule und die Filterdrosseln im Arbeitspaket LC-23-01 genauer untersucht und beschrieben. Tabelle 19 und Tabelle 20 fassen die Anforderungen zusammen.

Tabelle 19: Lastenheft Resonator Fahrzeugseite

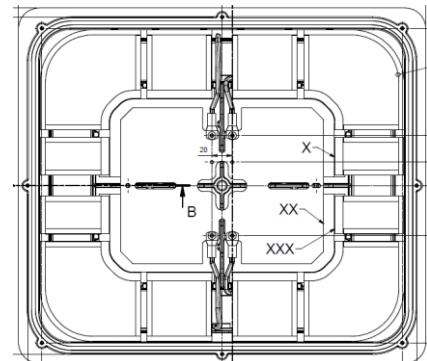
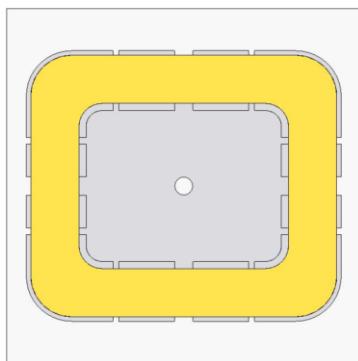
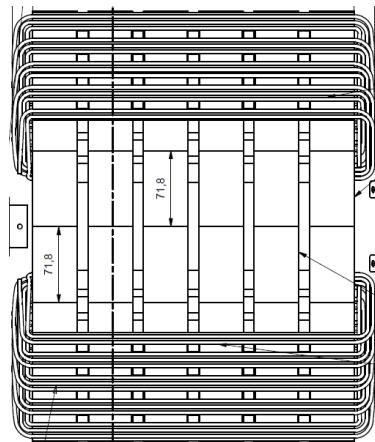
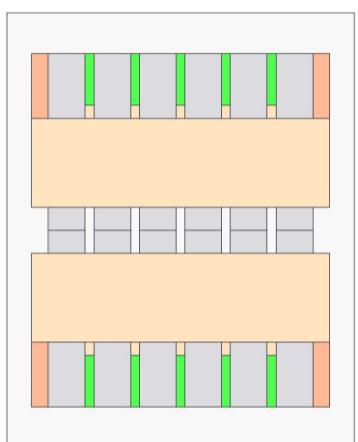
Resonator Bodenseite L_{FS} (EI 190 601 11 51)		
Bauteilwert	L ₂	> 180 µH
Maximale Spitzenspannung (peak-to-peak)	U _{pp,max}	4,8 kV
Maximale Effektivspannung	U _{RMS,max}	1,6 kV
Maximaler Spitzенstrom (peak-to-peak)	I _{pp,max}	48 A
Maximaler Effektivstrom	I _{RMS,max}	16,8 A
Strom und Spannungsform	annähernd ideale Sinusform	

Tabelle 20: Lastenheft Filterdrosseln

Resonator Bodenseite L_f (EI 190 601 11 61)		
Bauteilwert	L_f	42 μ H
Maximale Spitzenspannung (peak-to-peak)	$U_{pp,max}$	1,6 kV
Maximaler Spitzenstrom (peak-to-peak)	$I_{pp,max}$	32 A
Maximaler Effektivstrom	$I_{RMS,max}$	ca. 11,5 A
Stromform		
Spannungsform		

2.2. AP LC-23-02.2 Magnetische und elektrische Simulation und Auslegung verschiedener Spulenkonzepte (zirkular, DD, Doppel-S etc.)

Auf der Fahrzeugseite wurden zwei verschiedene Aufbau Formen des Resonators simuliert: ein zirkuläres System und ein DS-System. Die folgenden Abbildungen zeigen die vereinfachten Simulationsmodelle und eine Skizze des späteren Aufbaus.

**Abbildung 54: Zeichnung und Simulationsmodell zirkular fahrzeugseitig**

Draufsicht

Bodenansicht

Abbildung 55: Zeichnung und Simulationsmodell Doppel-S fahrzeugseitig

Die magnetische und elektrische Simulation der sekundärseitigen Spulengeometrie erfolgte immer zusammen mit der primärseitigen Spule. Die Fortschritte sind deshalb im Bereich der Entwicklung der Primärseite mit beschrieben (vgl. AP LC-23-01.2).

Für die Steigerung der Effizienz des DS/DS- und des DD/DS-Systems wurde der sekundärseitige DS-Resonator im Laufe des Projekts immer weiterentwickelt (vgl. AP LC-23-01.2 und AP LC-23-01.4).

2.3. AP LC-23-02.3 Evaluierung und Simulation von geometrischen Schirmungseinflüssen im KFZ-Unterboden

Der Einfluss des Schirms wurde in AP LC-23-01.03 untersucht und beschrieben. Der fahrzeugseitige Resonator wurde mit einer entsprechenden Schirmung versehen. Zusätzlich wirkt der metallische Unterboden schirmend. Die Kopplung zwischen Primär- und Sekundärresonator ist dadurch in der Verbau Situation am Fahrzeug höher als im Labor ohne den Einfluss des Fahrzeugs. Dieser Effekt wurde bei der Auslegung der Resonatoren mitberücksichtigt. Bei der Inbetriebnahme des abschließenden Teststandes Stammestraße 2 zeigte sich, dass die Zielleistungsübertragung von 3,7 kW im Maximalversatz (100 mm/100 mm) ohne Regeleingriff sehr gut getroffen wurde. Der Einfluss des Fahrzeugs auf die Koppelverhältnisse ist von der Beschaffenheit des Unterbodens abhängig und muss entsprechend für Neuentwicklungen mitgedacht werden.

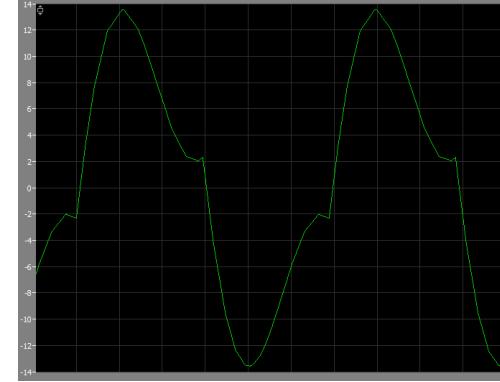
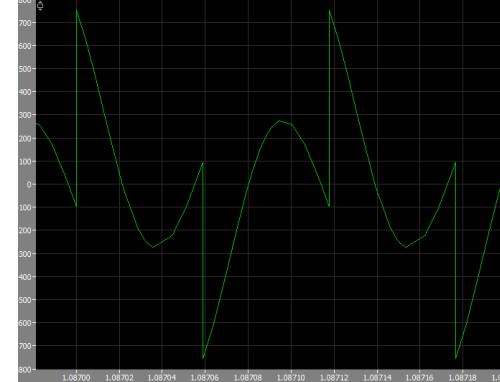
2.4. AP LC-23-02.4 Auswahl und Abstimmung eines elektrischen Parameterraums zum Betrieb im Kfz (mit EDAG)

Der elektrische Parameterraum ergibt sich aus der ausgewählten Topologie. Für SUMIDA sind dabei der sekundärseitige Resonator und die Filterinduktivität interessant. Die Anforderungen an diese Bauteile wurden im Lastenheft beschrieben. Zur Vollständigkeit werden die Inhalte nochmals dargestellt.

Tabelle 21: Lastenheft Resonator Fahrzeugseite

Resonator Fahrzeugseite L_{FS} (EI 190 601 11 51)		
Bauteilwert	L ₂	> 180 µH
Maximale Spitzenspannung (peak-to-peak)	U _{pp,max}	4,8 kV
Maximale Effektivspannung	U _{RMS,max}	1,6 kV
Maximaler Spitzenstrom (peak-to-peak)	I _{pp,max}	48 A
Maximaler Effektivstrom	I _{RMS,max}	16,8 A
Strom und Spannungsform	annähernd ideale Sinusform	

Tabelle 22: Lastenheft Filterdrossel

Resonator Bodenseite L_f (EI 190 601 11 71)		
Bauteilwert	L_f	ca. 42 μH
Maximale Spitzenspannung (peak-to-peak)	$U_{pp,max}$	1,6 kV
Maximaler Spitzenstrom (peak-to-peak)	$I_{pp,max}$	32 A
Maximaler Effektivstrom	$I_{RMS,max}$	ca. 11,5 A
Stromform		
Spannungsform		

2.5. AP LC-23-02.5 Erforschung von thermischen und entwärmungstechnischen Integrationsanforderungen (simulativ und prozesstechnisch am Kfz mit EDAG)

Neben dem fahrzeugseitigen Resonator musste die sekundärseitige Filterdrossel ins Fahrzeug integriert werden. Die Musteraufbauten EI 190 601 11 71 wurden simulationsunterstützt hinsichtlich Volume und Verlusten optimiert.

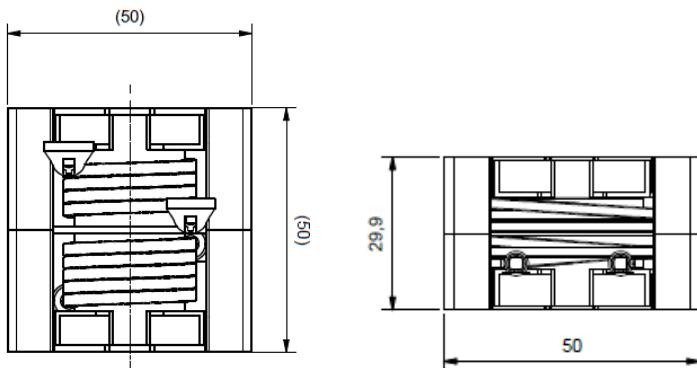


Abbildung 56: Größenvergleich der Filterdrossel EI 190 601 11 71 und EI 190 601 11 73

Abbildung 56 zeigt die alte und die neu entwickelte Drossel im Größenvergleich. Die Länge der Drossel konnte von 50 mm auf 29,9 mm verringert werden. Dies entspricht einer Volumenreduzierung um 40 %.

