

Diplomarbeit

Studienrichtung Elektrotechnik
Vertiefungszweig Informationstechnik
Institut für Elektronik

Testbarkeit von Systemen zum kontaktlosen Laden von Elektrofahrzeugen

Betreuer:

TU-Graz: Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Bernd Eichberger
Audi Electronics Venture GmbH: Dr.-Ing Björn Elias

Autor:

Reinhard Peer
Matr.-Nr. 0530221

Ingolstadt 2011



Audi
Electronics Venture GmbH



Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Ingolstadt, 31. Mai 2011

Reinhard Peer

Sperrvermerk

Diese Diplomarbeit und die dazugehörigen Datenträger dürfen ohne Einverständniserklärung der AUDI AG oder Audi Electronics Venture GmbH nicht vor Ablauf einer Frist von 5 Jahren ganz oder in Auszügen veröffentlicht, vervielfältigt, bekannt gemacht oder weitergegeben werden.

Danksagung

An der Realisierung der vorliegenden Arbeit war eine Reihe von Personen beteiligt, denen ich an dieser Stelle meinen herzlichen Dank aussprechen möchte.

Allen voran seien hier meine beiden Betreuer genannt, Herr Dr. Björn Elias von der Audi Electronics Venture GmbH und Herr Dr. Bernd Eichberger von der Technischen Universität Graz. Nur durch die gute und enge Zusammenarbeit mit beiden war die Erstellung der Diplomarbeit in Ingolstadt möglich.

Ferner sei an dieser Stelle auch den netten Kollegen der Abteilung I/AEV-3 gedankt, insbesondere für die sehr angenehme Arbeitsumgebung und Hilfsbereitschaft die sie mir entgegenbrachten.

Besonders möchte ich mich bei meinem Bruder Christian Peer wie auch meinem Lehrer und Freund Theodor Trimmel für das Lektorieren der Arbeit bedanken. Danken möchte ich auch allen meinen Freunden in Graz, die trotz meiner räumlichen Abwesenheit den freundschaftlichen Kontakt aufrecht erhalten haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie, die mich während meiner gesamten Ausbildung stets unterstützt und begleitet hat. Durch die entgegengebrachte herzliche Art wurde mein Wegdegang stets positiv gelenkt.

Dafür danke ich Euch sehr!

Kurzfassung

Elektrofahrzeuge haben in jüngster Zeit enorm an Bedeutung gewonnen. Die effiziente, zuverlässige und nachhaltige Mobilität stellt einen zentralen Stellenwert für die heutige und künftige wirtschaftliche Entwicklung dar. Die Nutzung erneuerbarer Energien leistet dabei einen wesentlichen Beitrag zur Gewährleistung einer hohen Lebensqualität.

Die zunehmende Verbreitung von Elektrofahrzeugen geht einher mit einem Entwicklungsprozess neuer und anwendungsorientierter Innovationen. Zur Optimierung der Energiebereitstellung für die Elektrofahrzeuge entstehen Konzepte, die den traditionell kabelgebundenen Ladevorgang revolutionieren. In dieser Diplomarbeit werden Systeme zur kontaktlosen Energieübertragung untersucht und Ansätze zu deren Weiterentwicklung erstellt.

Zunächst wird ein Überblick über Anbieter von kontaktlosen Energieübertragungssystemen gegeben. Um die Testbarkeit von solchen Systemen beurteilen zu können, werden technische Kenndaten festgelegt und erhoben. Weiters werden die für eine kontaktlose Energieübertragung wichtigen Grundlagen erläutert. Darauf basierend erfolgt eine Definition für die in der induktiven Energieübertragung relevanten Unterscheidungskriterien.

Das Wissen zur Festlegung eines Messverfahrens wird aus der Analyse eines bestehenden kontaktlosen Energieübertragungssystems generiert und in entsprechende Prüfanweisungen gefasst. Durch die erarbeiteten Kriterien und die Erfassung einer Zielerfüllung einzelner Ausführungsvarianten kann ein strukturierter Vergleich im Sinne einer nachvollziehbaren Systemauswahl bereitgestellt werden.

In naher Zukunft sollen auf Basis dieser Arbeit weitere kontaktlose Energieübertragungssysteme getestet und bewertet werden. Auch weiterführende wissenschaftliche Arbeiten im Bereich der Analyse der auftretenden Magnetfelder in diesen Systemen sind denkbar.

Abstract

In recent years, electro-mobility has become more important worldwide. Efficiency, reliability, and sustainability are significant values for a generally accepted mobile technology. Herein, renewable resources are essential for a high standard of living.

The rapidly growing market of electrical vehicles collaborates with the development of new innovations. To optimize the energy supply for electrical vehicles, different concepts are emerging to displace the wired charging process. This diploma thesis reviews systems for contactless energy transfer and identifies future developments.

To start, this thesis gives an overview of suppliers of contactless charging stations. To evaluate different contactless charging systems, technical details are then defined and measured. Furthermore, the fundamentals of a contactless charging system are revealed. Based on that knowledge, five main differential criteria are defined.

Measurement procedures were created by analyzing an existing wireless energy transferring system. Testing instructions were formed as a result of that process. With the chosen criteria and the completion of different design options it may be possible to create a structured comparison between the designs. Through this method, a traceable choice can be made.

In the near future, other contactless energy transfer systems are to be tested and rated on the base of this diploma thesis. Additionally, further scientific studies in the area of analyzing the magnetic field of these systems are plausible.

Inhaltsverzeichnis

Titelseite	i
Eidesstattliche Erklärung	iii
Sperrvermerk	v
Danksagung	vii
Kurzfassung	ix
Abstract	xi
Inhalt	xv
1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Aufgabenstellung	2
1.3. Die AUDI AG	3
1.4. Audi Electronics Venture GmbH	4
1.5. Historischer Rückblick auf die kontaktlose Energieübertragung	5
2. Übersicht über Förderprojekte und Anbieter	7
2.1. Förderprojekte	7
2.1.1. Förderprojekte des Deutschen Bundesministeriums	8
2.1.2. e-connected	9
2.2. Anbieter von KEU-Systemen	10
2.2.1. Wampfler Germany	10
2.2.2. Vahle	11
2.2.3. Evatran	12
2.2.4. WiTricity	13
2.2.5. SEW-Eurodrive	13
2.2.6. Halo IPT London Citroen	14
2.2.7. wirelesspowerconsortium	15
2.2.8. Bombardier	15
3. Grundlagen der kontaktlosen Energieübertragung	17
3.1. Technische Hintergründe	17
3.1.1. Feld einer Luftspule	17
3.1.2. Magnetische Kopplung	20

3.1.3.	Induktion einer Spannung	21
3.1.4.	Ersatzschaltbild zweier gekoppelter Spulen	22
3.1.5.	Resonanz-Prinzip	23
3.2.	Blockschaltbild eines KEU-Systems	25
3.2.1.	Blockschaltbild einer KEU-Anlage	27
3.3.	Ausführungsarten der Spulen	28
3.3.1.	Ausführungsart A	28
3.3.2.	Ausführungsart B	29
3.3.3.	Ausführungsart C	29
3.3.4.	Ausführungsart D	29
3.3.5.	Ausführungsart E	30
3.4.	Bereichs- und Koordinatendefinition	30
3.4.1.	Koordinatensystem	30
3.4.2.	Bereichsdefinition	31
4.	Kriterien zum Vergleich verschiedener Ausführungsarten	33
4.1.	Spulenparameter	34
4.2.	Serienreife	36
4.3.	Kundennutzen	39
4.4.	Kostenvorteil	42
4.5.	Sicherheit und Zuverlässigkeit	44
5.	Messung und Grenzwerte elektromagnetischer Felder	47
5.1.	Feldmessungen	47
5.1.1.	Messgrößen	48
5.1.2.	Messmöglichkeiten	49
5.1.3.	Messaufbau	54
5.1.4.	Messpositionen am und um das Fahrzeug	55
5.2.	Normen und Vorschriften	57
5.2.1.	ICNIRP	57
5.2.2.	BGV B11,2001	60
5.2.3.	Richtlinie 2004/40/EG	62
5.2.4.	VW Konzernnormen	62
6.	Erfassen von technischen Kenndaten	65
6.1.	Prüfanweisung	65
6.1.1.	Definitionen	65
6.1.2.	Allgemeine Kenndaten	66
6.1.3.	B- und E-Feldmessungen	68
6.1.4.	Temperaturmessungen	69
6.1.5.	Einhaltung der ICNIRP-Grenzwerte	70

6.2. Auswertung der Prüfanweisung am vorhandenen KEU-System	70
7. Strukturierter Vergleich	71
7.1. Kriterien Bestimmung	71
7.2. Gewichtungstabellen	73
7.3. Bewertungsmatrix	73
7.4. Lösungsvorschläge	75
8. Zusammenfassung und Ausblick	77
8.1. Zusammenfassung	77
8.1.1. Mögliche Weiterführende Arbeiten	78
A. Glossar	xvii
B. Literaturverzeichnis	xix
C. Abbildungsverzeichnis	xxiii
D. Tabellenverzeichnis	xxv
E. Anhang	xxvii
E.1. Test Instructions	xxvii

1. Einleitung

1.1. Motivation

Die stetig steigende Nachfrage nach Elektrofahrzeugen hat zur Folge, dass auch Ladekonzepte zur Energieversorgung zügig weiterentwickelt werden. Dabei stellt das kabellose Laden eine interessante Alternative zum kabelgebundenen Laden dar. Ein kleines Fallbeispiel zeigt die Vorteile einer solchen Technologie:

Sie kommen mit Ihrem Fahrzeug von der Arbeit nach Hause und haben für später noch eine weitere Fahrt eingeplant. Um Zeit zu sparen, würden Sie jetzt noch kein kabelgebundenes Ladegerät anschließen, sondern erst nach der letzten Ausfahrt des Tages. Vergessen Sie aber schließlich darauf, weil sich etwa Ihr Tagesablauf unvorhergesehen geändert hat, dann würde Ihnen das Elektrofahrzeug am nächsten Morgen nicht mit voller Leistung zur Verfügung stehen. Eine Vorrichtung zum kabellosen Laden erspart Ihnen die lästige Verpflichtung, ständig an den Ladevorgang zu denken!

