



Universität Stuttgart

iew
Institut für
Elektrische Energiewandlung

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Mike Böttigheimer

Methodischer Entwurf von Systemen
zur Gefahrenreduktion von metallischen Fremdkörpern
beim induktiven Laden von Elektrofahrzeugen



Band 10

**SHAKER
VERLAG**

**Methodischer Entwurf von Systemen zur Gefahrenreduktion
von metallischen Fremdkörpern
beim induktiven Laden von Elektrofahrzeugen**

Von der Fakultät Informatik, Elektrotechnik
und Informationstechnik der Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Mike Böttigheimer
aus Schwäbisch Gmünd

Hauptberichterin: Prof. Dr.-Ing. N. Parspour
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. U. Jumar

Tag der mündlichen Prüfung: 09.07.2019

Institut für Elektrische Energiewandlung
der Universität Stuttgart

2020

Berichte aus dem Institut für Elektrische Energiewandlung

Band 10

Mike Böttigheimer

**Methodischer Entwurf von Systemen zur
Gefahrenreduktion von metallischen Fremdkörpern
beim induktiven Laden von Elektrofahrzeugen**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2020

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2020

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-7324-9

ISSN 2196-9213

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als Akademischer Mitarbeiter am Institut für Elektrische Energiewandlung der Universität Stuttgart.

Ein herzlicher Dank gilt meiner Mentorin Prof. Nejila Parspour, welche mich bei meiner gesamten Tätigkeit am IEW unterstützt und gefördert hat. Ein besonderer Dank gilt Prof. Ulrich Jumar vom ifak Magdeburg für die Übernahme des Mitberichts und die wertvollen Anregungen aus den Gesprächen. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen Bürokolleginnen und -kollegen Marco Zimmer, David Maier, Anna Lusiewicz und Marcel Maier für die intensiven Diskussionen über den Forschungsstand des induktiven Ladens. Weiterer Dank gilt Axel Hoppe vom ifak Magdeburg für die konstruktiven und offenen Diskussionen in allen Bereichen des induktiven Ladens.

Neben den Forscherinnen und Forschern, die mir bei der Ideenfindung geholfen haben, möchte ich auch besonders meinen von mir betreuten Studenten danken. Meine langjährigen wissenschaftlichen Hilfskräfte Torsten Schöbler und Jonas Kurz haben beide mit einer Bachelorarbeit begonnen und waren 3,5 und 2,5 Jahre meine Hilfskräfte. Für zwei bzw. drei studentische Arbeiten danke ich Timo Lämmle und Catherine Nemeth. Ein besonderer Dank gilt meinen zwei Machern bei der Realisierung des induktiven Parkplatzes und Fahrzeugs (CETeCAR) Stefanie Herrmann und Ralf Sauerwald, beide waren 2,5 bzw. 3,5 Jahre Hilfskräfte und beide habe ich in jeweils zwei studentischen Arbeiten betreut. Für weitere wertvolle Beiträge bei Kernthemen danke ich Silke Bobka, Aikaterini Pori, Samuel Müller, Christopher Lämmle und ganz besonders Jörg Heinrich.

Für die Hilfe beim Infrastrukturaufbau am IEW bedanke ich mich bei David Röder, Christoph Martin, Michael Armbruster, Rudolf Walter, Alexander Enssle und Enrico Schweyer. Weiterer Dank gilt meinen Deutsch-Korrekturlesern Simone und Johannes Röhrig.

Außerdem gebührt Evelin Eiselt ein Dank für die Unterstützung bei technischen Zeichnungen, sowie Hamidullah Barray, Edmund Fridrich und Karl Tarko für die Unterstützung im Labor und Claudia Schreiber im Bereich des Einkaufs.

Nachdem in meiner Assistentenzeit jeder dritte Werkstattauftrag des IEW von mir unterschrieben wurde, möchte ich natürlich die Seele des Instituts erwähnen, unsere mechanische Werkstatt um Hermann Kattner, Markus Beesch und Beate Haase.

Ein weiterer Dank gebührt der Vector Stiftung für die Finanzierung des Projekts CETeCAR (B2LE) und der damit verbundenen Finanzierung meiner Stelle am IEW.