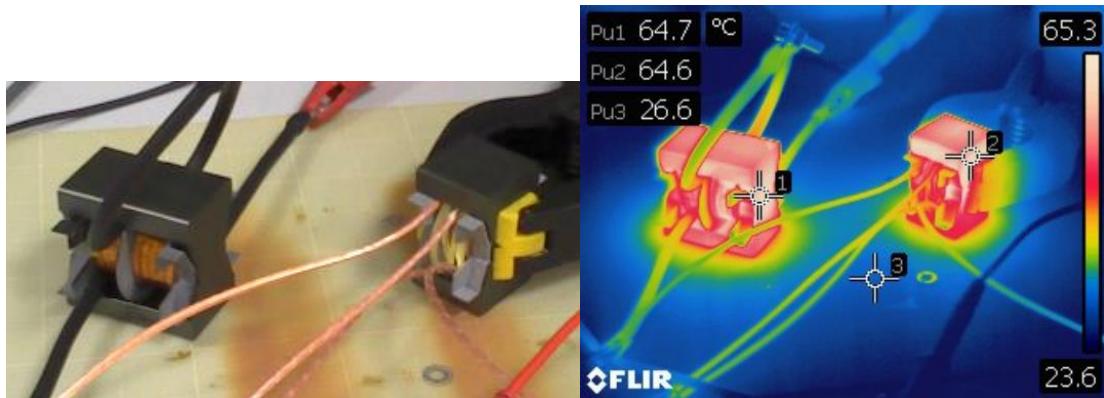


Abbildung 57: Erwärmungsbetrachtung EI 190 601 11 71 und EI 190 601 11 73

Um das Verlustverhalten der beiden Varianten zu bewerten, wurde ein Erwärmungstest durchgeführt. Dabei wurden beide Drosseln in Reihe geschalten mit einem dreieckförmigen Strom von 8,5 A bei 85 kHz betrieben. Nach dem Erreichen des thermischen Gleichgewichts wurde bei beiden Mustern die gleiche Endtemperatur festgestellt. Durch die deutlich kleinere Oberfläche der optimierten Variante muss entsprechend weniger Verlustleistung vorhanden sein. Die optimierte Variante wurde dem Projektpartner EDAG zur Verfügung gestellt. Funktionstests bei 3,5 kW Leistungsübertragung des Projektpartners ergaben eine Erwärmung um etwa 50 °C.

Beim Projektpartner EDAG wurden die Resonatoren ins Fahrzeug integriert, betrieben und untersucht. Dabei überstieg die Temperatur der ausgangsseitigen Drossel EI 190 601 11 73 den thermisch zugelassenen Bereich. Ursache war eine deutlich höhere Strombelastung bei starkem Regeleingriff als ursprünglich angenommen.

Daraus ergab sich eine neue Auslegung der Ausgangsdrossel. Die Spezifikation wurde entsprechend angepasst. Der fahrzeugseitige Resonator erwärmt sich nur geringfügig und es entstehen dadurch keine besonderen entwärmungstechnischen Anforderungen.

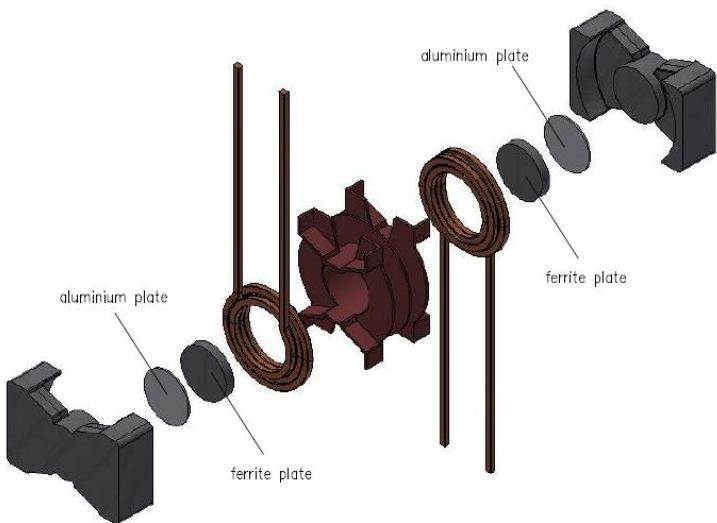


Abbildung 58: Explosionszeichnung der Filterinduktivität

2.6. AP LC-23-02.6 Erforschung einer automativen AVT (Integration Modulsystem und Gehäuse) mit EDAG

Für die Integration des sekundärseitigen Resonators ins Fahrzeug wurde ein Gehäuse entwickelt.

Erstellung eines Gehäuses für den fahrzeugseitigen Resonator

Der sekundärseitige Resonator wird unter dem Fahrzeug angebracht. Entsprechend muss er mittels eines Gehäuses vor Umwelteinflüssen geschützt werden. Der Resonator wird auf einer Trägerplatte aus Aluminium angebracht. Diese dient zusätzlich als Schirmung in Richtung Fahrzeug.

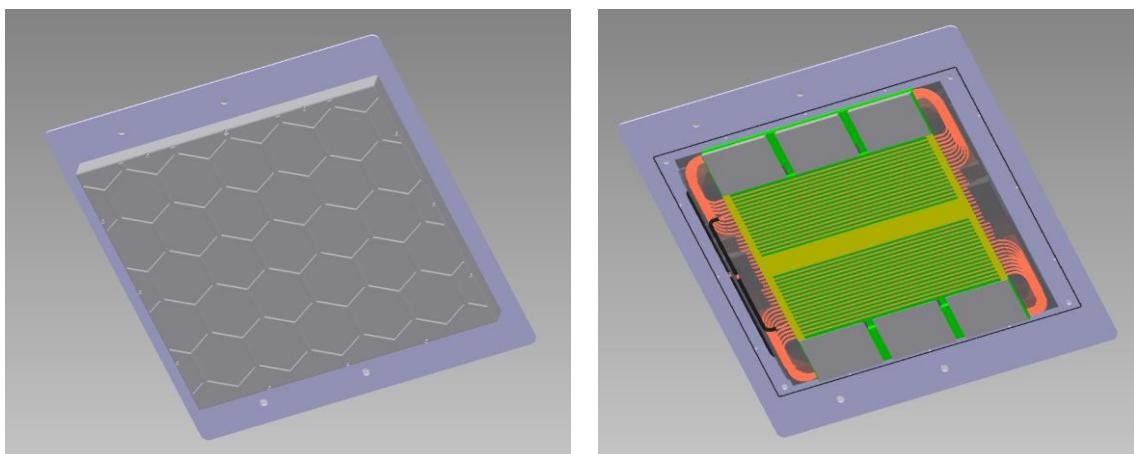


Abbildung 59: Konstruktion des fahrzeugseitigen Resonators mit Gehäuse (links) und ohne Gehäuse (rechts)

Abbildung 59 zeigt die Konstruktion des Resonators und des Gehäuses auf der Aluminiumträgerplatte. Diese enthält bereits Bohrungen zur Anbringung am Fahrzeugunterboden. Um das Eindringen von Feuchtigkeit in das Bauteil zu verhindern, wurde eine Gummidichtung

vorgesehen. Zusätzlich können die Hohlräume im Gehäuse mit Vergussmasse ausgefüllt werden. Durch die angepasste Form des Gehäuses an den Resonator konnte die notwendige Menge an Verguss minimal gewählt werden. Die Resonatoren wurden in das Gehäuse eingebracht, das Gehäuse an den Schirm angeschraubt und schließlich die Vergussmasse eingebracht. Beim Projektpartner EDAG wurde dieser Zusammenbau unter dem Fahrzeug angebracht.

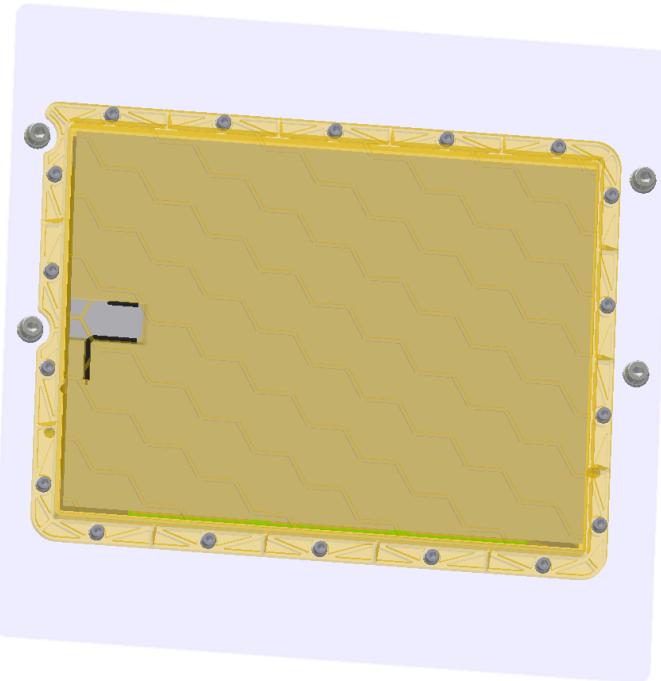


Abbildung 60: Fahrzeugseitiger Resonator mit Gehäuse und Schirm

2.7. AP LC-23-02.7 Messung/Prüfung von sicherheitsrelevanten Anforderungen (normative, gesetzlich) am Sekundärspulensystem

Für den sicheren Betrieb müssen sicherheitsrelevante Anforderungen eingehalten werden. Dabei spielen u. a. die elektromagnetischen Felder zwischen den Resonatoren eine wichtige Rolle. Sie können zur Erhitzung oder Entzündung von Fremdkörpern im Luftspalt führen.

Simulation der elektromagnetischen Felder zwischen den Resonatoren

Um die Verteilung der Felder im Luftspalt zu untersuchen, wurde eine 3D-FEM-Simulation mit der Software JMAG durchgeführt. Dabei konnten die Resonatoren nachgestellt und bei verschiedenen Versatzpunkten im Modell betrieben werden. Anschließend wurde die ermittelte Flussdichte im Zwischenraum in verschiedenen Ebenen betrachtet. Die Ergebnisse sind in Abbildung 61 und Abbildung 62 dargestellt.

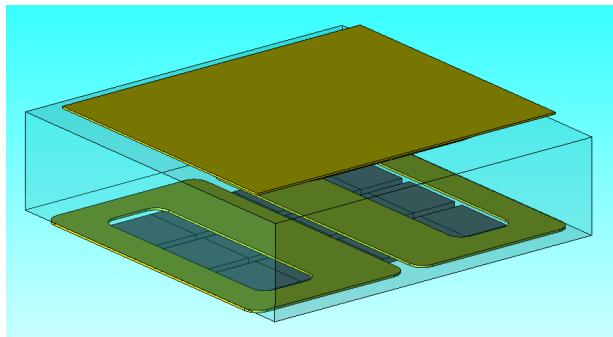


Abbildung 61: Simulationsmodell des DD/DS-Systems

Für die Betrachtung der Feldverteilung wurde die Flussdichte im Bereich 20 mm bis 30 mm Abstand zum bodenseitigen Resonator dargestellt. Diese Ebene entspricht der Schicht direkt über dem Asphalt.