Durch die Möglichkeit kontaktlos Laden zu können, ergeben sich einige Vorteile. Der wie im Fallbeispiel beschriebene geringere zeitliche Aufwand kommt sehr stark zu tragen, da eine Ladung eines Elektrofahrzeugs, nicht wie bekannt von einem Fahrzeug mit Verbrennungsmotor alle 500-1000 km, sondern täglich ausgeführt werden muss. Durch eine automatische Ladung mittels eines KEU-Systems ergibt sich auch eine längere Reichweite, da der Energiespeicher stets gefüllt wird. Diese kontinuierliche Nachladung wirkt sich auch positiv auf die Lebensdauer der Batterie aus, da durch kurzzeitiges, zum Beispiel „DC Schnellladen“, die Batterie stärker beansprucht wird.

Nicht nur die Möglichkeit der Erhöhung der Reichweite sondern auch die Benutzerfreundlichkeit dieser Systeme ist hervorzuheben.

Bei einem kontaktlosen Ladekonzept führen keine Leitungen zum Fahrzeug womit auch das Gefahrenpotential am Abstellplatz reduziert wird. Keine vorhandenen offenen elektrisch leitenden Kontakte sind ein weiterer Vorteil, die für das kontaktlose Laden sprechen. Durch diese Ausführung ist eine höhere Sicherheit vorhanden.

1.2. Aufgabenstellung

In Zusammenarbeit mit der Audi Electronics Venture GmbH sollten erste Versuche mit kontaktlosen Energieübertragungs-Systemen (KEU-Systemen) gemacht werden. Den Versuchsmessungen gehen grundlegende Überlegungen für das Verständnis solcher KEU-Systeme voraus. Zum Einen sollten reproduzierbare Messungen generiert werden, um einen Vergleich von verschiedenen KEU-Systemen zu ermöglichen. Des weiteren sollten Kriterien definiert werden durch die ein strukturierter Vergleich ermöglicht wird.

Ziele der Diplomarbeit

- Erläuterung von unterschiedlichen KEU-Systemen
- Grundlagen von KEU-Systemen
- Bestimmung von Kriterien
- Übersicht über Grenzwerte
- Erstellung einer Prüfanweisung
- Anwendung der Prüfanweisung an einem vorhanden KEU-System
- Beschreibung eines strukturierten Vergleichs

1.3. Die AUDI AG



Die AUDI AG bildet mit ihren sechs traditionsreichen Automobilstandorten eine Tochtergesellschaft der Volkswagen-Gruppe. Das Hauptaugenmerk des Ingolstädter Automobilherstellers ist es, im Premiumsegment durch seinen Leitspruch „Vorsprung durch Technik“ zu begeistern und sein Ziel ist, ab 2015 1,5 Millionen Autos im Jahr zu verkaufen.

Den Grundstein für das Unternehmen legte August Horch mit seiner zweiten Automobilunternehmensgründung 1909 in Zwickau mit dem Namen Audi¹. Sein erster großer Erfolg war der Audi Typ C 14/35 PS, auch „Alpensieger“ genannt. Durch die Fusion 1932 wurde das Audi Signet - die „Vier Ringe“ - geboren und steht für den Zusammenschluss von Audi, DKW, Horch und Wanderer. Heutzutage beschäftigt die AUDI AG 53.000 hochqualifizierte Mitarbeiter. Der Produktionsstandort Ingolstadt beschäftigt alleine 32.707² Mitarbeiter.

Neben den Produktionslinien für Audi A3, Audi A3 Sportback, Audi A4, Audi A4 Avant und Audi A5 sowie Audi Q5 werden im Verbund mit Audi Hungaria Audi TT Coupé und Audi TT Roadster Karosseriebau und Lackierung realisiert. Die zwei Millionen Quadratmeter Grundfläche des Hauptstandortes in Ingolstadt entsprechen den Dimensionen von 290 Fußballfeldern [1].

Der Hauptfirmensitz Ingolstadt liegt in der Mitte Bayerns an der Donau. Die Region Ingolstadt mit den Landkreisen Eichstätt, Neuburg-Schrobenhausen, Pfaffenhofen und Ingolstadt umfasst rund eine Million Einwohner. Die Stadt Ingolstadt hat 124.000 Einwohner. [18]



Abbildung 1.1.: Hauptfirmensitz der AUDI AG in Ingolstadt

¹Audi: lateinische Übersetzung von „horch“

²Stand: 31.Dezember 2009



Der Firmensitz der AEV liegt in Gaimersheim ca. 3,5km von der AUDI AG entfernt. Der Markt Gaimersheim bildet mit seinen 1840 Einwohnern ein Vorort von Ingolstadt. [23]

1.4. Audi Electronics Venture GmbH

Die vielfältige Integration von Elektronik in der Automobilbranche fordert ein möglichst schnelles und flexibles Reagieren auf Trends und Entwicklungen. Mit der Audi Electronics Venture GmbH (AEV) stellt sich Audi dieser Herausforderung. Die Philosophie der 100%igen Audi Tochter ist es, durch Vernetzung relevanter Kompetenzen eine stabile und flexible Transferstelle zu generieren, die Innovationen und Technologien zur Marktreife bringt.

Die Audi Electronics Venture GmbH wurde 2001 gegründet und beschäftigt 104 Mitarbeiter ³. Durch die Nähe zur Forschung und Industrie wird eine Verringerung der Time-to-Market-Zeit erreicht, was zu nachhaltigen Wettbewerbsvorteilen führt. Bei vielen Projekten ist das Ziel nicht die Serienreife, sondern der Nachweis der Machbarkeit gewisser Ideen im Fahrzeug.

Das Leistungsportfolio der GmbH umschließt einige Fachgebiete. Softwareentwicklung, Vor-/ Funktionsentwicklung, Technologie-Scouting und Kooperationsmanagement sind nur einige der interessanten Leistungsbereiche der AEV.

Audi
Electronics Venture GmbH



Abbildung 1.2.: Logo der Audi Electronics Venture GmbH

³Stand: 2009

1.5. Historischer Rückblick auf die kontaktlose Energieübertragung

Nikola Tesla, auch von vielen internationalen Medien als der „Größte Erfinder aller Zeiten“ genannt, befasste sich bereits im 19. Jahrhundert mit der freien Energieübertragung. Allerdings konnte er dieses Experiment, den „Wardenclyffe tower“, nicht mehr fertigstellen. So ist diese Art der Energieübertragung vielen noch bis heute ein Mysterium.[6]

In den letzten 20 Jahren sind immer neue Technologien auf den Markt gekommen, die die Energieübertragung im freien Raum nutzen. Erst durch den großen Aufschwung der Elektromobilität ist diese Form der Energieübertragung interessant geworden. Im Jahr 1996 wurde diese Technologie in Form eines Steckers, auch „Paddel“ genannt, von General Motors zur Ladung des EV1 verwendet. Dabei wurde aber nur ein geringer Zwischenraum überwunden. Das Lade-„Paddel“ musste dabei wie ein Stecker an das Elektrofahrzeug angeschlossen werden.

Seit einiger Zeit sind Systeme im Einsatz, die Busse im öffentlichen Verkehr laden. Dabei wird die Betreuung des Ladevorgangs immer von einem geschulten Personal überwacht. Für den Einsatz eines KEU-Systems im täglichen Leben müssen noch einige offene Punkte berücksichtigt werden.

Als EV1 wurde das in Serie gebaute Elektroauto von General Motors bezeichnet. Dieses wurde im Zeitraum von 1996 bis 1999 produziert. Die Fahrzeuge wurden nach Auslauf der Leasingverträge alle zurückgerufen und verschrottet[11].

2. Übersicht über Förderprojekte und Anbieter

In diesem Abschnitt sollte ein Überblick über schon bestehende KEU-Systemhersteller und ein Ausblick auf Arbeitskreise und Projekte gegeben werden. Im größer werdenden Anteil an E-Fahrzeugen am Automobilssektor erkennen viele Firmen ein interessantes Marktpotential. Allerdings gibt es im Bereich der Ladestationen bzw. von Ladekonzepten noch keinen Konsens unter den Herstellern. Beständig drängen neue Firmen auf den Markt. In vielen Teilen der Welt werden derzeit KEU-Systeme getestet und erprobt. Einige dieser Versuchsprojekte werden, im Rahmen von Förderprojekten, von Regierungen gefördert, da eine alternative Lösung zum kabelgebundenen Laden die gesamte Elektromobilität attraktiver macht. Daran knüpft sich die Hoffnung, dass durch ein komfortables Ladekonzept die täglich nötige Anbindung an eine Energiequelle verbessert wird und dadurch eine größere Kundenakzeptanz auftritt, die zu einem rascheren Ausbau der Elektromobilität führt.

2.1. Förderprojekte

Es gibt einige nationale Förderprojekte im Bereich der Elektromobilität, die sich auch mit einer kontaktlosen Energieübertragung beschäftigen. In dieser Arbeit werden zwei Förderprojektstellen beschrieben; je eine von Deutschland und eine von Österreich. Der Ausbau der Elektromobilität wird von diesen Regierungen als Gemeinwohl gesehen, indem E-Fahrzeuge als mögliche Alternative im Stadtverkehr gefördert werden.

2.1.1. Förderprojekte des Deutschen Bundesministeriums



Das Bundesministerium für Umwelt (BMU), Naturschutz und Reaktorsicherheit unterstützt drei Verbunde, die bis 30.09.2011 die Machbarkeit wie auch die Umsetzbarkeit dieser Technologie betrachten sollten. In den drei Verbunden arbeiten jeweils Partner aus Forschung und Industrie an der Entwicklung eines KEU-Systems. Ziel ist es, ein Ladekonzept vorzustellen, bei dem der Wirkungsgrad $> 90\%$ liegt und keine mechanische Verbindung hergestellt wird. Die Ergebnisse der drei Projekte werden im Herbst 2011 bei einer gemeinsamen Präsentation vorgestellt.