Zum Schluss noch ein persönlicher Dank an meine Eltern Maria-Luise und Peter sowie meiner Ehefrau Denise für ihre unendliche Geduld, während ich diese Arbeit, morgens, abends, nachts am Wochenende und auch im Urlaub schrieb.

Kurzzusammenfassung der Arbeit

In dieser Arbeit wird untersucht, welches die passende Schutzmaßnahme für induktive Ladesysteme (ILS) im Automotive Umfeld für das vorhandene Gefahrenpotenzial vor metallischen Fremdkörpern (FK) ist, um damit die Betriebssicherheit von ILS sicherzustellen.

Hierzu kann zwischen Maßnahmen zur Detektion und Maßnahmen, welche ergriffen werden können, um die aufwändige Detektion zu vermeiden, unterschieden werden.

Zur Bestimmung der Schwelle der Gewährleistung eines sicheren Betriebs ohne FK-Detektion wurde die Temperatur des FK als Gefahr für Hautverbrennungen und Entzündungen passiver FK ermittelt. Aus messtechnischen Gründen während des Betriebes bietet sich eine Einstellung und Überwachung der Schwelle mit der Größe der Flussdichte, welche auf den FK wirkt, an. Es wird eine Flussdichteschwelle B_{Th} als abgeleiteter Grenzwert ermittelt, unterhalb derer ein sicherer Betrieb ohne Detektionsmaßnahmen gewährleistet ist.

Die Flussdichteschwelle wird allgemein in dieser Arbeit für einen Betrieb mit 85 kHz und für verschiedene Umgebungsbedingungen (Best-Case, Realistic-Case, Worst-Case) und Wärmekapazitäten ermittelt. Mithilfe der wissenschaftlichen Strukturierung der kompletten Ursache-Wirkungskette werden Einflussfaktoren auf und von der Flussdichteschwelle B_{Th} genauer untersucht. Es wird erforscht, wie die Flussdichteschwelle erhöht werden kann, um ein FK-Detektionssystem zu vermeiden, ebenfalls wird die Optimierung des Spulensystems und des Betriebspunkts zur Einhaltung und Unterschreitung der Flussdichteschwelle erörtert.

Für FK-Detektionssysteme, welche keine hundertprozentige Genauigkeit bei kleinen FK bieten, wurde eine absolute Flussdichteschwelle $B_{Th,Det}$ ermittelt, durch welche die Erwärmung nicht detektierbarer FK limitiert werden kann. Diese Flussdichteschwelle muss für jedes FK-Detektionssystem individuell bestimmt werden, je nachdem, welche FK nicht detektiert werden, wird genau für diese FK die Flussdichteschwelle bestimmt. $B_{Th,Det}$ ist prinzipbedingt höher als B_{Th} .

Ein eigens entwickeltes und neuartiges Bewertungsverfahren für Detektionsverfahren greift auf die Erkenntnisse der Ursache-Wirkungsbeziehung zurück und verwendet eigens definierte Kriterien, mithilfe derer der Stand der Technik bezüglich der Detektion untersucht wird. Hierbei werden die unabhängigen Kriterien in Relation zu Normvorgaben (SAE J2954, IEC 61980) und Empfehlungen dieser Dissertation dargestellt, so dass eine ganzheitliche Bewertung aus verschiedenen Blickwinkeln (Forschung, Industrie) möglich ist.

Die FK-Detektionsverfahren werden unterteilt in Verfahren, die auf elektrisch/magnetische Prinzipien beruhen und Assistenzverfahren, welche hauptsächlich mit Sensoren betrieben werden. Es existiert kein Verfahren, welches in jedem Kriterium die Normvorgaben erfüllt,

während einige wenige Verfahren aus dem Bereich der elektrisch/magnetischen Verfahren, die empfohlenen Kriterien dieser Dissertation erfüllen.

Die in der internationalen Normung bekannten Vorgaben, insbesondere hinsichtlich des Detektionsraums (IEC 61980, SAE J2954 11/2017) und der Maximaltemperatur (IEC 61980, SAE J2954 05/2016), werden durch die Erkenntnisse dieser Arbeit als zu hoch bewertet und es wird empfohlen diese anzupassen.