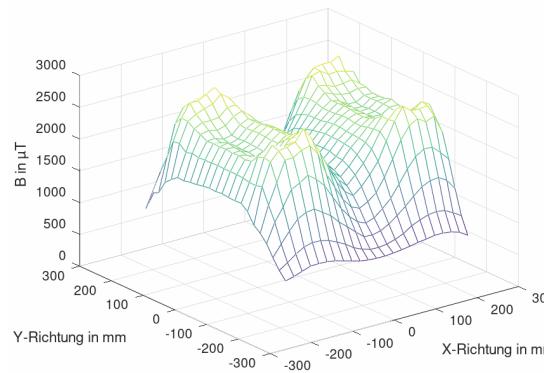
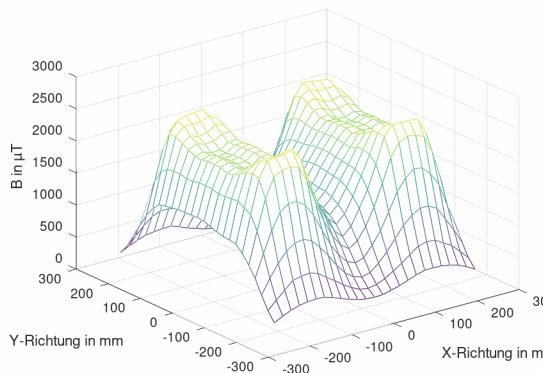


Abbildung 62: Flussdichteverteilung in 20 mm bis 30 mm Abstand zum bodenseitigen Resonator bei Nullversatz (0/0/130) (links) und voll Versatz (100/100/170) (rechts); DD/DS-System

Die Flussdichteverteilung bildet deutlich sichtbare Maxima und Minima. Diese befinden sich an den Austritts- bzw. Eintrittsflächen des Resonators (Ferritflächen in den planaren Wicklungen). Der Betrag der maximalen Flussdichte ändert sich nicht über den Versatz. Durch den geregelten Betrieb der Übertragerstrecke wird die Kopplungsänderung ausgeglichen und entsprechend in allen Versatzpunkten die gleiche Energiemenge übertragen. Entsprechend sind auch die Beträge der Felder im Luftspalt gleich.

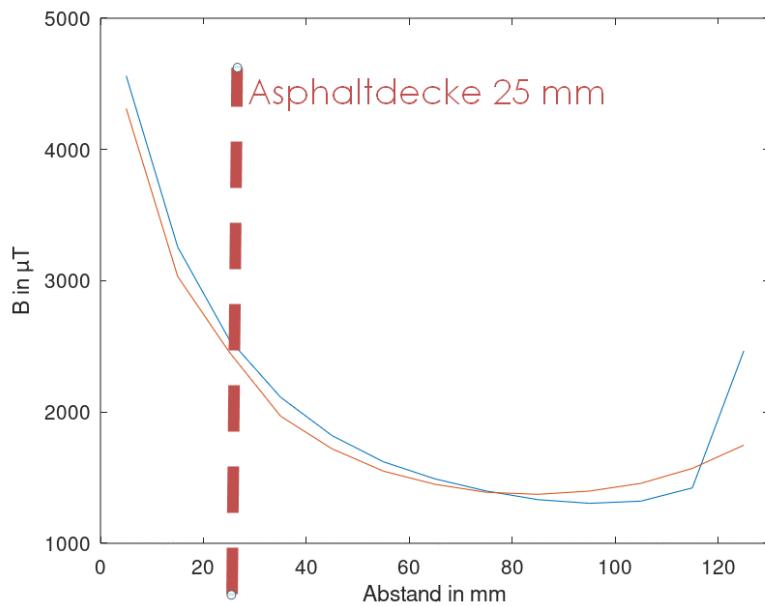


Abbildung 63: Maximale mittlere Flussdichte in Abhängigkeit des Abstands zum bodenseitigen Resonator bei Maximalversatz (rot) und Nullversatz (blau)

Die Flussdichte im Luftspalt nimmt mit dem Abstand zum bodenseitigen Resonator ab (vgl. Abbildung 63) für die Vermeidung von Erwärmung von Fremdkörpern im Luftspalt kann es entsprechend sinnvoll sein, den primären Resonator möglichst tief in den Asphalt einzubringen. Vorausgesetzt, die damit einhergehende Minderung der Kopplung stellt kein Problem dar.

Die Simulation des zirkularen Systems ergab analoge Ergebnisse (vgl. Abbildung 64 und Abbildung 65)

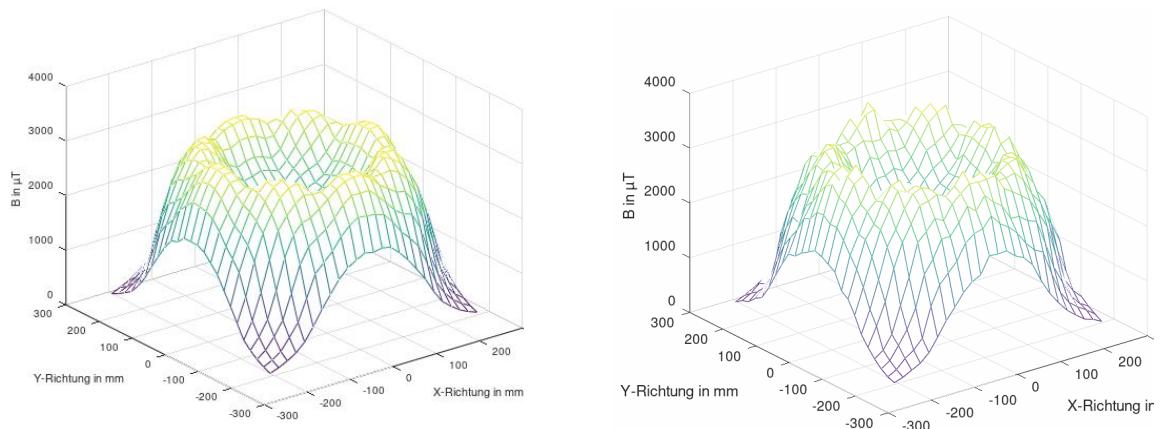


Abbildung 64: Flussdichteverteilung in 20 mm bis 30 mm Abstand zum bodenseitigen Resonator bei Nullversatz (0/0/130) (links) und voll Versatz (100/100/170) (rechts)

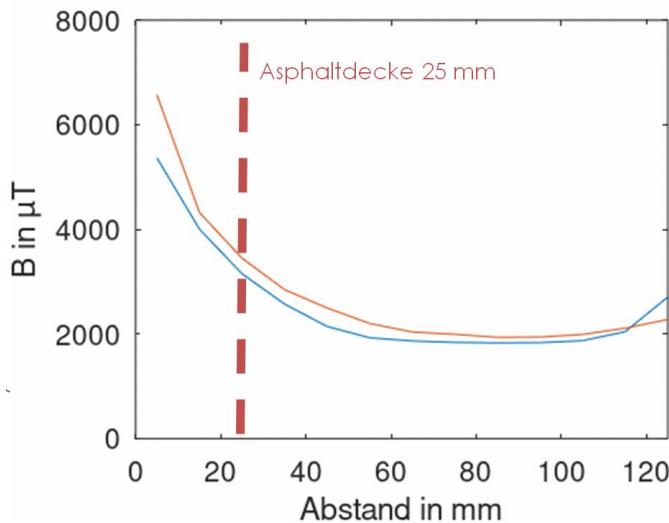


Abbildung 65: Maximale mittlere Flussdichte in Abhängigkeit des Abstands zum bodenseitigen Resonator bei Maximalversatz (rot) und Nullversatz (blau)

Ein Vergleich der beiden untersuchten Systeme (DD/DS und Zirkular/Zirkular) ergibt, dass die maximale mittlere Flussdichte im zirkularen System etwas größer als im DS/DD-System ist. Dabei muss aber bedacht werden, dass diese Ergebnisse mittels elektrischer und magnetischer Simulation entstanden sind und deshalb lediglich eine qualitative Betrachtung möglich ist (vgl. Abbildung 66).

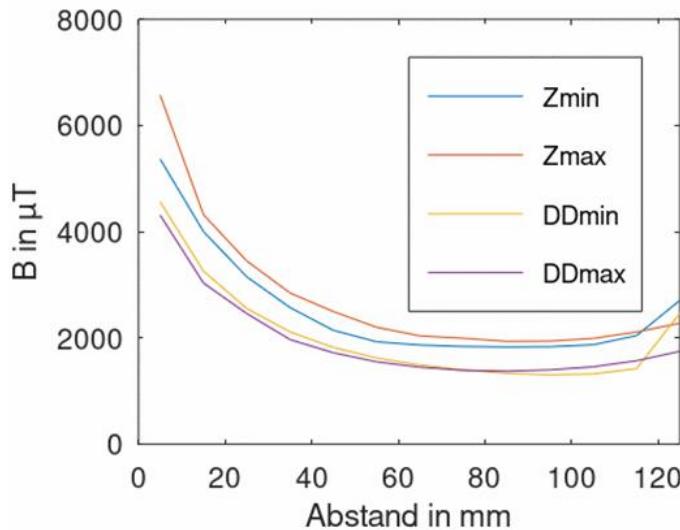


Abbildung 66: Vergleich der maximalen Flussdichte der verschiedenen Systeme in Abhängigkeit des Abstands zum primären Resonator

Weitere induktive Bauelemente

Während des Projekts wurden weitere induktive Bauelemente entwickelt und aufgebaut. Diese Entwicklungen werden im Folgenden stark zusammengefasst dargestellt, weil sie nicht im Zentrum des ursprünglichen Forschungsaufwands lagen.

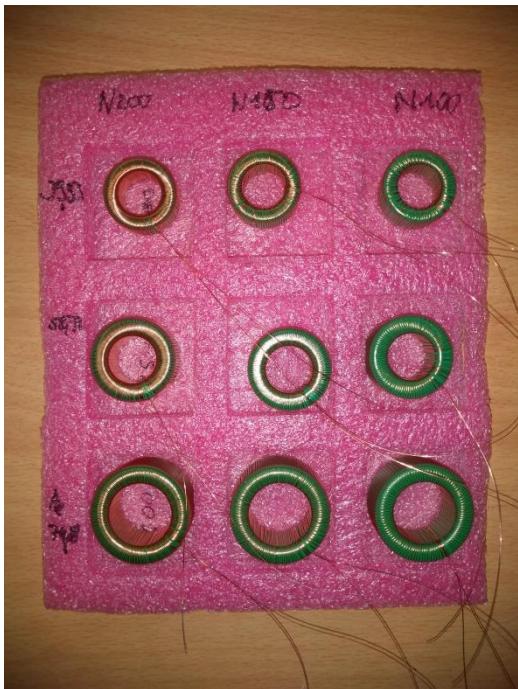


Abbildung 67: Ringkerndrossel EI 190 601 11 99 für die Erkennung des Stromnulldurchgangs

Abbildung 67 zeigt eine Auswahl an Ringkerndrosseln. Sie wurden vom Projektpartner EDAG für eine innovative Schaltungsanordnung eingesetzt, die den Nulldurchgang des Stromes auf der Sekundärseite der Übertragerstrecke detektiert. Die Schaltung befindet sich aktuell in der Patentierungsphase.