W-Charge

W-Charge

In dem Förderprojekt W-Charge arbeiten die Audi Electronics Venture GmbH, VW und Vahle in Kooperation mit dem Fraunhofer IWES an der Ausstattung von drei Elektrofahrzeugen mit einem KEU-System. Für die Spulenfertigung wurde in diesem Verbund die aus Kamen stammende Paul Vahle GmbH & Co beauftragt. Ein besonderer Schwerpunkt dieses Projektes ist die drahtlose Kommunikation zwischen Primär- und Sekundärseite.[15]

IndiOn

Der Verbund IndiOn wird durch die Projektpartner BMW und Siemens AG vertreten. Der Schwerpunkt dieser Kooperation liegt in der Erreichung eines sehr hohen Wirkungsgrads.

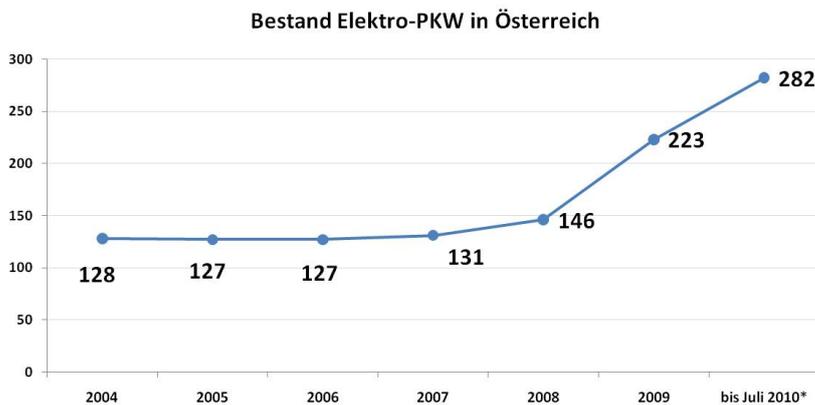
Conductix

Beim dritten Verbund Conductix wird die Ausstattung eines Range-Extender-Fahrzeugs mit einem kabellosen Ladekonzept erarbeitet. Diese Aufgabenstellung wird dabei von Conductix-Wampfler AG und Daimler AG übernommen.

2.1.2. e-connected



Die in der Initiative e-connected verfolgten Ziele betreffen die Einschränkung der CO₂-Emissionen durch die Einführung von E-Mobilität in Österreich. Seit dem Kick-Off 2009 beschäftigt sich diese Initiative in Zusammenarbeit mit einigen Firmen mit diesem Thema. Der in Abbildung 2.1 dargestellte Bestand an Elektro-PKW's in Österreich zeigt einen deutlichen Anstieg in den letzten Jahren.



Quelle: Statistik Austria

*Berechnung: Bestand Elektro-PKW 2009: 223
+ Neuzulassungen 01-07/2010: 59

Abbildung 2.1.: Auszug aus dem e-connected Bericht[8]

Für den weiteren Anstieg an verkauften Elektrofahrzeugen in Österreich sprechen die vielen Vorzüge dieser Fahrzeuge. Darunter die vom österreichischen Bundesministerium für Finanzen festgelegte Regelung, dass für Elektrofahrzeuge keine Normverbrauchsabgabe (NOVA) bezahlt werden muss. Weiters entfällt die motorbezogene Versicherungssteuer. [5]

Die Normverbrauchsabgabe ist für Motorräder und Kraftwagen, die im Eigenimport nach Österreich eingeführt werden, zu entrichten. Sie ist abhängig von der Motorisierung des Fahrzeugs.

2.2. Anbieter von KEU-Systemen

2.2.1. Wampfler Germany



IPT bezeichnet die Firma Wampfler ihre Systeme zur induktiven Leistungsübertragung (Inductive Power Transfer)

Die 1959 gegründete Firma Wampfler befasst sich schon seit 1997 mit der Entwicklung von KEU-Systemen. Die Firmenbezeichnung dieser KEU-Systeme ist IPT. Besonderes Interesse haben sie in Fachkreisen mit einem Bus Charging System aus ihrer IPT Charge Reihe erweckt. Dabei handelt es sich um KEU-Systeme zum Einsatz in Fahrzeugen. 2003 wurden in Turin, Italien, 20 Busse mit einem solchen System ausgestattet. Dabei wurden maximal 60 kW in die Busse an den Haltestellen übertragen. Eine weitere Installation einer solchen Anlage ist in Genua, Italien.



(a) vertikale Ausrichtung der Spule

(b) ankommender Bus

Abbildung 2.2.: Busladestation in Turin (Italien)[7]

Wie man in der Abbildung 2.2 (a) erkennt, senkt sich die Sekundärspule ab und erzielt dadurch einen sehr geringen Luftspalt. Dieser beträgt ca. 2 cm. Es ist zu bedenken, dass beim Einsatz eines KEU-Systems in Bussen des öffentlichen Verkehrs das Personal stets geschult wird und man diese Konzepte nicht einfach in die Automobilindustrie übernehmen kann. Die verwendeten Spulen sind auch aufgrund ihres Gewichtes nicht eins-zu-eins für die Verwendung in Personenkraftwagen geeignet. Weitere ähnliche Produkte der Firma Wampfler sind die IPT Rail und IPT Bodensysteme, welche sich mit kontaktloser Energieübertragung in Förder- und Industrieanlagen beschäftigen.[33]

Mit dem am 20. Januar 2011 veröffentlichten internationalen Patent WO 2011/006884 A2 hat die Conductix-Wampfler AG einen wesentlichen Patentanspruch auf Systeme zum induktiven Laden

von Fahrzeugen mit elektronischer Positionierungshilfe. Die Patentansprüche umfassen jegliche Hilfestellung durch Sensoren zur Positionierung über der Primärspule. Aber auch die bauliche Ausführung, Beleuchtung und Identifikation der Primärseite wurde in diesem Patent geschützt.

2.2.2. Vahle

Die Firma Vahle mit Firmensitz in Kamen arbeitet seit Jahren an der mobilen Energie- und Datenübertragung für Industrieanwendungen. Sie ist am W-Charge Projekt beteiligt und mit der Auslegung und Produktion der Spulen befasst. Das verfolgte Prinzip ist eine Spule mit großem Durchmesser, wo im Zwischenraum keine zu hohen Feldstärken vorkommen. Bei den von der Firma Vahle in der Vergangenheit entwickelten Systemen wurde eine Frequenz von 20 kHz verwendet. Durch den größeren Luftspalt bei der neuen Anwendung wird das neue KEU-System mit einer höheren Frequenz betrieben.[28]



Abbildung 2.3.: Nummernschildintegration von Vahle und Kostal[2]

Vahle und Kostal

KOSTAL

Durch die Zusammenarbeit der beiden Firmen Vahle und Kostal wurde ein Prototyp eines KEU-Systems bereits vorgestellt. Die Anbringung der Spulen ist dabei im Bereich des Nummernschildes an der Fahrzeugvorderseite gedacht wie in Abbildung 2.3 sichtbar. Das Fahrzeug sollte dabei an eine Ladesäule fahren und dadurch den Magnetkreis schließen. Durch den geschlossenen Zustand kommt es zu keinem Zwischenraum, der überwacht werden muss. Problematisch gestaltet sich aber der Fussgängerschutz bei einer solchen Lösung.



2.2.3. Evatran

Die aus Wytheville, Virginia, stammende Firma Evatran wurde von der international tätigen Herstellerfirma für Transformatoren MTC 2009 gegründet. Evatran konzentriert sich ausschließlich auf die kontaktlose Energieübertragung und bewirbt diese mit dem Slogan „Plugless Power park and go“. Im Gegensatz zu vielen anderen Firmen betreibt Evatran ihr KEU-System mit einer geringeren Frequenz. Erweitert wird das System von der Möglichkeit, die Primärspule seitlich automatisch auszurichten. Diese Horizontalbewegung findet im Primärgehäuse statt.[10]

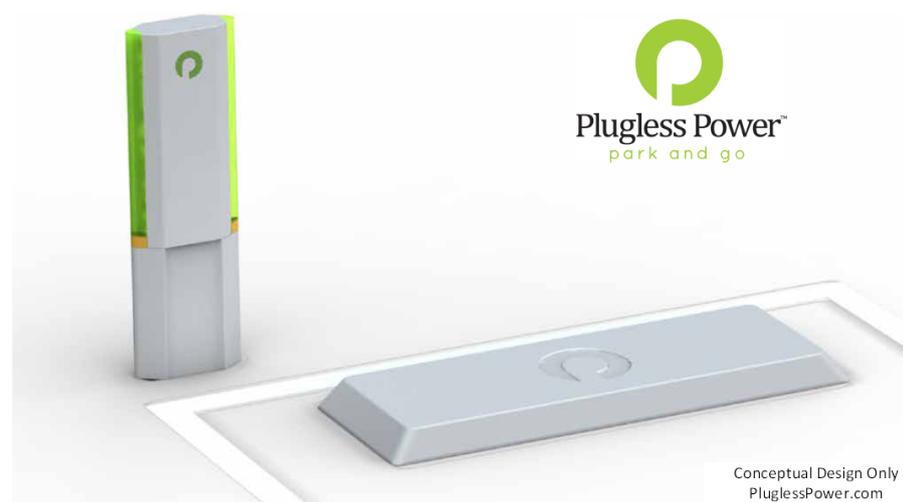


Abbildung 2.4.: Symbolbild einer Ladestation von Evatran [10]

2.2.4. WiTricity



Ausgehend von einem Universitätsprojekt des Massachusetts Institute of Technology (MIT) wurde die Firma WiTricity 2007 gegründet und präsentierte eine kontaktlose Energieübertragung über zwei Meter. Dabei wurde eine 60 Watt Glühbirne versorgt. Die darauf folgenden Produkte befassten sich mit der kontaktlosen Energieversorgung für Unterhaltungselektronik. Ausgehend von dem „low Power“ Bereich bewirbt WiTricity mittlerweile auch KEU-Systeme für E-Fahrzeuge. Delphi stellt in diesem Bereich den aktuellen Partner dar. Aus den weitreichenden Forschungsarbeiten von WiTricity sind einige Patente hervorgegangen. Die momentane Spulengröße ist 0,5 m x 0,5 m und zeichnet sich durch eine spezielle Spulenanordnung aus, die bereits eine Leistung von 3,3 kWatt überträgt.[35]