In dieser Arbeit wurde zur Optimierung des Standes der Technik bei den Detektionsverfahren ein neuartiges, sehr sensitives und genaues Detektionsverfahren entwickelt, welches in der Genauigkeit eine höhere Wertung aufweist als bekannte Verfahren. Das selbst entwickelte Verfahren erfüllt, wie die genannten Verfahren die Normvorgabe nicht, dafür aber die empfohlenen Kriterien für die Normung aus dieser Arbeit. Außerdem wurde anhand dieses Verfahrens aufgezeigt, wie ein beliebiges elektrisch/magnetisches Verfahren in der Ausführung optimiert werden kann.

Die Fragestellung, welche Maßnahmen der Gefahrentfernung beziehungsweise der Minimierung nach einer erfolgreichen Detektion getroffen werden sollten, wird untersucht. Eine Reduktion auf eine elektrische Leistung, bei der im Luftspalt maximal die ermittelte Flussdichteschwelle B_{Th} des Ladesystems anliegt, wird als inhärent sichere Rückfallebene angestrebt, um die potenzielle Zeit zu überbrücken, bis ein Mensch oder eine Vorrichtung die Gefahr entfernen kann.

Wenn alle in dieser Dissertation untersuchten Maßnahmen bei der zukünftigen Entwicklung von ILS eingehalten werden, kann die Betriebssicherheit von ILS gegenüber dem Einfluss von metallischen FK stark verbessert werden. Eine verbesserte Betriebssicherheit fördert den Einsatz von ILS in Elektrofahrzeugen, wodurch ein Zugewinn an Automatisierungsgrad und Komfort erreicht werden kann.

Abstract

In this work it is investigated which is the suitable protective measure for inductive charging systems (ICS) in the automotive environment for the existing potential danger of metallic foreign objects (FO), in order to ensure the operational safety of ICS.

For this purpose, a distinction can be made between measures for detection and measures which can be taken in order to avoid complex and expensive foreign object detection (FOD).

To determine the threshold to ensure safe operation without detection, the temperature of the FO was identified as a hazard of skin burns and inflammation of passive FO. For metrological reasons during operation, it is advisable to set and monitor the threshold with the size of the flux density acting on the FO. A flux density threshold B_{Th} is determined as the derived threshold value, below which safe operation without detection measures is ensured.

The flux density threshold is generally determined in this work for operation at 85 kHz and for various environmental conditions (best-case, realistic-case, worst-case) and thermal capacities. With the help of the scientific structuring of the complete cause-effect chain influencing factors on and from the flux density threshold B_{Th} are examined in detail. It is being investigated how the flux density threshold can be increased to avoid a FOD-system, also the optimization of the coil system and the operating point for maintaining and undercutting the flux density threshold is discussed.

For FOD-systems that do not provide 100% accuracy for small FO, an absolute flux density threshold $B_{Th,Det}$ has been determined by which the heating of undetectable FO can be limited. This flux density threshold must be determined individually for each FOD-system. Depending on which FO are not detected, the flux density threshold is determined precisely for these FO. $B_{Th,Det}$ is inherently higher than B_{Th} .

A novel and specially developed evaluation method for FOD methods makes use of the findings of the cause-and-effect relationship and uses specially defined criteria with which the state of the art with regard to FOD is investigated. Here, the independent criteria in relation to standard specifications (SAE J2954, IEC 61980) and recommendations of this dissertation are presented, so that a holistic assessment from different perspectives (university, industrial) is possible.

The detection methods are subdivided into methods based on electrical / magnetic principles and assistance methods, which are mainly operated with sensors. There is no method that meets the standard specifications in each criterion, while a few methods in the field of electrical / magnetic methods meet the recommended criteria of this dissertation.

The standards known in international standardization, especially with regard to the detection area (IEC 61980, SAE J2954 11/2017) and the maximum temperature (IEC 61980,

SAE J2954 05/2016), are considered too high by the findings of this work and it is recommended to adapt this.