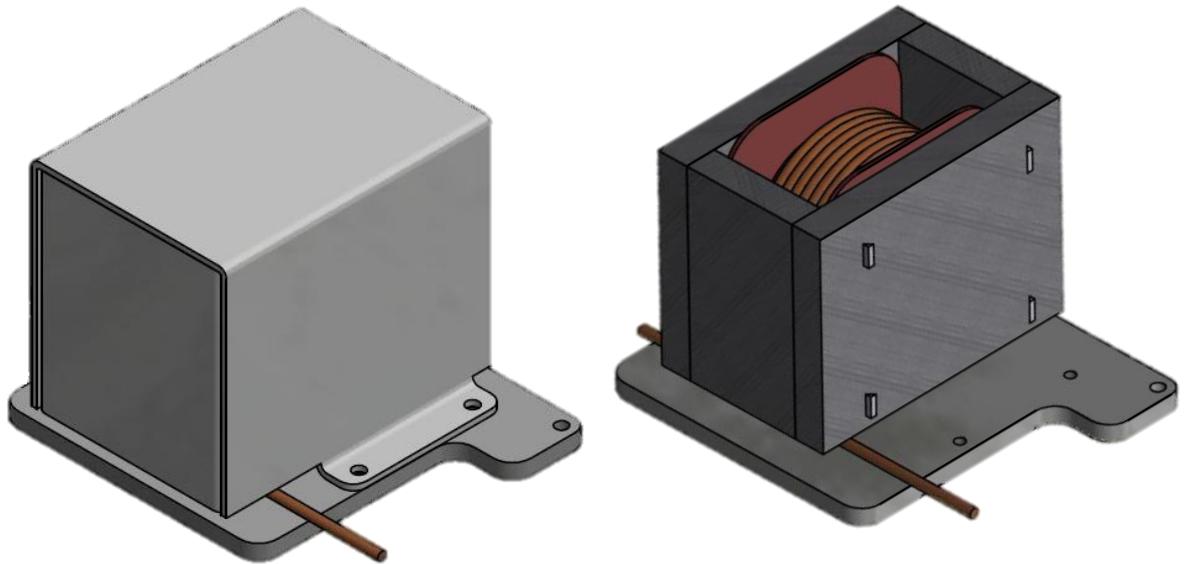


Abbildung 68: Wechselrichterinduktivität EI 190 601 11 95

Abbildung 68 zeigt die Induktivität für den im Fahrzeugeingebauten Wechselrichter. Für die Entwicklung wurden fünf verschiedene Induktivitäten untersucht und aufgebaut. Die Abbildung zeigt links das für den Einbau fertige Bauteil inklusive Gehäuse und Grundplatte zur elektromagnetischen Abschirmung und thermischen Anbindung. Rechts sind das Gehäuse und der Verguss ausgeblendet.

3. AP LC-30-03 Aufbau der primärseitigen Spulengeometrie

Das AP LC-30-03 gliedert sich in sieben Teilarbeitspakete. Es beinhaltet verschiedene Themen zum primärseitigen Resonator und endet mit dem Einbau in den Asphalt.

3.1. AP LC-30-03.1 Auswahl und Beschaffung von Komponenten und Materialien zum Aufbau einer straßenintegrierten Primärspulenlösung

Für den Aufbau wurden Materialien ausgewählt und beschafft. Dazu zählen ausgewählte Litzen mit sehr guten Hochfrequenzeigenschaften durch besondere Anordnung der Adern. Dabei darf das Litzenbündel keinen Mittelstrang ausbilden, da sonst Ausgleichsströme auf Grund der Magnetfelder entstehen.

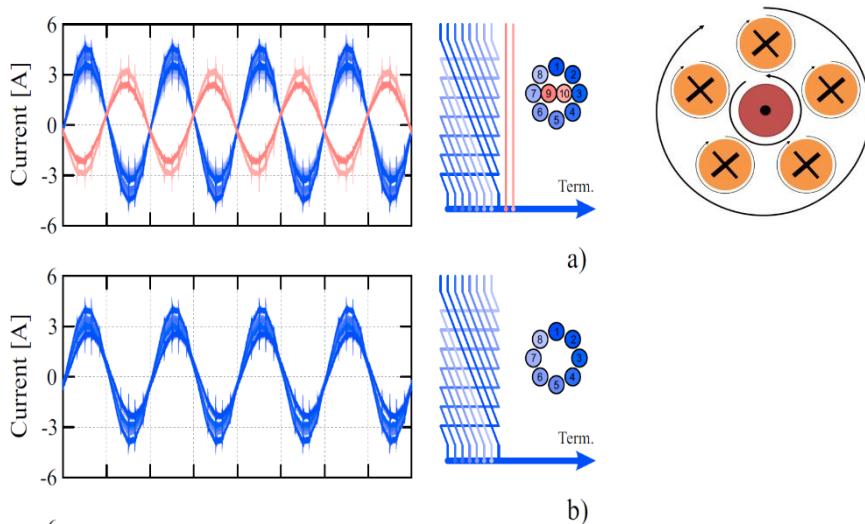


Abbildung 69: Strommessung in Litzen mit und ohne Mittelstrang

Abbildung 69 zeigt eine Messung von Litzen mit (a)) und ohne (b)) Mittelstrang. Durch die Anordnung der Magnetfelder (vgl. Graphik rechts) ergibt sich ein Stromfluss entgegen der Leistungsrichtung. Diese Blindströme werden nur bei der Betrachtung der einzelnen Strangströme sichtbar. Sie verursachen Verluste und sind deshalb unbedingt zu vermeiden. Um dies zu erreichen, wird die Litze genau spezifiziert und entsprechend beim Hersteller bestellt.

2. Litzen Verseilung / litz configuration						
Nr. no.	Basis base	Anzahl count	Schlagrichtung twist direction*	Schlaglänge twist length	toleranz tolerance	
1	0.071mm	x	40	S	20 mm	-2 mm
					+2 mm	+2 mm
2	40x0.071mm	x	5	S	20 mm	-2 mm
					+2 mm	+2 mm
3	5x40x0.071mm	x	4	Z	30 mm	-3 mm
					+3 mm	+3 mm
4						
5						

*definition twist direction

litz process

resulting litz cross section

keine Zentralstrangfertigung in der letzten Verseilung (nicht konzentrischer Aufbau)
no centered strain allowed at last twist process (non concentric)
800 (40x5x4) x 0.071mm

Abbildung 70: Beispiel einer Litzenspezifikation

Für die Auswahl eines passenden Kernmaterials wurden die Einflüsse und Randbedingungen, die das Kernmaterial beeinflussen, untersucht. Für die Anwendung im Resonator ist eine hohe Permeabilität bei möglichst geringen Hystereseverlusten und einem hohen spezifischen

Widerstand anzustreben. Auf dieser Grundlage wurde das SUMIDA-Material Fi395 ausgewählt. Es besticht durch einen großen Temperaturbereich mit niedrigen Hystereseverlusten sowie geringen dielektrischen Verlusten und ist somit entsprechend gut geeignet.

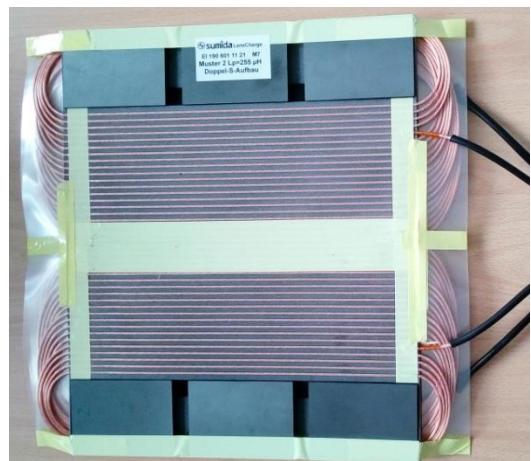
Die Ergebnisse der Untersuchungen aus AP LC-23-01.5 wurden in die Materialbeschaffung einbezogen und Prototypen aufgebaut. Nach dem Einbau in Stammestraße 1 und der erfolgten Inbetriebnahme konnte die Annahme der ausreichenden Robustheit der ausgewählten Materialien für den Asphaltierungsprozess bestätigt werden. Entsprechend wurden die Materialien ebenfalls am Teststand Stammestraße 2 eingebaut.

3.2. AP LC-30-03.2 Aufbau und Test (mechanisch und elektrisch/magnetisch von Prototypen (iterativ)

Für die Einbindung der Prototypen in die elektrische Umgebung und die Erprobung des elektrischen Verhaltens wurden Prototypen in zirkularer, DS- und DD-Bauform entwickelt, aufgebaut und an den Projektpartner EDAG übermittelt. Abbildung 71 zeigt sechs primärseitige Resonatoren.



Resonator: Zirkular



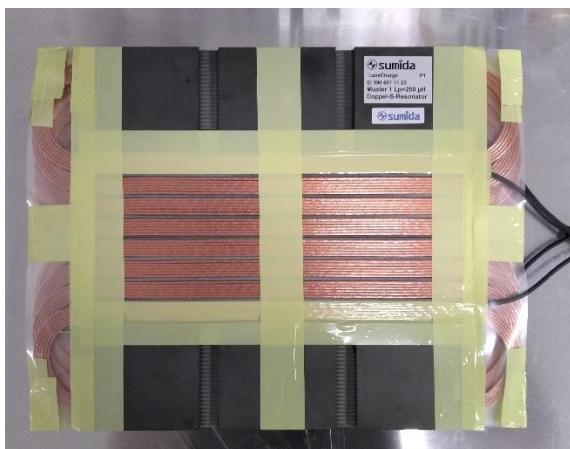
Resonator: DS V1



Resonator: DD V1



Resonator DD 7,2 kW



Resonator DS V2



Resonator DD V2

Abbildung 71: Primärseitige Resonatoren

Für die Untersuchung im Labor beim Projektpartner EDAG wurden zwei weitere Muster entwickelt, aufgebaut und geliefert. Ziel der Neuauslegung war eine Minderung der Kopplung. Dies begrenzt den notwendigen Regeleingriff im Arbeitspunkt mit maximaler Kopplung. Die finalen Resonatoren DD (EI 190 601 11 34) wurden im Labor erfolgreich betrieben und bei der Baumaßnahme Stammesstraße 2 in den Asphalt eingebracht. Neben den Resonatoren wurden weitere induktive Bauteile erstellt, optimiert und dem Projektpartner zur Verfügung gestellt.