2.2.5. SEW-Eurodrive



Im Bereich Antriebstechnik und Automatisierung ist SEW-Eurodrive gemäß firmeneigener Berichte ein weltweit führendes Unternehmen. Das 1931 mit dem Namen „Süddeutsche Elektromotorenwerke“ gegründete Unternehmen hat seinen Hauptsitz in Bruchsal, Deutschland. Die weiteren Standorte sind weltweit verteilt. Das im Industriebereich gut aufgestellte Unternehmen versucht die Erfahrung mit KEU-Systemen für Förderanlagen nun auch in Ladestationen für E-Fahrzeuge einzusetzen. Das von ihnen entwickelte KEU-System wurde bereits bei Fachmessen im Betrieb gezeigt. Dabei handelte es sich um Systeme mit Frequenzen unter 100 kHz. Die von SEW-Eurodrive weiterentwickelte neue Lösung beinhaltet eine große Spule, die mit einer Frequenz im Bereich von 145 kHz arbeitet. Die Versorgungseinheit wurde bereits in eine einfache Steckereinheit integriert. [27]

2.2. Anbieter von KEU-Systemen



Abbildung 2.5.: Symbolbild einer Ladestation von SEW-Eurodrive



2.2.6. Halo IPT London Citroen

Halo IPT bezeichnet sich laut Firmenhomepage als Führer in dem Bereich induktiver Leistungsübertragung. Begründet wird dieses Aussage mit einer mehr als 20 Jahre langen Erfahrung. Dabei wird nicht nur das Laden im Stehen, sondern auch während der Fahrt betrachtet. Das Unternehmen ist in Großbritannien angesiedelt. Die von Halo IPT verwendete Frequenz liegt im Bereich von 20 kHz bis 100 kHz. [16]

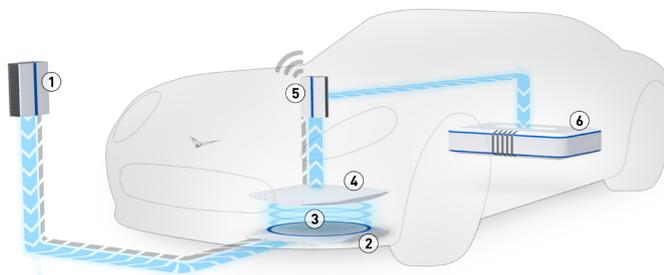


Abbildung 2.6.: Symbolbild einer Ladestation von Halo IPT [35]

2.2.7. wirelesspowerconsortium

„Wirelesspowerconsortium“ ist ein Zusammenschluss von unabhängigen Firmen die das gemeinsame Ziel verfolgen, einen Standard für kontaktlose Energieübertragung in der Unterhaltungselektronik zu erzielen. Unter den 82 beteiligten Firmen sind Nokia, Panasonic, Philips Electronics und Atmel, um nur einige zu nennen. Die Vision ist hierbei das Energieversorgungskabel durch eine kabellose Technologie zu ersetzen und so ein im Raum unabhängiges Gerät zu entwickeln [34].

WIRELESS POWER
CONSORTIUM

2.2.8. Bombardier

Die in Montréal (Canada) ansässige Firma Bombardier teilt sich in zwei große Teilbereiche. Die seit 1986 bestehende „Aerospace“-Sparte, die sich mit der Entwicklung von Flugzeugen beschäftigt, stellt einen Teilbereich dar. Der zweite ist der seit 1971 bestehenden „Rail Transportation“-Bereich, wo der Fokus auf dem Bau von Zügen und Straßenbahnen liegt. Bombardier ist in 23 Staaten weltweit vertreten und bietet somit ein weit ausgebautes Netzwerk an Vertriebsknoten. Mit der neuen Firmensparte primoveCity reagiert Bombardier auf den immer größeren Markt der Elektromobilität. Die zugrunde liegende Vision ist eine im Boden integrierte kontaktlose Energieversorgung für Busse, Straßenbahnen und Personenkraftwagen. An Realisierungsprojekten solcher Übertragungssysteme in Straßenbahnen und Bussen ist die Firma aktiv beteiligt. Erwähnt sei dabei u.a. ein Straßenbahnprojekt in Augsburg und eine Entwicklungszusammenarbeit mit Flanders'DRIVE. Der Aufbau eines eigenen Nutzfahrzeugs mit einem solchen KEU-System, bei welchem auch während der Fahrt geladen werden kann, soll im Sommer 2011 begonnen werden[4].

BOMBARDIER

2.2. Anbieter von KEU-Systemen



Abbildung 2.7.: Dynamische Ladesystem für Elektrobuse von Bombardier in Flanders' DRIVE Projekt[4]

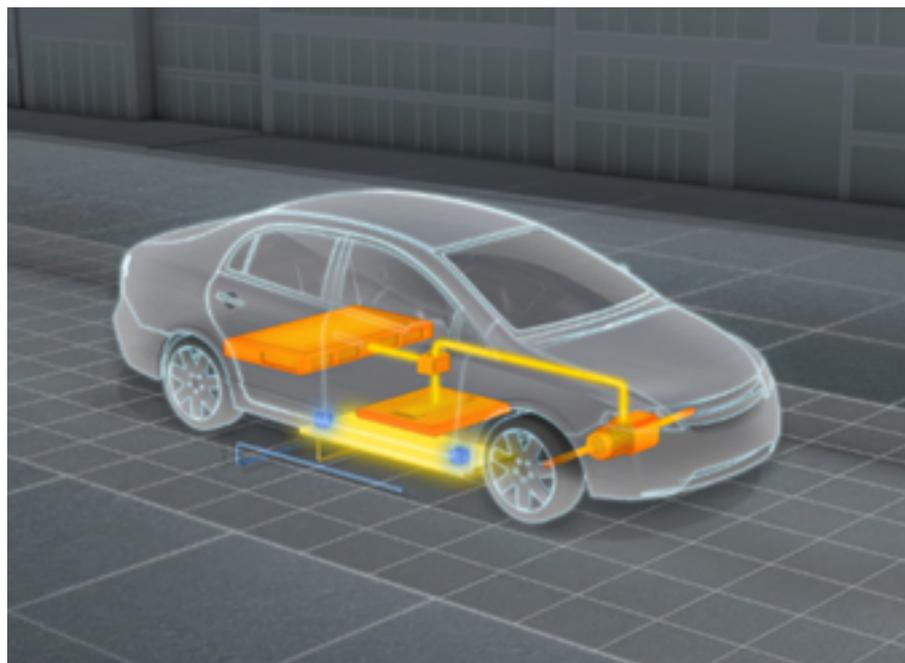


Abbildung 2.8.: Symbolbild einer Ladestation von Bombardier[4]

3. Grundlagen der kontaktlosen Energieübertragung

Um die Grundlagen von KEU-Systemen zu beschreiben, wird zu Beginn der Fokus auf die einfache induktive Übertragung gelegt. Diese wurde bereits von Faraday 1831 verwendet und seit dieser Zeit durch viele Gesetzmäßigkeiten beschrieben[12]. Die Anwendung dieser Grundlagen in einem neuen technologischen und gesellschaftlichen Umfeld bringt neue Herausforderungen mit sich. Diese liegen in der Übertragung des Magnetfeldes über eine Luftstrecke mit einer sehr hohen Leistung. Dabei kommt es zu einigen neuen Gesichtspunkten, die in der Betrachtung berücksichtigt werden müssen.

3.1. Technische Hintergründe

Grundlage für die Realisierung eines KEU-Systems ist die induktive oder kapazitive Kopplung. Aufgrund der Dielektrizitätseigenschaften hat ein kapazitives KEU-System wesentliche Nachteile im Vergleich zu einem induktiven System. Die Treiberspannung und die Frequenzen, die bei kapazitiver Übertragung benötigt werden, führen zu großen Verlusten. Daher werden sich die weiteren Betrachtungen ausschließlich mit einem induktiven KEU-System befassen. [26]

3.1.1. Feld einer Luftspule

Eine in einem Leiter bewegte Ladung erzeugt ein Magnetfeld, welches den Leiter umschließt. Die magnetische Feldstärke beschreibt

3.1. Technische Hintergründe

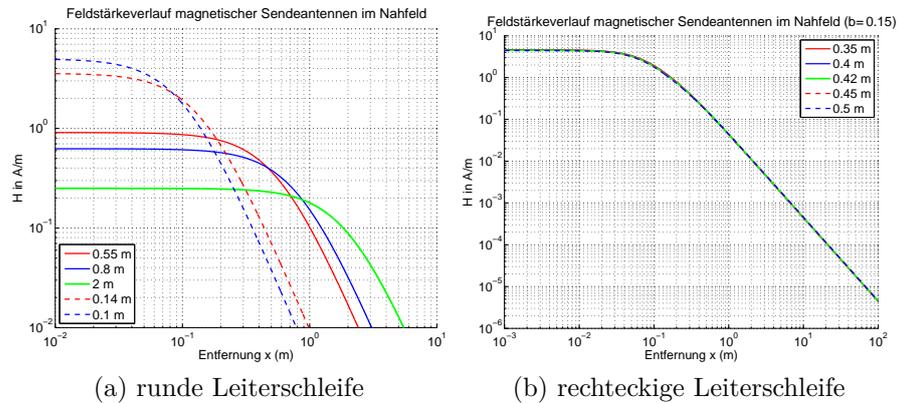
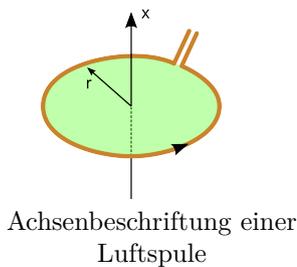


Abbildung 3.1.: Betrachtung von Leiterschleifen mit unterschiedlichem Radius. Bei einem Leiterstrom von $I = 1A$ und der Windungszahl $n = 1$.



dieses Magnetfeld unabhängig von den Materialeigenschaften des Raumes.