In this work, a novel, very sensitive and accurate detection method was developed to optimize the state of the art in the detection method, which has a higher rating in accuracy than known methods. The self-developed method, like the methods mentioned, does not meet the standard specification, but meets the recommended criteria for standardization from this work. In addition, it has been demonstrated by this method how any electrical / magnetic method can be optimized in the design.

The question of which measures should be taken for the removal of danger or minimization after a successful detection is investigated. A reduction to an electrical power in which the maximum determined flux density threshold B_{Th} of the charging system is present in the air gap is sought as an inherently safe fallback level in order to bridge the potential time until a person or a device can remove the danger.

If all the measures investigated in this dissertation are adhered to in the future development of ICS, the operational safety of ICS can be greatly improved compared to the influence of metallic FO. Improved operational safety promotes the use of ICS in electrical vehicles, resulting in increased levels of automation and comfort.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Akzeptanz und Akzeptanzsteigerung der Elektromobilität in der Bevölkerung durch induktive Ladesysteme	1
1.3	Chancen auf neue Mobilitätskonzepte durch induktive Ladesysteme	2
1.4	Potenzieller Akzeptanzverlust der Elektromobilität	3
1.5	Definition des Themas und Ziel der Arbeit	4
2	Kontaktlose Energieübertragung für den Einsatzbereich induktives Laden im Automotive Umfeld	5
2.1	Magnetischer Kreis	6
2.1.1	Gekoppelte Spulen	6
2.1.2	Ersatzschaltbild der gekoppelten Spulen	7
2.1.3	Der Koppelfaktor als Maß für die Kopplung zweier Spulen	7
2.1.4	Verfahren zur Messung des Koppelfaktors	8
2.2	Induktives Laden im Automotive Umfeld	9
2.2.1	Batterieverhalten, Betriebspunkte und Ladeverfahren	10
2.2.2	Leistungselektronik und Transformationsfaktoren	11
2.2.3	Vergleich der Kompensationstopologien für den Einsatz beim induktiven Laden im Automotive Umfeld	14
2.2.4	Netzgleichrichter	18
2.3	Gesetzliche Vorgaben und Normung	18
2.3.1	Gremien für Normung	18
2.3.2	Normung von induktiven Ladesystemen mit Interoperabilitätsdefinition	19
2.3.3	Normung im Schutzbereich	22
2.4	Objekte im magnetischen Feld eines induktiven Ladesystems	25
2.4.1	Lebendobjekte	25
2.4.2	Fremdkörper	26
2.4.3	Analogie der Schutzmaßnahmen eines induktiven Ladesystems und dem Übertragungsnetz	26

3 Ermittlung der Schwelle zwischen Maßnahmen zur Gefahrreduktion und Detektionsmaßnahmen für metallische Fremdkörper im magnetischen Feld29

3.1	Verteilung der Flussdichte zwischen den energieübertragenden Spulen	31
3.1.1	Ermittlung der Einflussgrößen auf die Flussdichteverteilung	31
3.1.2	Energieübertragende Spulen	33
3.1.3	Übertragungsfrequenz.....	36
3.1.4	Variation des Eingangsstroms in das Spulensystem während des Betriebes	37
3.1.5	Typische Flussdichteverteilung aus bekannten Prototypen	41
3.1.6	Technisch optimiertes Design eines Spulensystems für ein induktives Ladesystem zur Unterschreitung der Flussdichteschwelle	42
3.2	Leistungsaufnahme eines potenziellen Fremdkörpers im magnetischen Feld zwischen den energieübertragenden Spulen	44
3.2.1	Grundprinzip der Leistungsaufnahme	44
3.2.2	Analytisches Modell eines FK zur Berechnung der Leistungsaufnahme	46
3.2.3	Positionsabhängigkeit der Flussdichte in einem Spulensystem.....	48
3.2.4	Aufbau einer Prüfumgebung (Simulation, Messung) mit wirksamer Flussdichte als Eingangsgröße	49
3.2.5	Einfluss der elektrischen Leitfähigkeit auf die Leistungsaufnahme des Fremdkörpers	51
3.2.6	Einfluss der weiteren Eigenschaften des Fremdkörpers auf seine Leistungsaufnahme.....	51
3.2.7	Einfluss der Eigenschaften der Übertragungsstrecke auf die Leistungsaufnahme des Fremdkörpers	53
3.2.8	Materialbedingte Worst-Case-Fremdkörper	55
3.3	Thermisches Verhalten von Fremdkörpern im magnetischen Feld der energieübertragenden Spulen	57
3.3.1	Bedeutung und Wahl des zulässigen Temperaturanstiegs für die inhärent sichere Flussdichteschwelle	57
3.3.2	Wärmetransportmechanismen von Fremdkörpern im magnetischen Feld	58
3.3.3	Thermisches Verhalten des Fremdkörpers unter Beeinflussung der Umgebungsbedingungen (Wärmeleitung)	62
3.3.4	Ermittlung der Flussdichteschwelle unter Vermessung definierter Norm- und Prüffremdkörper	64