Tabelle 23: Entwickelt und gelieferte induktive Bauteile

Bauteilnummer	Bezeichnung
EI 190 601 11 11	Primärseitiger Resonator Zirkular
EI 190 601 11 12	Primärseitiger Resonator Zirkular Asphaltmuster
EI 190 601 11 21	Primärseitiger Resonator DS
EI 190 601 11 22	Primärseitiger Resonator DS Asphaltmuster
EI 190 601 11 23	Primärseitiger Resonator DS V2
EI 190 601 11 24	Primärseitiger Resonator DS V3
EI 190 601 11 31	Primärseitiger Resonator DD
EI 190 601 11 32	Primärseitiger Resonator DD Asphaltmuster
EI 190 601 11 33	Primärseitiger Resonator DD V2
EI 190 601 11 34	Primärseitiger Resonator DD V3
EI 190 601 11 41	Primärseitiger Resonator DD 7,2 kW
EI 190 601 11 42	Primärseitiger Resonator DD 7,2 kW Asphaltmuster
EI 190 601 11 51	Sekundärseitiger Resonator Zirkular
EI 190 601 11 71	Filterdrossel 35 µH
EI 190 601 11 72	Filterdrossel 39 µH
EI 190 601 11 73	Filterdrossel 35 µH optimiert
EI 190 601 11 74	Filterdrossel 7,2 kW-System
EI 190 601 11 81	WR-Drossel 170 µH / 32 A
EI 190 601 11 82	PFC-Drossel
EI 190 601 11 83	PFC-Drossel Interleaved
EI 190 601 11 84	PFC-Drossel
EI 190 601 11 85	PFC-Drossel
EI 190 601 11 91	WR-Drossel 280 µH / 32 A
EI 190 601 11 92	WR-Drossel 280 µH / 16 A
EI 190 601 11 93	WR-Drossel 280 µH / 16 A optimiert
EI 190 601 11 94	WR-Drossel 275 µH / 16 A optimiert

Die hervorgehobenen Bauteile wurden im Teststand Stammestraße 2 erfolgreich eingebaut und getestet.

3.3. AP LC-30-03.3 Charakterisierung von elektrischen, thermischen und magnetischen Eigenschaften

Jedes induktive Bauelement wurde mittels Kleinsignalmessung untersucht und charakterisiert. Dabei wurden wichtige Parameter ermittelt und festgehalten (z. B. Induktivität, Gleichstromwiderstand, Frequenzwiderstand, Phasengang, Kopplung etc.) Für die Untersuchung des thermischen Verhaltens ist der Betrieb in anwendungsnahen Betriebspunkten notwendig. Diese Untersuchungen wurden beim Projektpartner EDAG durchgeführt. Sie zeigen Verbesserungspotentiale auf und ermöglichen die Verhinderung lokaler Hotspots.

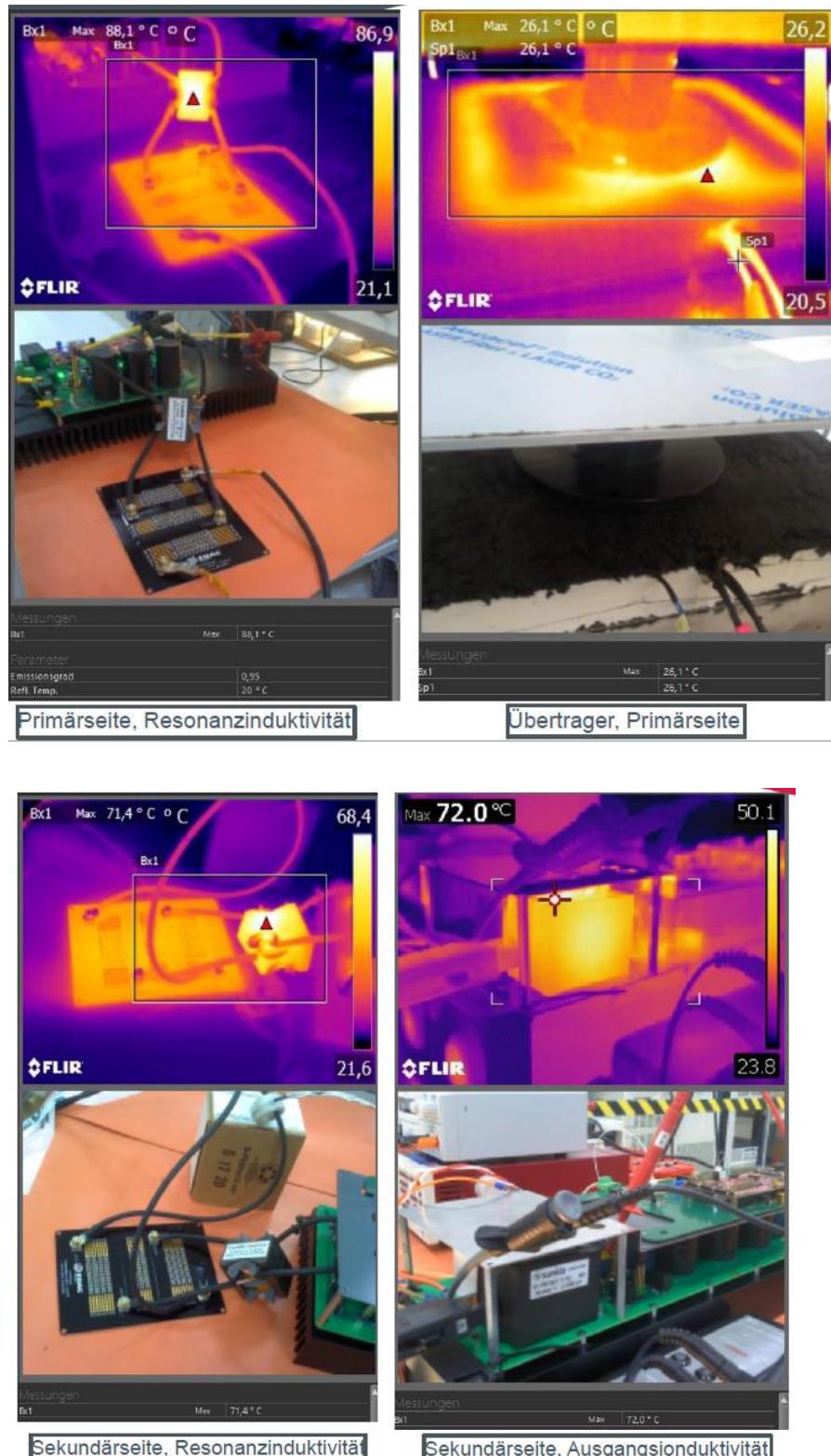


Abbildung 72: Betrieb und thermische Untersuchung des DS-Systems inklusive asphaltintegriertem DD-Resonator (Quelle: EDAG)

Abbildung 72 zeigt die thermische Untersuchung des DS-Systems beim Projektpartner EDAG. Enthalten ist ein primärseitiger Resonator, welcher in einer Asphaltsschicht eingebettet ist. Es konnte die Funktion und die thermische Stabilität der enthaltenen Komponenten nachgewiesen werden.

3.4. AP LC-30-03.4 Evaluierung von verschiedenen Testsystemen im stationären Betrieb

Am Teststand der HsH Stammesstraße 1 wurden vier verschiedene Resonatoren in den Asphalt integriert. Die Inbetriebnahme und damit der Funktionsnachweis erfolgte mittels ohmscher Lasten als Verbraucher (Lampenbänke). Dabei konnte die gewünschte maximale Leistung übertragen werden. Mit dem Teststand Stammestraße 1 kann der Projektpartner Hochschule Hannover verschiedene Systeme testen und stationär kontaktlos Energie übertragen.



Abbildung 73: Inbetriebnahme des Teststands Stammesstraße 1 (Funktions-test)

3.5. AP LC-30-03.5 Aufbau einer kaskadierten Anordnung von asphaltintegrierten Primärspulen (mit TUBS und EDAG)

Für die Baumaßnahme Stammesstraße 2 wurden zwölf Resonatoren und Anschlussleitungen aufgebaut und geliefert. Die Resonatoren wurden erfolgreich in den Asphalt integriert.



Abbildung 74: Vorbereitete Muster für den Einbau im Testfeld



Abbildung 75: Vorbereitete Zuleitungen für den Einbau im Testfeld



Abbildung 76: Asphalttragfläche und positionierte Resonatoren am Testfeld (Quelle: HsH)



Abbildung 77: Oberflächenansicht, nach dem Abschluss der Baumaßnahme (Quelle: HsH)

3.6. AP LC-30-03.6 Evaluierung und Bewertung von asphaltintegrierten Resonatorlösungen für dynamische Ladestrecken

Im Laufe des Forschungsprojekts wurden Resonatoren mit unterschiedlichen Geometrien aufgebaut. Dabei unterscheidet sich besonders die Feldführung im Luftspalt zwischen den jeweiligen Resonatoren.

Feldführung DD/DS vs. Zirkular mit Blick auf dynamischen Ladestrecken

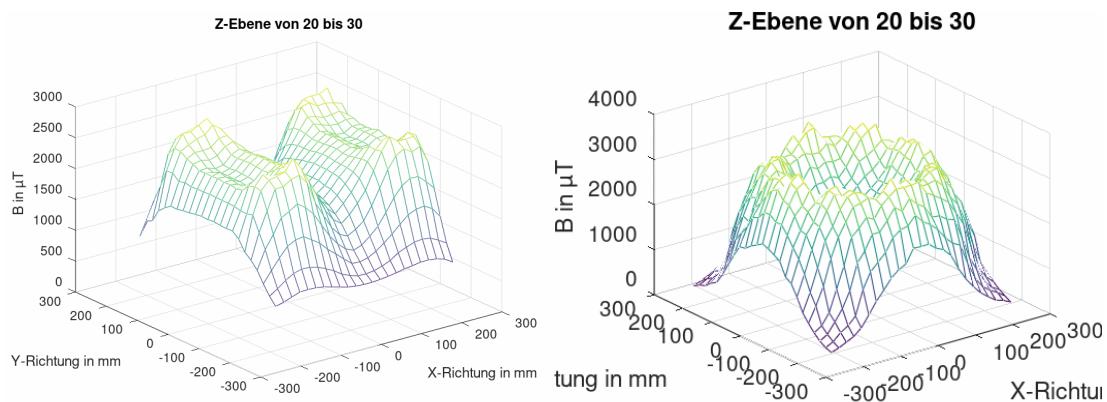


Abbildung 78: Feldführung DD/DS-System (links) vs. zirkularer Aufbau (rechts)

Beim Betrieb eines kontaklosen Ladsystems ist die Kopplung eine entscheidende Größe. Der Betrag ist dabei in gewissen Grenzen nicht ausschlaggebend. Eine starke Änderung der Kopplung führt dagegen zu einer starken Änderung des Arbeitspunkts und kann ein System entsprechend belasten. Die Kopplung ist hauptsächlich von der Geometrie und dem Versatz der beiden Resonatoren abhängig. Bei einem dynamischen Ladevorgang wird der bodenseitige Resonator vom fahrzeugseitigen überquert. Der Versatz ändert sich von maximalem Versatz hin zu keinem Versatz bis hin zu maximalem Versatz. Diesbezüglich weiß die DD/DS-Geometrie einen deutlichen Vorteil gegenüber dem zirkularen Aufbau auf. Durch das gerichtete Feld, kann der Bereich mit ähnlichen Kopplungsverhältnissen über die Geometrie des Bodenseitigen Resonators vergrößert werden. Die Kopplung ändert sich in Fahrtrichtung kaum. Es stellt sich ein Bereich mit annähernd konstanter Kopplung ein. Beim zirkularen Aufbau ist diese Möglichkeit nicht gegeben.