Das Umlaufintegral der magnetischen Feldstärke längs einer geschlossenen Kurve ist gleich der Summe der Stromstärken der eingeschlossenen Ströme[20]

$$\sum I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{s} \quad (3.1)$$

Wendet man dieses Umlaufintegral auf eine Leiterschleife an, kann man damit den Feldstärkeverlauf $H(x)$ beschreiben. $H(x)$ entspricht der Feldstärke entlang einer Achse die normal auf die Schleifenfläche steht und sich im Zentrum der Schleife befindet.[25]

$$H = \frac{I \cdot N \cdot r^2}{2\sqrt{(r^2 + x^2)^3}} \quad (3.2)$$

In Abbildung 3.1 sieht man, dass auch bei größeren Leitungsschleifendurchmesser ab einer gewissen Entfernung größere Feldstärken auftreten als bei kleineren Schleifen.

Um ein Optimum für den Leiterquerschnitt zu finden wird in der Abbildung 3.2 a) der Verlauf der Feldstärke in Abhängigkeit von

3. Grundlagen der kontaktlosen Energieübertragung

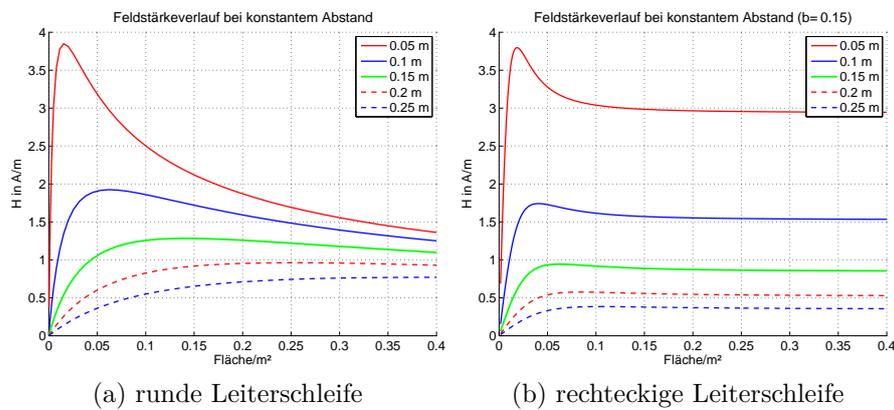


Abbildung 3.2.: Verlauf der Feldstärke H einer Sendeantenne bei konstantem Abstand x und variablem Radius R . Bei einem Leiterstrom von einem A und einer Windung [13]

dem Leiterquerschnitt betrachtet. Die Auswahl des Leiterquerschnittes sollte im Bereich des Maximums und je nach Luftspaltgröße gewählt werden.

Die Ausführung von KEU-Systemen in Rechteckform bietet sich aus folgenden Gründen an. Für den Verbraucher bringt die Rechteckform mehr Freiraum in der Positionierung. Zudem ist die Feldverteilung in dieser Form der Ausführung gleichmäßiger auf die Fläche verteilt. Die Verteilung wird gemäß Formel 3.3 berechnet.[13]

$$H = \frac{N \cdot I \cdot a \cdot b}{4\pi \cdot \sqrt{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + \left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2}} \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + x^2} + \frac{1}{\left(\frac{b}{2}\right)^2 + x^2} \right) \quad (3.3)$$

Bei der Betrachtung der Abbildung 3.2 b) sieht man die optimale Größe einer Leiterschleife. Bei der Darstellung mit konstanter Länge bleibt eine gewisse Feldstärke über den gesamten Bereich erhalten. Um die von der Leiterschleife erzeugte Feldstärke zusammenzufassen, spricht man im Allgemeinen vom magnetischen Fluss ϕ . Der Zusammenhang von ϕ und der magnetischen Feldstärke H ergibt sich über die Fläche und die magnetische Permeabilität.

$$\phi = B \cdot A \quad (3.4)$$

$$\phi = H \cdot \mu \cdot A \quad (3.5)$$

Permeabilität $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$

3.1.2. Magnetische Kopplung

Bei einem KEU-System spricht man meist von einer Primär- und einer Sekundärspule. Bei der Primärspule handelt es sich um die an der Infrastruktur verbaute Spule. Die Sekundärspule wird am Fahrzeug angebracht. Die Begriffe kommen vom Transformatorbau, wo man auch eine primäre und sekundäre Seite unterscheidet.

Um ein KEU-System zu verwirklichen, ist neben der Senderspule auch eine Empfangsspule nötig. Mit Hilfe des Biot-Savart Gesetzes können die Feldlinien einer Luftspule dargestellt werden. Durch das Einbringen einer zweiten Spule kann eine erste Aussage darüber getroffen werden, welche Feldlinien an der Sekundärspule zu tragen kommen.[22]

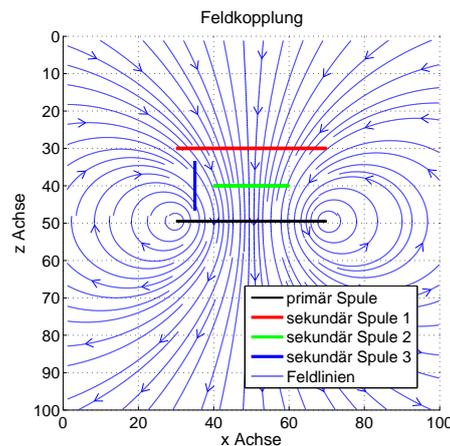


Abbildung 3.3.: Darstellung der Kopplung von Spulen

Wie in der Abbildung 3.3 dargestellt ist die Auslegung der Sekundärspule wesentlich. Wie man bei der Ausrichtung der Spule 3 sieht kommt es nur zu einer geringen Kopplung. Ein Optimum wird von einer Spule mit gleicher Größe erreicht, wie dies mit Spule 3 dargestellt wird. Um diese Kopplung auch mathematisch zu betrachten, werden die Begriffe Induktion und Gegeninduktivität verwendet. Die *Induktion* ist von den Materialeigenschaften des umschlossenen Raumes und der Geometrie der Schleife abhängig:

$$L = \frac{N \cdot \phi}{I} = \frac{N \cdot \mu \cdot H \cdot A}{I} \tag{3.6}$$

Bei der *Gegeninduktivität* wird die Einkopplung einer Spule in die andere betrachtet. Unter Berücksichtigung des magnetischen Flusses, der durch beide Spulen fließt ϕ_{12} bzw. ϕ_{21} , kann mit Hilfe der Schleifenanzahl N_2 und dem Primärstrom i_1 die Gegeninduktion M_{21} berechnet werden.[22]

$$M_{12} = \frac{N_2 \cdot \phi_{21}}{i_1} \tag{3.7}$$

Bei einem KEU-System ist der Effekt der Gegeninduktivität erwünscht, da dadurch die Energie übertragen wird. Die Gegeninduktivität M hängt vom Produkt der Windungszahlen der Primär- und Sekundärseite ab.[22]

$$M \approx N_1 \cdot N_2 \quad (3.8)$$

3.1.3. Induktion einer Spannung

Durch die magnetische Kopplung kommt es zur Induktion einer Spannung in der Sekundärspule. Dies wird aus der Betrachtung der 2. Maxwellgleichung, dem Durchflutungsgesetz (in Integralform: 3.9 oder in Differentialform: 3.10), ersichtlich. Durch diese Gesetzmäßigkeiten stellt sich ein magnetisches Feld in der Leiterschleife ein.

$$\oint_S \vec{H} d\vec{s} = \iint_A \left(\vec{j}_L + \frac{d\vec{D}}{dt} \right) d\vec{A} \quad (3.9)$$

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{j}_L + \frac{d\vec{D}}{dt} \quad (3.10)$$

Um die 2. Maxwellgleichung anwenden zu können wird der Weg entlang der Leiterschleife betrachtet. Dieser wird mathematisch durch $d\vec{s}$ beschrieben. Ergibt der Vektor $d\vec{s}$ einen geschlossenen Ring, ergibt sich aus 3.9:

$$\Theta = \oint_s \vec{H} \cdot d\vec{s} = \int \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad (3.11)$$

Der rechte Teil der Gleichung 3.11 entspricht dem Leiterstrom. Wird nun eine Luftspule betrachtet, muss man die Windungszahl berücksichtigen.

$$\Theta = I \cdot N \quad (3.12)$$

Durch die Gleichung 3.12 wird die erzeugte Durchflutung von der Spule beschrieben.

3.1.4. Ersatzschaltbild zweier gekoppelter Spulen

Um die zuvor betrachtete Anordnung der beiden Spulen in ein Schaltbild zu bringen, werden die ohmschen Widerstände der beiden Spulen als R_1 und R_2 dargestellt und die Induktivitäten als L_1 und L_2 . Wie in Abbildung 3.4 dargestellt, tritt zwischen den beiden Induktivitäten eine Wechselwirkung auf. Diese wird in der Schaltung als Gegeninduktivität M gekennzeichnet.

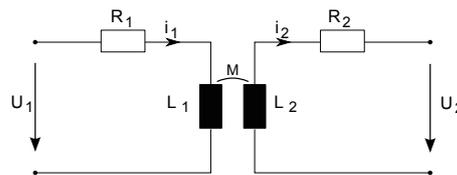


Abbildung 3.4.: Allgemeines Ersatzschaltbild[21]

Das allgemeine Ersatzschaltbild zeigt die primäre und sekundäre Seite getrennt. Für gemeinsame Betrachtungen wird das T-Ersatzschaltbild Abbildung 3.5 verwendet. Dabei müssen die Komponenten der Sekundärseite auf die Primärseite umgerechnet werden. Dabei ist das Übertragungsverhältnis ausschlaggebend.

$$\ddot{u} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.13)$$

Beim Zusammenfassen der Schaltung wird die Hautinduktivität durch L_H , die Streuinduktivität durch $L_{1\sigma}$ und $L_{2\sigma}$ und die Eisenverluste im Kernmaterial durch R_{Fe} berücksichtigt.

$$\text{Hauptinduktivität :} \quad L_H = \ddot{u} \cdot M \quad (3.14)$$

$$1.\text{Streuinduktivität :} \quad L_{1\sigma} = L_1 - \ddot{u} \cdot M \quad (3.15)$$

$$L_{1\sigma} = L_1 - L_H \quad (3.16)$$

$$2.\text{Streuinduktivität :} \quad L_{2\sigma} = L_2 - \frac{1}{\ddot{u}} \cdot M \quad (3.17)$$

Um die berechneten Komponenten auf die Primärseite zu bringen, werden diese mit dem Übersetzungsverhältnis folgendermaßen verknüpft. Dabei sind die mit * gekennzeichneten Größen auf die Primärseite umgelegt.