3.3.5	Ermittlung der Flussdichteschwelle für schwer detektierbare Fremdkörper	66
3.3.6	Zeitabhängige Temperatur von Fremdkörpern (Aufwärm- und Abklingverhalten) für Abschaltzeiträume und Bedingungen	67
3.3.7	Minimum der Leistungsaufnahme für unzulässige Erwärmung	68
3.3.8	Definition von Worst-Case-Fremdkörpern mit Untersuchung ihrer Wärmeabfuhr	68
3.4	Gefahrenstehung durch metallische Fremdkörper	69
3.4.1	Entstehung von Verbrennungen und Ermittlung einer Temperaturgrenze für Fremdkörper	69
3.4.2	Einfluss der Wärmekapazität auf die Temperaturgrenze für Verbrennungen	71
3.4.3	Entstehung von Selbstentzündung und Ermittlung einer Temperaturgrenze für Fremdkörper	72
3.4.4	Entstehung von Entzündung passiver Fremdkörper und Ermittlung einer Temperaturgrenze für metallische Fremdkörper	73
3.4.5	Festlegung der maximalen Temperatur eines Fremdkörpers für eine inhärent sichere Flussdichteschwelle	74
4	Neuartige Bewertung der Verfahren zur Detektion metallischer Fremdkörper für induktives Laden im Automotive Umfeld	75
4.1	Bewertung der prinzipbedingten Eigenschaften von Detektionsverfahren	76
4.1.1	Zuverlässigkeit hinsichtlich Umwelt- und betrieblicher Einflüsse	77
4.1.2	Genauigkeit	78
4.1.3	Reaktionszeit	79
4.1.4	Detektionsraum	79
4.1.5	Selektivität	80
4.1.6	Integration auf Fahrzeugseite	81
4.1.7	Integration auf Infrastrukturseite	82
4.1.8	Potenzielle Kosten	82
4.1.9	Skalierbarkeit	83
4.2	Einordnung der Relevanz der Bewertungskriterien	84
4.2.1	Sicherheitsrelevante Kriterien nach Vorgaben aus der Normung und Empfehlung dieser Dissertation	86
4.2.2	Chancen auf Markteinführung	89

4.3	Untersuchung von Ansätzen zur Detektion von Metallen an Verfahren außerhalb des Automotive Umfelds für induktives Laden	91
4.3.1	Induktionsherd	91
4.3.2	Metalldetektor	91
4.3.3	Kapazitive Sensoren.....	92
4.3.4	Wireless Power Konsortium (Qi) Kleinleistungen	92
4.4	Assistenzverfahren.....	93
4.4.1	Direkte Temperatur-Messung	93
4.4.2	Wellensensoren (Ultraschall-, Radar-, Infrarot-, Bild-Überwachung)	94
4.4.3	Messung der Gewichtskraft auf der Primärspule.....	95
4.4.4	Lichtwellenleiter als Sensorwicklung	96
4.5	Elektrisch/Magnetische Verfahren	96
4.5.1	Überwachung der elektrischen Größen der Übertragungsspulen	96
4.5.2	Messung des Abklingverhaltens der Energieübertragungsspulen	97
4.5.3	Auswertung der Größen von passiven Sensorspulen.....	98
4.6	Kombination mehrerer Einzelverfahren	101
4.7	Vergleich der bekannten Einzelverfahren und Entwicklung des Forschungspotenzials	101
5	Entwicklung und Optimierung eines neuartigen Detektionsverfahrens für metallische Fremdkörper	103
5.1	Modellierung des Spulensystems	104
5.1.1	Modellierung des kompensierten Dreiwicklungssystems.....	104
5.1.2	Ermittlung der zur Detektion geeigneten Phase	106
5.1.3	Sensitivität des Detektionsverfahrens	108
5.2	Wicklungsformen und Design des Spulensystems	111
5.2.1	Einfluss von metallischen Fremdkörpern auf die Induktivitäten von Primär- und Sensorspule.....	111
5.2.2	Intelligentes Wicklungsdesign von großen Sensorwicklungen mit hoher Kopplung.....	113
5.2.3	Allgemeine technische Optimierung der Wicklungsgeometrie und Positionierung im Spulensystem für elektrisch/magnetische Verfahren	115
5.3	Aufbau des Prototyps zum induktiven Laden mit Detektionssystem.....	116