Sekundärseitige Regelung bei dynamischen Ladestrecken

Die übertragene Leistung eines kontaklosen Ladesystems ist stark von der Kopplung abhängig. Beim Überfahren eines Resonators ändert sich diese Größe und entsprechend auch der Arbeitspunkt. Um eine konstante Leistungsübertragung zu gewährleisten, ist eine permanente Leistungsanpassung bzw. -regelung notwendig. Klassische Ladesysteme nutzen eine primärseitige Regelung der Leistung. Das Fahrzeug übergibt die Information, welche Leistung aufgenommen werden kann an die Bodenseite und dort wird die entsprechende abgegebene Leistung eingestellt. Beim Überfahren eines Resonators müsste entsprechend permanent schnelle Kommunikation zwischen Fahrzeug und Fahrbahn gewährleistet sein. Im Projekt LaneCharge wurde eine neue Regelungsform untersucht und umgesetzt. Der primärseitige Resonator erbringt nicht die Regelleistung. Das Fahrzeug nimmt nur so viel Leistung ab, wie es gerade benötigt. Durch die fahrzeugseitige Regelung ist technisch keine permanente Kommunikation zwischen Fahrbahn und Fahrzeug notwendig, um die Kopplungsänderung auszugleichen.

Forschungsmöglichkeiten für dynamische Ladestrecken

Um ein dynamisches System umzusetzen, ist es sinnvoll die Kopplungsänderung möglichst gering zu halten. Wie bereits beschrieben, hat die Geometrie einen Einfluss. Hier sollte nach

aktuellen Erkenntnissen der DD/DS-Aufbau dem zirkularen System vorgezogen werden. Eine weitere Möglichkeit könnte die Verbindung von zwei sekundärseitigen Resonatoren sein. Eventuell könnte dadurch die Kopplungsänderung beim Überfahren der dynamischen Ladestrecke minimiert werden. Diese Untersuchung ist nicht Teil des Forschungsprojekts, könnte aber einen spannender zukünftiger Forschungsbereich darstellen.

3.7. Wartung und Betreuung der asphaltintegrierten Spulensysteme

Nach dem zwischenzeitlichen Ausfall der Zuleitungen der Resonatoren in Stammestraße 2 wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt (vgl. AP LC-23-01.7). Mit den gewonnenen Erkenntnissen und Untersuchungen wurden neue Zuleitungen erstellt. In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner Hochschule Hannover konnten die Leitungen auf dem Testgelände Stammestraße 2 ausgetauscht werden und die Funktion durch Messung der Induktivität und der Spannungsfestigkeit bestätigt werden.



Abbildung 79: Wechsel der Zuleitungen und Messung der Funktion Stammestraße 2

4. AP LC-30-04 Aufbau der sekundärseitigen Spulengeometrie

Das Arbeitspaket LC-30-04 teilt sich in sechs Teilarbeitspakete und beschreibt den Aufbau des fahrzeugseitigen Resonators als Teil der Übertragerstrecke.

4.1. AP LC-30-04.1 Auswahl und Beschaffung von Komponenten und Materialien zum Aufbau neuer Kfz-integrierten Sekundärspulenlösung inkl. Gehäuse

Die Auswahl und Beschaffung der notwendigen Materialien erfolgte zusammen mit den Materialien für die primärseitigen Resonatoren. Zusätzlich benötigte der fahrzeugseitige Resonator Materialien zur Abschirmung des Fahrzeugs und für das Gehäuse. Entsprechende Aluminiumschirme bzw. Gehäusegeometrien wurden entwickelt und beschafft.

4.2. AP LC-30-04.2 Aufbau und Test (mechanisch und elektrisch/magnetisch) von Prototypen (iterativ)

Für die Einbindung der Prototypen in die elektrische Umgebung und die Erprobung des elektrischen Verhaltens wurden Prototypen in zirkularer und DS-Bauform entwickelt, aufgebaut und an den Projektpartner EDAG übermittelt. Die Abbildungen Abbildung 80 bis Abbildung 82 zeigen die aufgebauten Labormuster.



Abbildung 80: Resonator Zirkular sekundärseitig



Abbildung 81: Resonator DS sekundärseitig

Der primärseitige DD-Resonator wird sekundärseitig mit dem DS-Resonator betrieben. Die Muster wurden dem Projektpartner EDAG zur Verfügung gestellt.

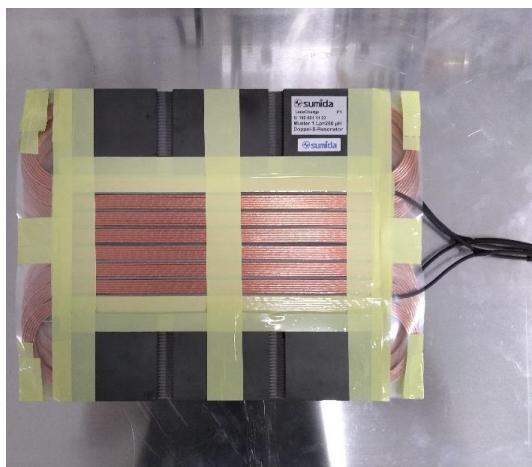


Abbildung 82: Resonator DS sekundärseitig V2

Auf Grundlage der Untersuchungen des Projektpartners EDAG entstand der finale Resonator zur Fahrzeugintegration. In Abbildung 83 links mit passender Schirm- bzw. Grundplatte und einem Kunststoffgehäuse aufgebaut und rechts mit dem finalen Gehäuse direkt am Fahrzeug.

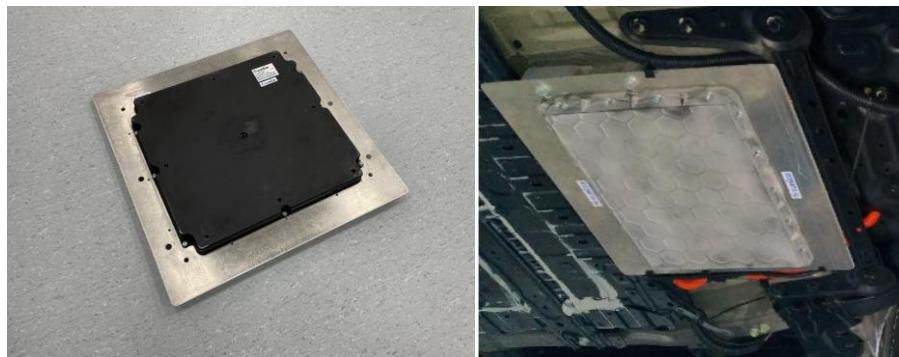
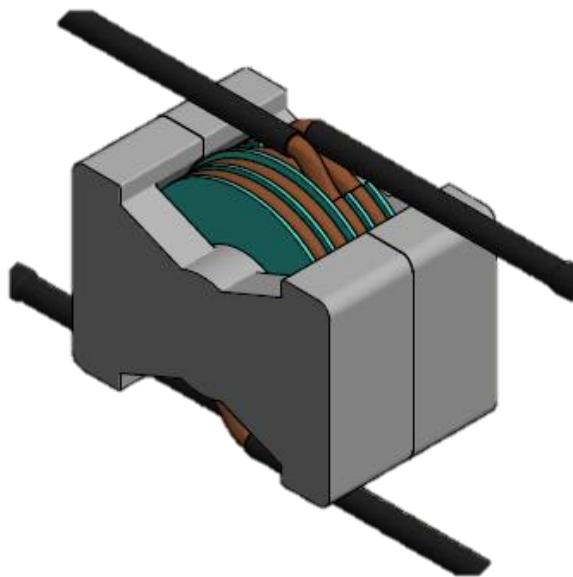


Abbildung 83: Baugruppe zur Anbringung ans Fahrzeug: Resonator im Gehäuse am Schirmblech.

4.3. AP LC-30-04.3 Charakterisierung von elektrischen, thermischen und magnetischen Eigenschaften

Zur Charakterisierung der Eigenschaften der magnetischen Bauteile wurden Kleinsignalmessungen durchgeführt. Die im erstellten Datenblatt hinterlegten Eigenschaften können dadurch nachgewiesen werden. Abbildung 84 zeigt beispielhaft Auszüge eines Datenblatts. Die enthaltenen Werte werden für jedes Bauteil überprüft und in Messprotokollen abgelegt.



L	W1 (W2)	10 μ H	@ 85 kHz
L	W1 + W2	37 μ H	@ 85 kHz
R _{DC}	W1 (W2)	$\leq 4 \text{ m}\Omega$	

Abbildung 84: Auszüge aus dem Datenblatt der Resonanzdrossel EI 190 601 11 76

Measurement	L W1 [μH]		Rdc W1 [mOhm]	
Measurement Equipment	Agilent E4980A		Resistomat 2316	
Equipment Adjustment	f [kHz]	85		
	Uo [mV]	1000		
Special Conditions				
Specified Value	160		≤ 50 *	
Tolerance	+ [%]	t.b.d.		
	- [%]	t.b.d.		
Test Pin	B - E		B - E	
Sample				
1	161.60		67.60	
2	156.60		67.40	
3 (Ablage)	160.20		67.40	

Abbildung 85: Beispiel eines Messprotokolls

Das thermische Verhalten der Bauteile wurde durch den Betrieb am Fahrzeug untersucht. Dabei sind keine Auffälligkeiten aufgetreten.

4.4. AP LC-30-04.4 Evaluierung von verschiedenen Testsystemen im stationären Betrieb (in Abhängigkeit mit Primärsystem)

Die Evaluierung der vier im Teststand Stammestraße 1 verbauten stationären Systeme war zum Zeitpunkt des Projektabschlusses noch nicht abgeschlossen. Der Projektpartner HsH wird dazu im Rahmen der Forschungstätigkeit der Hochschule weitere Untersuchungen anstreben.

4.5. AP LC-30-04.5 Integration von Sekundärspulensystemen in Testfahrzeugen (mech. Integration)

Der Resonator in DS-Bauform wurde von SUMIDA erstellt und an den Projektpartner EDAG übergeben. Das Bauteil wurde inklusive Schirmung und Gehäuse erstellt. Alle sekundärseitigen Bauteile wurden ins Fahrzeug integriert und die Funktion getestet. Abbildung 86 zeigt die Unterseite des Fahrzeugs. Links ist der Resonator mit Gehäuse und Schirmplatte dargestellt (grau), rechts wurde die Positionierungsantenne integriert (blau).