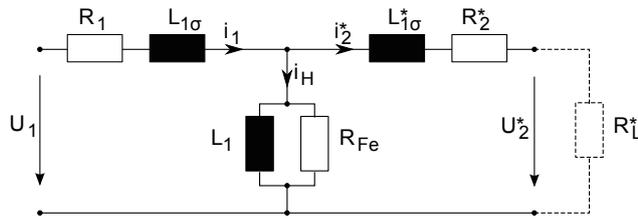


Abbildung 3.5.: T-Ersatzschaltbild[21]

Sekundärspannung : $u_2^*(t) = \ddot{u} \cdot u_2(t)$ (3.18)

Sekundärstrom : $i_2^*(t) = \frac{1}{\ddot{u}} \cdot i_2(t)$ (3.19)

Sekundärstreuinduktivität : $L_{2\sigma}^* = \ddot{u}^2 \cdot L_{2\sigma}$ (3.20)

Sekundärspulenwiderstand : $R_2^* = \ddot{u}^2 \cdot R_2$ (3.21)

Lastwiderstand : $R_L^* = \ddot{u}^2 \cdot R_L$ (3.22)

3.1.5. Resonanz-Prinzip

Bei der magnetischen Kopplung zweier Spulen wird der Anteil des Hauptfeldes betrachtet. Dieser ist für die Übertragung der Energie verantwortlich. Da es bei einem KEU-System zur Erzeugung von Haupt- und Streufeldern gleicher Größenordnung kommt, wird das Streufeld durch schaltungstechnische Kompensationen verkleinert. Diese Kompensationen können mit Hilfe von Kapazitäten in Reihen- oder Parallelschaltung im Primär- und Sekundärkreis erfolgen.[21] Durch diese Anordnungen der Kapazitäten erhält man einen Reihen- bzw. Parallelschwingkreis. Dieser Schwingkreis nimmt zu Beginn des Ladevorgangs die Energie auf und versorgt daraus das Streufeld. Nur durch diese Energieverteilung kann eine Übertragung mit hohem Wirkungsgrad erreicht werden. Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises errechnet sich wie folgt:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{LC}} \quad (3.23)$$

Reihenschwingkreis

Im Falle einer Reihenschaltung von Widerstand, Kondensator und Spule kommt es zu einem Energieaustausch zwischen Spule und

3.1. Technische Hintergründe

Kondensator, wenn man die Schaltung mit Wechselspannung versorgt. Im Falle von Resonanz kann am Messpunkt „MP2“ eine sehr hohe Spannung abgegriffen werden. Der Strom wird in diesem Fall nur durch den Widerstand R_1 begrenzt und erreicht so sein Maximum. (Stromresonanz)

Parallelschwingkreis

Im Gegensatz zum Reihenschwingkreis kommt es bei der Parallelschaltung von Widerstand, Kondensator und Spule zu einem Stromaustausch zwischen den beiden Bauteilen L und C . (Spannungsresonanz)

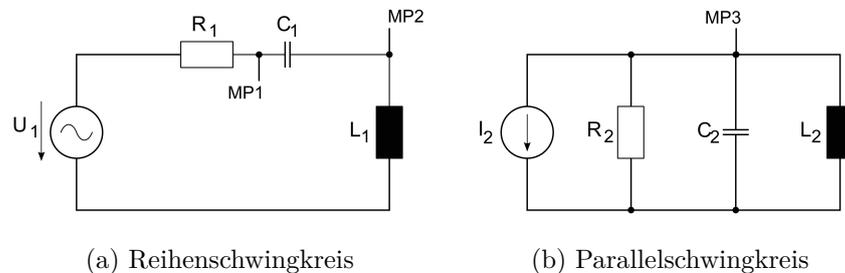


Abbildung 3.6.: Schaltbilder von Schwingkreisen

3.2. Blockschaltbild eines KEU-Systems

Um die Funktionsweise eines KEU-Systems zu veranschaulichen, wird im folgenden Abschnitt ein Blockschaltbild erläutert. Um zu Beginn den Fokus auf die nötigen Komponenten zur Energieübertragung zu legen, wird in Abbildung 3.7 eine vereinfachte Darstellung verwendet. Ein gesamtes Blockschaltbild einer KEU-Anlage wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

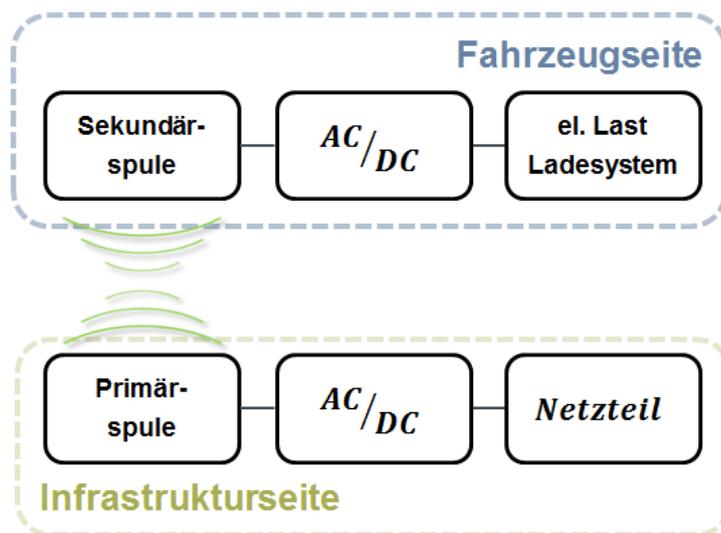


Abbildung 3.7.: Blockschaltbild der Hauptkomponenten eines KEU-Systems

Netzteil

Das Netzteil versorgt die KEU-Anlage mit Energie. Es wird an das Verteilnetz angeschlossen. Je nach Leistung wird die Anschlussleitung 1-phasig oder 3-phasig ausgeführt. Das Netzteil erzeugt eine Gleichspannung mit der es die weiteren Komponenten versorgt. Besondere Merkmale des Netzteils sind der Wirkungsgrad, die Ausgangsleistung und die Welligkeit der Ausgangsspannung.

DC/AC

Um aus der DC Versorgungsspannung ein magnetisches Wechselfeld erzeugen zu können, muss die DC Spannung wieder in eine Wechselspannung gewandelt werden. In Kombination mit dem

3.2. Blockschaltbild eines KEU-Systems

Netzteil arbeitet die DC/AC Komponente wie ein Schaltnetzteil, welches die Frequenz und Spannungshöhe wandelt. Je nach Hersteller können Komponenten des Schwingkreises hier oder in den Spulen selbst verbaut werden.

Primärspule

Die zur Infrastruktur zählende Primärspule wird am Parkplatz verbaut. Sie dient zur Erzeugung des Magnetfeldes. Die Ausführungsarten sind unterschiedlich. Einzelne Systeme unterscheiden sich in Hinsicht auf die Spule, in der Größe, der Ausführung wie auch der Anordnung und Verlegung der Spule. Durch Spulen-Ausrichtung wird die Richtcharakteristik des Magnetfeldes bestimmt. Durch die besondere Ausrichtung von Spulenanordnungen kann eine Auslöschung des Magnetfeldes im Fernbereich erreicht werden.

Sekundärspule

Ausgehend vom erzeugten Magnetfeld der Primärspule wird durch die am Fahrzeug verbaute Sekundärspule diese Energie empfangen. Die Ausführung der Sekundärspule kann sich baulich von der Primärseite unterscheiden. Dadurch ist eine geringe Anpassung an das Packaging des Fahrzeugs möglich. Bei Auslegung von Komponenten am Fahrzeug sind Bauraum und Gewicht wichtige Kriterien, die beachtet werden müssen.

AC/DC

Um mit der empfangenen Energie die Batterie speisen zu können, muss eine weitere AC/DC Wandlung durchgeführt werden. Es gibt Ausführungsarten, bei welchen die AC/DC Wandler getrennt im Fahrzeug verbaut werden. Hier muss ganz besonders auf die Verlegung der Leitungen geachtet werden, da oft hohe Spannungen auftreten können.

elektronische Last - Ladesystem

Die vom AC/DC Konverter ausgegebene Spannung wird im vereinfachten Blockschaltbild wie im Laboraufbau einfach einer elektronischen Last zugeführt. Diese Komponente wird im Fahrzeug durch das Ladesystem ersetzt. Eine Einspeisung in bestehende Ladesysteme - in den DC-Zwischenkreis - wird dabei angestrebt.

3.2.1. Blockschaltbild einer KEU-Anlage

In diesem Abschnitt soll die gesamte Funktion einer KEU-Anlage betrachtet werden. Zunächst werden Komponenten erklärt, die für den Betrieb nötig sind.

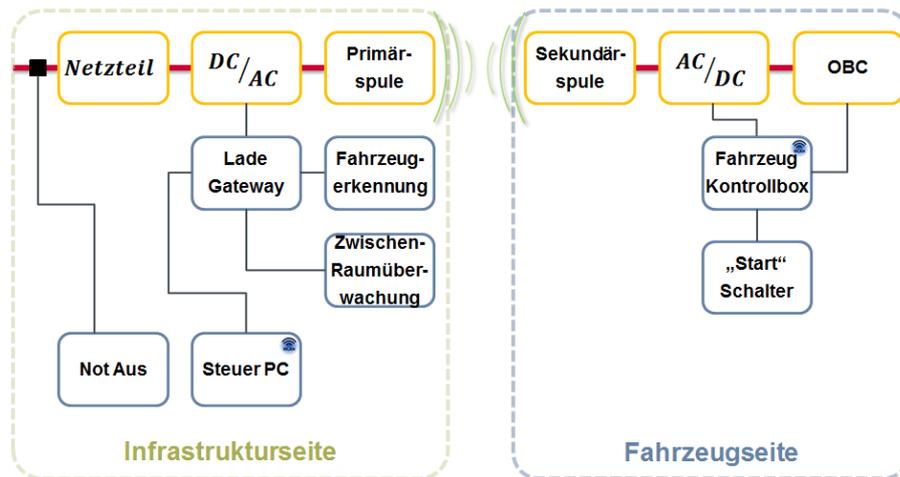


Abbildung 3.8.: Blockschaltbild einer KEU-Anlage

Die in Abbildung 3.8 in gelber Farbe markierten Blöcke werden direkt dem KEU-Systemhersteller zugeordnet. Die blau markierten Baugruppen können von anderen Herstellern zur Verfügung gestellt werden. Diese Unterscheidung hat den Vorteil einen möglichen Wechsel des KEU-Systemherstellers ohne einer großen Anpassung der Umfeld Komponenten vornehmen zu können.