5.3.1	Prototyp zur Detektion.....	116
5.3.2	Kalibrierung des Detektionssystems für den Betrieb	117
5.3.3	Auslegung und Feinjustierung des Sensorspulenschwingkreises.....	118
5.4	Einordnung in das neuartige Bewertungsverfahren aus Kapitel 4	119
5.4.1	Prüffremdkörper.....	119
5.4.2	Messung der Induktivitätsänderung.....	120
5.4.3	Detektionstest von Prüf-FK	121
5.4.4	Bewertung des Verfahrens.....	122
6	Szenarien nach der Detektion von Fremdkörpern	124
6.1	Gefahrentfernung durch eine Person	125
6.2	Automatisierte Gefahrentfernung durch eine technische Vorrichtung.....	125
6.3	Gefahrentfernung durch äußere Einflüsse	125
6.4	Gefahrerhaltung durch Überlagerung mit Lebend-Objekt-Detektion.....	126
6.5	Gefahrreduktion durch Betriebsverhalten des induktiven Ladesystems	126
7	Zusammenfassung und Ausblick	128
8	Anhang A: Detaillierte Bewertung der Verfahren zur Detektion metallischer Fremdkörper aus Kapitel 4	131
8.1	Bewertungsmatrix mit Relevanzflächen.....	131
8.2	Assistenzverfahren.....	133
8.2.1	Direkte Temperatur-Messung	133
8.2.2	Wellensensoren (Ultraschall-, Radar-, Infrarot-, Bildauswertung)	134
8.2.3	Messung der Gewichtskraft auf der Primärspule.....	136
8.2.4	Lichtwellenleiter als Sensorwicklung.....	136
8.3	Elektrische/Magnetische Verfahren.....	137
8.3.1	Überwachung der elektrischen Größen der Übertragungsspulen	137
8.3.2	Messung des Abklingverhaltens der Energieübertragungsspulen	138
8.3.3	Auswertung der Größen von passiven Sensorspulen.....	139
9	Anhang B: Prüfbedingungen und Prüffremdkörper.....	145
9.1	Prüffremdkörper für thermische Messungen aus Kapitel 3.3/3.4.....	145
9.2	Alternative Vermessung der Flusssdichteschwelle mit 40 K für Fremdkörper mit hoher Wärmekapazität.....	148

9.3	Prüffremdkörper für Vermessung des eigenen Verfahrens aus Kapitel 5.4.....	151
10	Anhang C: Verwendete Messgeräte	153
11	Anhang D: Entwickelte Infrastruktur für induktives Laden von Elektrofahrzeugen im Rahmen dieser Arbeit.....	154
11.1	Systemprüfstand I für induktives Laden	154
11.2	Systemprüfstand II für induktives Laden	156
11.3	CET-Parking: Errichtung eines modularen Doppelparkplatzes für induktives Laden	158
11.4	CETeCAR – Elektrisch Fahren – Kabellos Laden: Modulare Umrüstung eines BMW i3 für induktives Laden	160
11.5	Realisierte Übertragungsstrecken im Fahrzeug und auf dem Parkplatz mit 3 kW und 11 kW	162
12	Literaturverzeichnis.....	163
13	Lebenslauf.....	181