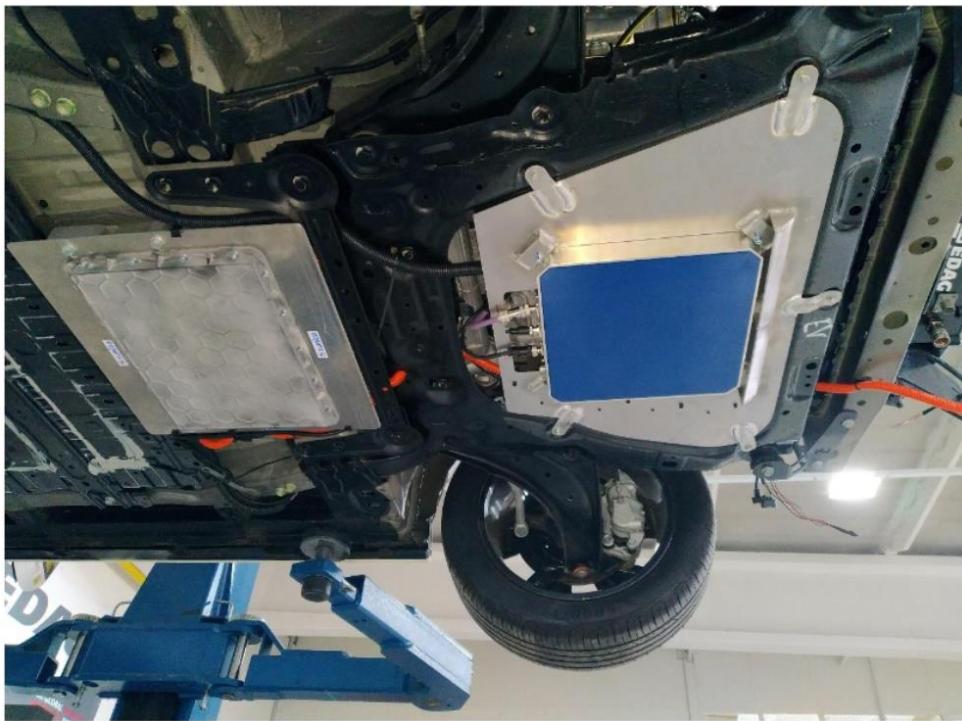


Abbildung 86: Mechanisch integrierter Resonator am Fahrzeug (Quelle: EDAG)

4.6. AP LC-30-04.6 Wartung und Betreuung der fahrzeuggebundenen Spulensysteme

Bis zum Ende des Projektzeitraumes waren keine Veränderungen oder Reparaturen an den fahzeugseitig integrierten Bauelementen notwendig.

III. Nutzen für das Unternehmen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses

Das erfolgreiche Forschungsprojekt LaneCharge brachte großen Nutzen für SUMIDA mit sich. Das Projekt, welches sich auf das induktive Laden konzentriert, hat es uns ermöglicht, wissenschaftliche Erkenntnisse zu gewinnen, die für die Zukunft der Automobilindustrie und insbesondere für die Entwicklung von Elektrofahrzeugen von entscheidender Bedeutung sind.

Durch LaneCharge konnten das Wissen in der Feldführung in magnetisch losen gekoppelten Systemen erheblich vertieft werden. Dies ist ein kritischer Aspekt beim induktiven Laden, da eine effiziente Energieübertragung entscheidend für die Praktikabilität dieser Technologie ist. Die Fortschritte in der 3D-FEM-Simulation von kontaktlosen Energieübertragungssystemen ermöglichen es, präzisere und effizientere Ladestrecken zu entwickeln, die in einer Vielzahl von Anwendungen eingesetzt werden können.

Das elektrische und magnetische Verhalten von resonant arbeitenden Systemen wurde ebenfalls umfassend untersucht, was zu einem tieferen Verständnis und zu verbesserten Designs für Hochfrequenzsysteme – nicht nur im Bereich kontaktlose Energieübertragung – führt. Die Normungshintergründe dieser Systeme sind für die Sicherstellung der Kompatibilität und Sicherheit in der Automobilindustrie unerlässlich. Insbesondere im Bereich der Zuleitungen konnten an dieser Stelle neue Erkenntnisse gesammelt und Lösungen gefunden werden.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Projekts war die Untersuchung der Anforderungen, die sich aus der Integration von induktiven Ladesystemen in Asphalt ergeben. Dies ist ein entscheidender Schritt hin zur Realisierung von "Smart Roads", die das Laden von Elektrofahrzeugen während der Fahrt ermöglichen könnten.

Die wissenschaftlichen Erkenntnisse, die durch LaneCharge gewonnen wurden, werden in allen zukünftigen Projekten genutzt und stellen einen bedeutenden Wettbewerbsvorteil für SUMIDA dar. Die mediale Aufmerksamkeit, die das Projekt bereits jetzt auf sich zieht, hat zu einer erhöhten Nachfrage im Bereich der kontaktlosen Energieübertragung geführt. Dies bestätigt nicht nur das Interesse an der durchgeführten Arbeit, sondern öffnet auch neue Geschäftsmöglichkeiten.

Die Zusammenarbeit mit unseren Projektpartnern war und ist ein wesentlicher Bestandteil des Erfolgs von LaneCharge. Durch den Austausch von Fachwissen und Ressourcen konnten Synergien geschaffen werden, die die Forschung und Entwicklung vorantreiben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Forschungsprojekt LaneCharge SUMIDA nicht nur wertvolle wissenschaftliche Einblicke geliefert hat, sondern auch die Grundlage für zukünftige Innovationen bildet und unsere Position als führendes Unternehmen in der Automobilzulieferindustrie stärkt.

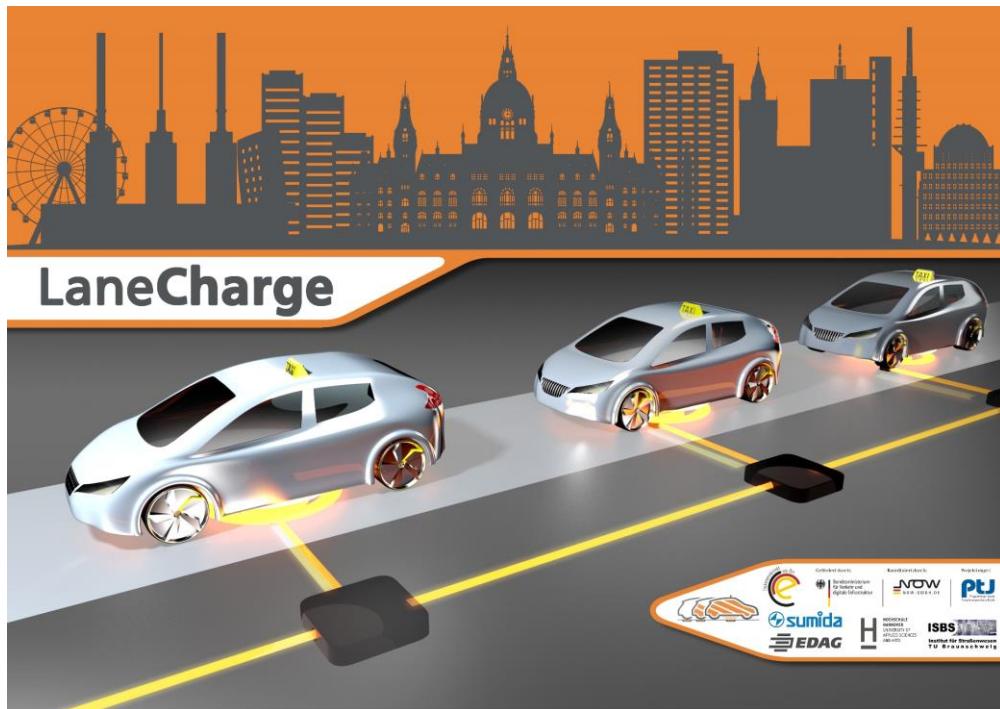
Bei Projektbeginn wurden wirtschaftliche und wissenschaftliche Erfolgsaussichten der Verwertung festgelegt. Die Markteinführung der kontaktlosen Ladetechnik bei KfZ findet gerade statt. Insbesondere große amerikanische Marktteilnehmer bringen die Technik in die Serienumsetzung. Das Projekt LaneCharge hat dabei zu einem Vorteil im Wettbewerb um diese Aufträge geführt. Entsprechend kann vom Einhalten der Ziele der wirtschaftlichen Verwertung ausgegangen werden. Die wissenschaftlichen Erkenntnisse werden in verwandten Projekten weiter genutzt. Ein Anschlussprojekt im Bereich kontaktlose Energieübertragung ist aktuell nicht geplant. Insbesondere die Erkenntnisse im Bereich der simulationsunterstützten Auslegung komplexer Systeme (elektrisch und magnetisch) werden in diversen Forschungsprojekten eingesetzt, weiterentwickelt und in die Serienentwicklung überführt.

IV. Darstellung des während des Vorhabens bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Im Forschungsprojekt LaneCharge hatte SUMIDA die Aufgabe Resonatoren in den Straßenbau zu integrieren. Dieser Ansatz wurde nach aktuellem Kenntnisstande während des Projektfortgangs nicht von anderen Stellen bearbeitet. Im Bereich Wireless-Charging und Versorgung von E-Taxis sind besonders zwei Projekte zu nennen:

- Das Projekt TALAKO (gefördert vom BMWi) beschäftigte sich mit der Ausstattung eines Taxistandes mit kontaktloser Ladetechnik. Die Eröffnung der Pilotanlage erfolgte am 20.05.2022 in Köln. Sowohl die genutzte Topologie als auch die Positionierung wurden im Projekt TALAKO anders gelöst als bei LaneCharge. Die Resonatoren der Übertragerstrecke wurden dabei nicht direkt in den Asphalt eingebracht.
- Das Projekt LISA4CL beschäftigte sich mit einem 22 kW-Ladesystem. Hier stand besonders die Normkonformität im Vordergrund. Damit ist LISA4CL nicht mit LaneCharge vergleichbar, aber im gleichen Themenfeld zu finden. Fortschritte anderer Stellen bei der Forschungsfrage von SUMIDA „Einbindung der Übertragerstrecke direkt in den Straßenaufbau“ sind nicht bekannt.

Schlussbericht LaneCharge – Innovationen für eine nachhaltige Mobilität: Semi-dynamische induktive Ladung von E-Fahrzeugen.



Teilvorhaben: Entwicklung eines induktiven Übertragers mit einer asphaltintegrierten Primärspule und fahrzeugseitigen Sekundärspule

Autoren: Philemon Wrensch, Dr. Michael Schmidhuber

Zuschussempfänger:	Förderkennzeichen:
SUMIDA Components & Modules GmbH	03EMF0202D
Vorhabenbezeichnung:	
Verbundprojekt: Innovationen für eine nachhaltige Mobilität: Semi-dynamische induktive Ladung von E-Fahrzeugen – LaneCharge	
Teilvorhaben: Entwicklung eines induktiven Überträgers	
Laufzeit des Vorhabens / Berichtszeitraum:	
01.06.2019 bis 31.12.2023	
Datum:	
07.05.2024	

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) im Rahmen der Förderrichtlinie Elektromobilität gefördert, vom Projektträger PTJ betreut und von der NOW-GmbH koordiniert.