Infrastruktur

An der Infrastruktur sind einige Funktionen für den Betrieb der Anlage nötig. Eine Fahrzeugerkennung (Vehicle Detection) aktiviert den Betrieb der Anlage. Diese kann durch Induktionsschleifen oder andere Sensoren realisiert werden. Die bei manchen KEU-Systemen nötige Zwischenraumüberwachung - wie hier an der Infrastrukturseite gezeigt - könnte aber auch auf der Fahrzeugseite angebracht werden. Durch die Auftrennung von „Charging Gateway“ und „Control PC“ ist es denkbar, über eine zentrale Steuerstelle mehrere Ladestation zu betreiben. Aus Sicherheitsgründen ist ein Notausschalter (Emergency Switch) erforderlich der die gesamte Anlage vom Netz nehmen kann.

Fahrzeugseite

Die Hauptkomponenten im Fahrzeug sind die Sekundärspule und der AC/DC-Konverter (Rectifier). Um eine überwachte Energieübertragung zu gewährleisten ist es nötig, Spannungs- und Stromwerte vom Gleichrichter zu messen und über eine am Fahrzeug verbaute Steuereinheit (Vehicle Control) an die Infrastruktur zu senden. Die Anforderungen des „on board“ Ladegerätes (OBC) sind weitere Informationen die übertragen werden müssen. Um den Betrieb zu starten, muss die fahrzeugseitige Steuerung einen Eingang dafür bereitstellen.

3.3. Ausführungsarten der Spulen

In diesem Abschnitt wird speziell auf die Konstruktion von Primär- und Sekundärspule eingegangen. Durch die Festlegung von Größe und Position an der Fahrzeugseite kommt es zu einer Unterscheidung von verschiedenen Ausführungsarten. Die mögliche Optimierung der magnetischen Kopplung durch die Ausführung einer positionierbaren Primärspule erweitert die Ausführungsarten. Daraus ergeben sich folgende Zusammenstellungen:



Ausführungsart A

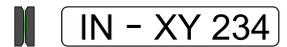
GAK 353.0.1 ist die Bezeichnung des gemeinsamen Arbeitskreises unter der Leitung des DKE zum Thema: „Berührungsloses Laden von Elektrofahrzeugen“

3.3.1. Ausführungsart A

Diese Ausführungsart wird auch vom Arbeitskreis GAK 353.0.1 verfolgt. Dabei sind die Spulen ausreichend groß auszuführen, damit es im Zwischenraum nicht zu einer Erwärmung von elektrisch leitenden Gegenständen kommen kann. Die verwendeten Spulen haben eine Größe von ca. 1 x 1 Meter. Der Luftspalt zwischen Primär und Sekundärspule ist größer als 15 cm. Besonders hervorhebenswert bei dieser Bauart ist die Ausführung ohne bewegliche Teile. Dies bringt in Hinsicht auf Vandalismus und Umwelteinwirkungen große Vorteile. In dieser Ausführungsart ist es möglich, die Sekundärseite geringfügig kleiner zu gestalten. Die Ergebnisse des Arbeitskreises sind in der ersten veröffentlichten Ausgabe VDE-AR-E2122-4-2 [29] vom März 2011 zusammengefasst.

3.3.2. Ausführungsart B

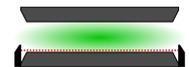
Ausführungsart B, auch Nummerschildlösung genannt, zeichnet sich durch ihre sehr kleinen Spulen aus, die im Betrieb in Berührung sind und daher den Spulenzwischenraum nicht zugänglich machen. Die Montage dieser Ausführung ist hinter dem Nummerschild angedacht. Durch die nötige Annäherung von vorne zur Primärspule schließt diese Lösung einige Parkmöglichkeiten aus. Die Primärspule wird dabei an einer Ladesäule angebracht. Eine Ausführung dieser Art wird in Abbildung 2.3 gezeigt. Die nötigen Aufbauten dieser Lösung erfordern größere Eingriffe in die Parkinfrastruktur.



Ausführungsart B

3.3.3. Ausführungsart C

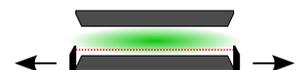
Um das Packaging im Fahrzeug zu erleichtern, ist es naheliegend die Spulen kleiner auszuführen. Dieser Ansatz wird in Ausführungsart C verfolgt. Durch die geringere Flächenverteilung des magnetischen Feldes kommt es dabei zu hohen Feldstärken im Spulenzwischenraum. Daher benötigen diese Systeme eine Überwachung dieses Bereiches. Zur Realisierung einer solchen Überwachung gibt es verschiedenste Überlegungen. Eine Möglichkeit bietet ein Lichtvorhang, der die Oberfläche der Primärseite überwacht (siehe Abbildung). Eine weitere Herausforderung ist bei dieser Ausführungsart die Übertragung über den großen Spulenabstand, da sich mit der Verkleinerung der Spulenfläche die Abstrahlcharakteristik der Spule ändert. Auch die Positioniergenauigkeit des Fahrzeugs über der Spule muss erhöht werden, da ein geringer Seitenversatz große Auswirkungen auf den Wirkungsgrad hat.



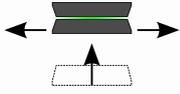
Ausführungsart C

3.3.4. Ausführungsart D

Zur Verbesserung der Ausführungsart C wird hier die Primärspule mit einer mechanischen Positionierung versehen. Die Vorteile liegen im größeren Spielraum der Montage der Sekundärspule wie auch im Ausgleich der geringen Positioniertoleranz durch eine kleinere Spule. Diese Ausführungsart erfordert die Positionierung als Zusatzkomponente.



Ausführungsart D



Ausführungsart E

3.3.5. Ausführungsart E

Bei einer weiteren Verkleinerung der Spule ist es nicht mehr möglich einen großen Luftspalt zu überbrücken. Dies macht eine exakte Positionierung der Spule in alle drei Raumrichtungen nötig. Durch das Heranführen der Primärspule wird der Luftspalt geschlossen, wodurch keine Zwischenraumüberwachung während der Übertragung nötig ist. Es wird nur eine Überprüfung des zu schließenden Raumes zu Beginn des Ladevorgangs nötig. Für die Montage der Sekundärseite ist bei dieser Ausführung ein größerer Freiraum gegeben. Die Integration in das Fahrzeug wird durch eine geringere Spulenfläche erleichtert.

3.4. Bereichs- und Koordinatendefinition

Für den Vergleich von unterschiedlichen KEU-Systemen werden ein Koordinatensystem und darauf aufbauende Systembereiche definiert. Besonders bei Feldmessungen ist die Angabe von Messkoordinaten unerlässlich.

3.4.1. Koordinatensystem

Das hier betrachtete Koordinatensystem gilt für Ausführungsarten bei denen die Spule unter dem Fahrzeug verbaut wird. Der Nullpunkt des Koordinatensystems wurde an der Unterseite der Sekundärspule gewählt, um eine immer gleiche Ausrichtung der Spule am Fahrzeug zu gewährleisten. Damit ist das Koordinatensystem dem Fahrzeug zugeordnet. Die positive x-Achse verläuft dabei gegen die Fahrtrichtung. Nach rechts in Fahrtrichtung ist die positive y-Achse orientiert. Z ist nach oben positiv angenommen. Parkplatzvarianten wie auch Parkungenauigkeiten kommen in variablen Bezugsgrößen zur Primärspule zum Ausdruck. In Abbildung 3.9 wird die Ausrichtung nochmal veranschaulicht.

Um eine Neigung der Spule angeben zu können, werden die Winkel α und β eingeführt. α ist der Winkel zwischen den Achsen x und -z, der Winkel β die Neigung zwischen y und -z. Bei den Betrachtungen des Winkels ist gesondert anzugeben, in welcher Lage sich Primärspule und Sekundärspule befinden.

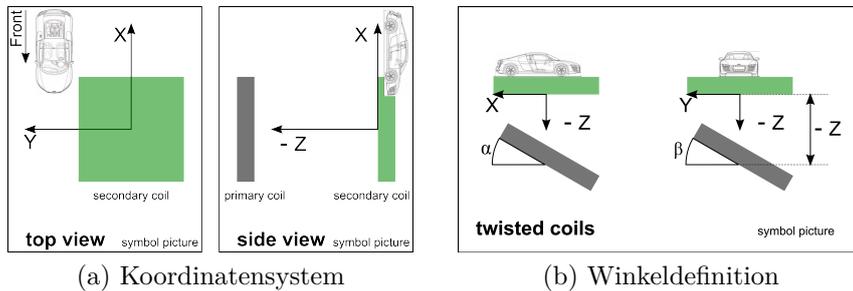


Abbildung 3.9.: Festlegung des Koordinatensystems

3.4.2. Bereichsdefinition

Da eine Feldebetrachtung der Umgebung eines KEU-Systems nicht gesamt durchgeführt werden kann, wird die Umgebung um das KEU-System in verschiedene Bereiche eingeteilt. Dies ist für das Erfassen von relevanten Messdaten wie auch für die Festlegung von Grenzwerten nötig. In der genauen Betrachtung kommt es zu einer Unterscheidung von fünf Bereichen. Diese Bereiche werden in [Abbildung 3.10](#) dargestellt.