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

Koordiniert durch:



Projektträger:



Der Bericht stellt die Ergebnisse aus dem Teilprojekt vor und nimmt Bezug zum Gesamtprojekt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Die Autoren und die beteiligten Firmen bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für digitales und Verkehr und für die Betreuung durch den Projektträger Jülich und die NOW-GmbH.



HOCHSCHULE
HANNOVER
UNIVERSITY OF
APPLIED SCIENCES
AND ARTS



Assoziierte Partner:

Landeshauptstadt

Hannover



Kurzzusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts LaneCharge wurde ein induktives Resonatorspulensystem entwickelt, das mit einer Leistung von 3,7 kW sowohl stationäres als auch quasi-dynamisches Laden von Elektrofahrzeugen ermöglicht. Dabei wurden verschiedene Geometrien (DD, DS und Zirkular) des primärseitigen Resonators in einem ersten Teststand (Stammestraße 1) mit vier Ladepunkten integriert. Anschließend wurde ein weiterer Teststand (Stammestraße 2) mit zwölf Ladepunkten zum semi-dynamischen Laden erfolgreich mit einem umgerüsteten Taxi in Betrieb genommen. Ein wesentlicher Aspekt der Innovation ist die direkte Einbettung des primärseitigen Resonators in die Asphaltdecke. Um diese zu verwirklichen, wurden die damit verbundenen Herausforderungen, wie thermische Belastungen, mechanische Stabilität und magnetische Effizienz, intensiv erforscht.

Darüber hinaus fand eine umfassende Entwicklung und Bereitstellung von induktiven Bauelementen statt, die für das gesamte System von der Anbindung an das Stromnetz bis zur Integration ins Fahrzeug erforderlich sind. Diese Komponenten tragen wesentlich dazu bei, eine effiziente und nahtlose Energieübertragung zu gewährleisten. Dadurch wurde das Fundament für eine zukunftsorientierte Ladeinfrastruktur geschaffen, die eine Integration in bestehende Verkehrsflächen ermöglicht und neue Möglichkeiten für das Laden von Elektrofahrzeugen eröffnet.

Topologie und elektrisches Verhalten

Für die Topologie der Übertragerstrecke wurde eine Serienkompensation mit vor- und nachgeschalteter LC-Stufe gewählt (LCC-LCC-Kompensation). Diese Topologie (siehe Abbildung 1) ermöglicht die Leistungsregelung von der fahrzeugseite und das Schalten im Nulldurchgang von Spannung und Strom.

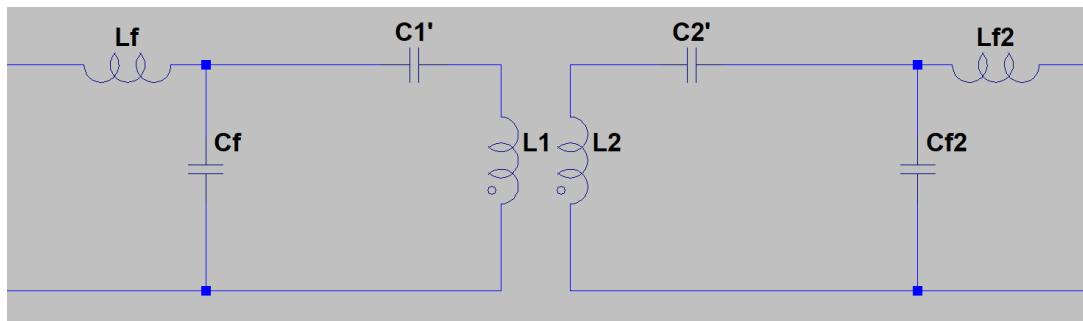


Abbildung 1: Topologie der Übertragerstrecke, LCC-LCC-Kompensation

Entwicklung und Untersuchung verschiedener Resonatorgeometrien

Hauptaugenmerk lag auf der Entwicklung der Resonatorspulen. Dabei wurden mit Hilfe von 3D-FEM-Simulationen Kopplungsverhalten, magnetisches Verhalten, Verlustmechanismen und Feldverteilung untersucht. Mit den gewonnenen Ergebnissen wurden innovative, kompakte Resonatoren mit geringer Abweichung der Kopplung über den Versatzbereich aufgebaut.

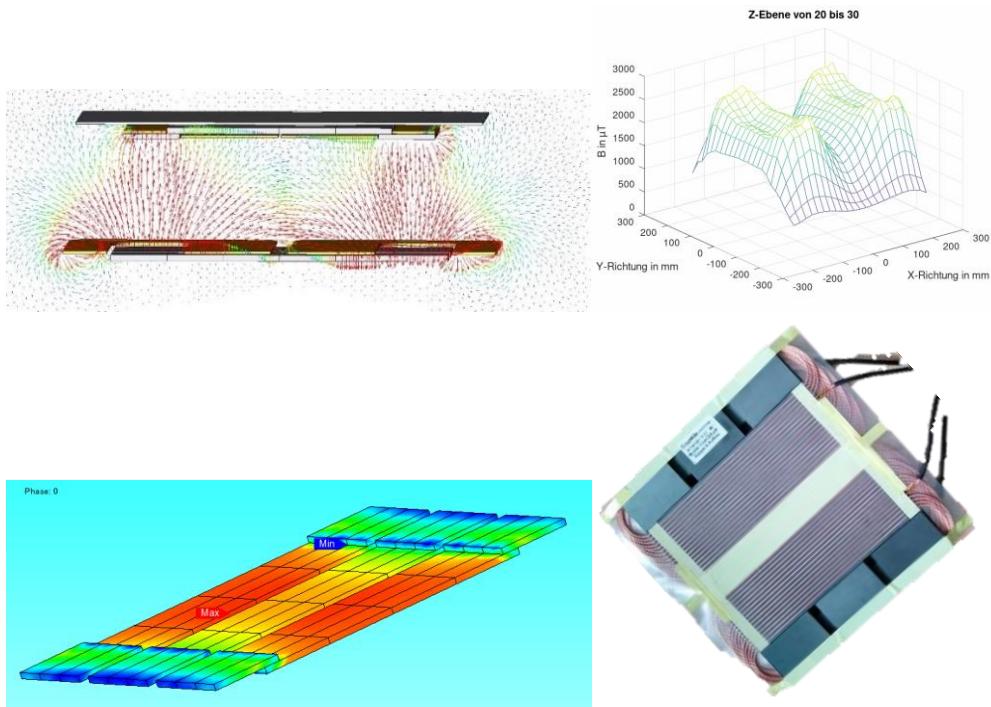


Abbildung 2: Exemplarische Darstellungen aus dem Entwicklungsprozess des DS-Resonators, Feldsimulation im Zwischenraum, Flussdichteverteilung, fertiger DS-Resonator

Als erster Meilenstein wurde ein Teststand mit vier verschiedenen Resonatoren an der Hochschule Hannover in Betrieb genommen. Dabei konnten wichtige Erkenntnisse zur Interoperabilität der Aufbaugeometrien und zum Prozess des Asphaltierens gewonnen werden.

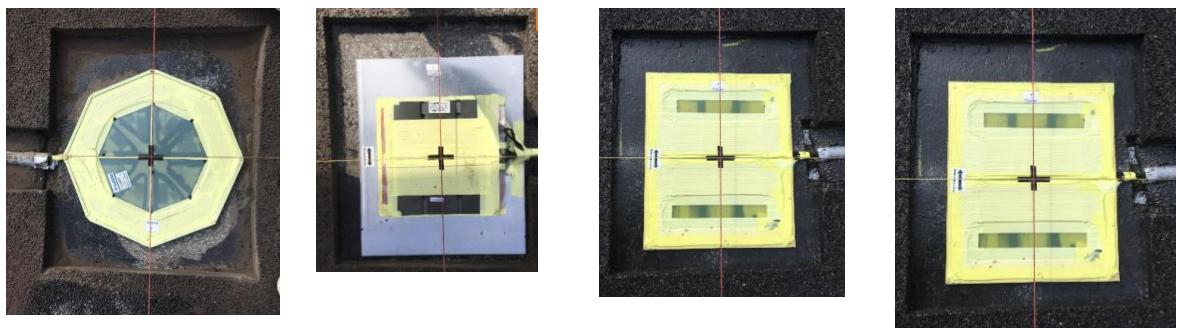


Abbildung 3: Resonatoren vor dem abschließenden Asphaltieren Teststand 1

Für den finalen Teststand (Stammstraße 2) mit zwölf asphaltintegrierten Ladepunkten wurde das System mit DD-Geometrie (bodenseitig) bzw. DS-Geometrie (fahrzeugseitig) ausgewählt und weiterentwickelt. Um die bis zu 25 m langen Anschlussleitungen betriebssicher aufzubauen, wurden intensive Untersuchungen durchgeführt und Zuleitungen in Anlehnung an die Norm EN 60664-1 erstellt.

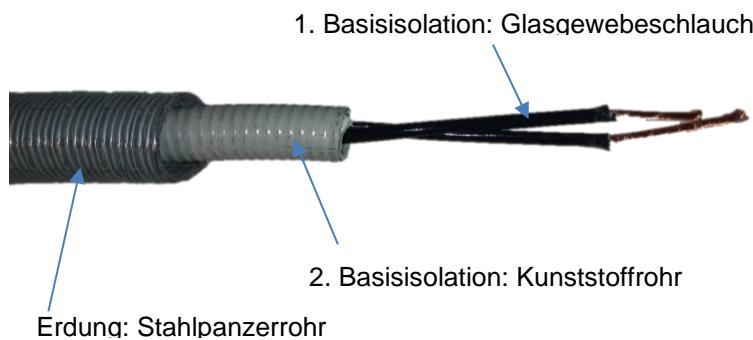


Abbildung 4: Aufbau der Zuleitungen für hohe Frequenz bei hoher Spannung



Abbildung 5: Exemplarische Darstellung der Teststrecke zur Untersuchung der Isolationsmaterialien

Parallel zur Entwicklung des bodenseitigen Resonators (Sender) wurde der fahrzeugseitige Resonator (Empfänger) entwickelt und für die Integration ins Fahrzeug optimiert. Die simulationsunterstützte Entwicklung der Resonatoren ist dabei immer nur im Paar sinnvoll. Abbildung 6 zeigt den Fahrzeugunterboden mit integriertem Resonator (links, grau). Der Projektpartner Hochschule Hannover entwickelte ein System zur Positionierungsunterstützung. Dafür wurde eine Antenne (rechts, blau) eingebaut. Abbildung 7 zeigt die fertige Ladestrecke mit zwölf asphaltintegrierten Ladepunkten.



Abbildung 6: Fahrzeugunterseite mit Resonator



Abbildung 7: Ladestrecke mit 12 Ladepunkten