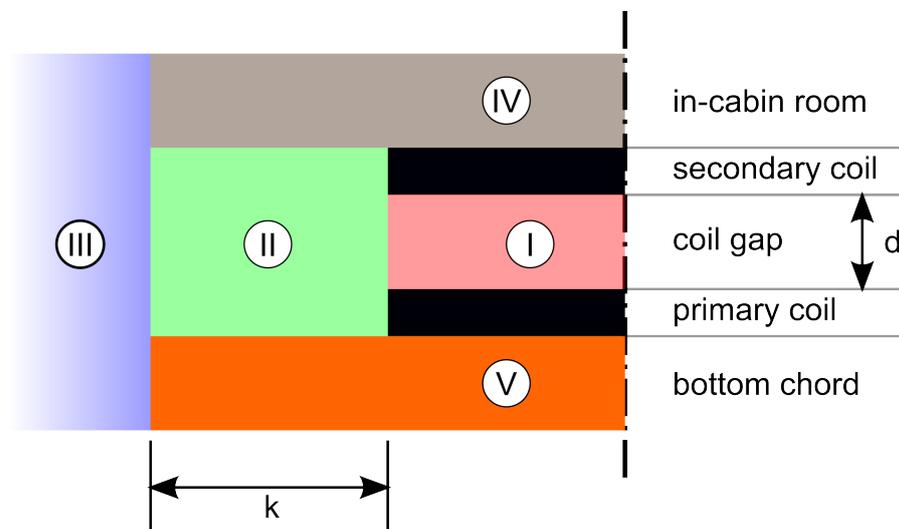


Abbildung 3.10.: Bereichsdefinition

Der Spulenzwischenraum bildet den ersten Bereich; hier kommt es zu großen Feldstärken. Der Bereich II wird von der oberen Sekundärseite und der unteren Primärseite vertikal begrenzt. Seitlich wird der Bereich II durch die Länge k bestimmt. Der k -Wert ist

3.4. Bereichs- und Koordinatendefinition

vom Fahrzeug abhängig und wird wie in Formel 3.24 berechnet. w_{car} beschreibt die Breite des Fahrzeugs und w_{coil} ist die maximale Größe der Spule in y Richtung.

$$k = \frac{w_{car}}{2} - \frac{w_{coil}}{2} \quad (3.24)$$

4. Kriterien zum Vergleich verschiedener Ausführungsarten

In diesem Kapitel werden Kriterien beschrieben, die es ermöglichen, verschiedene KEU-Systeme zu vergleichen. Die Bewertung und Gewichtung dieser Kriterien erfolgt unabhängig von den jeweiligen Ausführungsarten. Zur besseren Nachvollziehbarkeit erfolgt die Beurteilung der Kriterien anhand einer dreigliedrigen Erfüllungsstufung („-“, „0“ und „+“)[17]. Die Bewertungskriterien sind in folgende fünf Gruppen unterteilt: Spulenparameter, Kundennutzen, Serienreife, Kostenvorteil und Sicherheit/ Zuverlässigkeit. Diese in Abbildung 4.1 dargestellten Gruppen werden im weiteren genauer beschrieben.



Abbildung 4.1.: Gruppierung der Kriterien

4.1. Spulenparameter

Einen wesentlichen Bestandteil eines KEU-Systems bilden die Primär- und Sekundärspule. Da weitere Bestandteile - wie im Blockschaltbild in Abbildung 3.8 gezeigt - bei allen Systemen nötig sind, wird in dieser Gruppe auf die Größe und das Gewicht der Spulenkörper eingegangen. Nur durch ein gutes Konzept zur Integration in Fahrzeug und Infrastruktur ist diese Technologie technisch umsetzbar. Durch die große Varianz in der Größe des Spulenkörpers wird eine deutliche Unterscheidung der einzelnen Ausführungsarten sichtbar. Die in Tabelle 4.1 zusammengefassten Kriterien können wie folgt beschrieben werden.

Kriterien	Gewichtung		
	schlecht „-“	mittel „o“	gut „+“
Position Sekundärspule	Position vorgegeben im ungünstigen Bereich	Position vorgegeben, Bereich akzeptabel	mehrere Positionen in günstigen Bereichen
Gewicht Sekundärspule	größer 15 kg	um 10 kg	kleiner 5 kg
Größe Infrastruktur	Bauteile (z.B. Säule, Ladeplatte oder Wallbox) an fixer Position notwendig	Bauteile (z.B. Steuermodule oder Wallbox) notwendig, Position frei	Bauteile vollständig in vorhandene Infrastruktur integriert
Größe (in cm) Sekundärspule	ca. 80 x 80	ca. 50 x 50	ca. 20 x 20

Tabelle 4.1.: Zielerfüllungsskala für Spulenparameter

Position Sekundärspule

Zur Unterbringung der Sekundärspule in ein Fahrzeug ist die vorgesehene Position zu berücksichtigen diese wird in dieser Erfüllungsstufe bewertet. Um möglichst Modellreihenunabhängig zu sein werden Varianten bei denen mehrere Positionen im günstigen Bereich möglich sind als „gut“ bewertet. Bei Positionen in einem akzeptablen Bereich erreicht man eine Erfüllungsstufe von „mittel“. Wenn sich die Position in einem ungünstigen Bereich befindet erhält diese Variante die Bewertung „schlecht“.

Gewicht Sekundärspule

Das hier erwähnte Gewicht bezieht sich ausschließlich auf die Sekundärspule. Es werden drei Bereiche unterschieden: deutlich schwerer als 15 kg, so um 10 kg und kleiner als 5 kg. Eine genauere Unterscheidung kann erst in einem weiteren Integrationsschritt getroffen werden, da es zurzeit noch keine genauen Aussagen über ein exaktes Gewicht für die endgültigen Spulen gibt.

Größe Infrastruktur

Die bauliche Größe einer KEU-Anlage ist sehr stark von der Ausführungsart abhängig. Zur Dimensionierung eines nichtüberfahrbaren Bodenaufbaus wurde der Freiraum bei einem gewöhnlichen Parkvorgang ermittelt. Dafür wurde ein Parkplatz mehrmals angefahren und die Laufspur der Räder aufgezeichnet. Um eine Aussage über die verschiedenen Fahrzeugtypen zu bekommen, wurde der Versuch mit drei unterschiedlichen Fahrzeugmodellen durchgeführt. Diese waren ein Audi A3, ein Smart und ein Skoda Fabia. Der in der Abbildung 4.2 grün gekennzeichnete Bereich zeigt die mögliche Aufbaufläche für ein nichtüberfahrbares Hindernis an, wenn es sich um einen Parkplatz handelt, der von vorne angefahren wird.

Bei der Unterscheidung wird auf die nötigen sichtbaren Bauteile eingegangen wie auch auf ihre Position. Das Vorhandensein von Säule, Ladeplatte oder Wallbox an fixen Positionen ergibt die geringste Gewichtung. Dagegen wäre eine vollständige Integration in die vorhandene Infrastruktur wünschenswert.

Größe Sekundärspule

Zur Abschätzung der absoluten Größe der Sekundärspule wird dieses Kriterium eingeführt. Die Größenunterscheidungen liegen

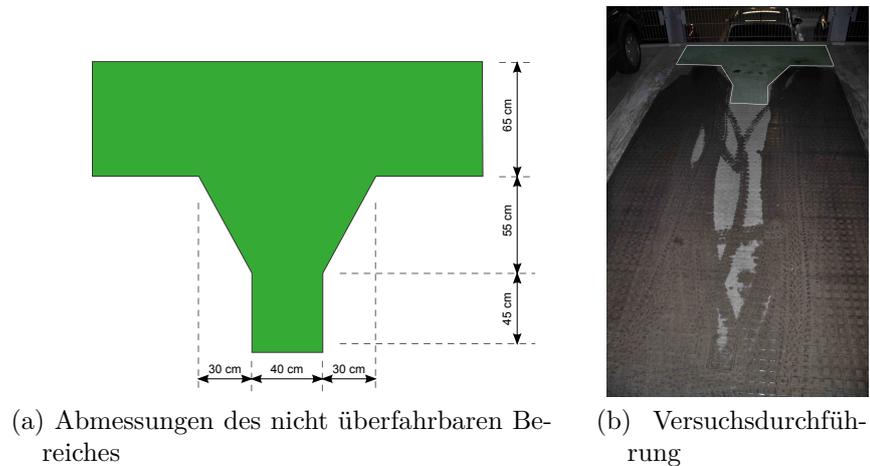


Abbildung 4.2.: Parkfreiraum

bei Spulenabmessungen von 80 x 80 cm, 50 x 50 cm und 20 x 20 cm.

4.2. Serienreife

Ein möglicher Serieneinsatz in Form einer Flotte bzw. Kleinserie wird in dieser Gruppe untersucht und bewertet. Da zu einer Überzeugung des Kunden auch ein voll funktionsfähiges Produkt präsentiert werden sollte, wird hier auf gewisse Rahmenbedingungen eingegangen. In Tabelle 4.2 findet sich die zusammenfassende Aufstellung der einzelnen Kriterien.

Mögliche Serienreife

Um die noch fehlenden Erfahrungen einer kontaktlosen Energieübertragung im Automobilbereich zu erlangen, ist eine möglichst rasche Umsetzung einer Technologie wünschenswert. Denn nur durch die Versuche mit Fahrzeugen, die mit dieser Technologie arbeiten, ist dies möglich. Die grundlegende Funktion dieser Systeme wurde in mehreren Labor-Aufbauten demonstriert. Aber auch die integrierte Funktion im Fahrzeug ist zu testen und wird weitere Arbeitspunkte aufzeigen. Um eine grobe Abschätzung der möglichen Serienreife machen zu können, wurden drei Stufen angenommen. Diese sind eine Serienreife nach dem Jahr 2017, da

4. Kriterien zum Vergleich verschiedener Ausführungsarten

Kriterien	Gewichtung		
	schlecht „-“	mittel „0“	gut „+“
Mögliche Serienreife	Serienreife nach 2017, Komponenten z.T. noch nicht entwickelt	Kleinserie im Bereich 2015-2017 möglich	(Klein)Serie vor 2017 möglich
Flexibilität Spulendesign	kein Freiheitsgrad, fixes Spulendesign vorgegeben	eingeschränk. Freiheitsgrad beim Spulendesign	hoher Freiheitsgrad im Spulendesign (Dicke)
Feinpositionierung	muss extern bereitgestellt und durchgeführt werden	Positionen können vom Übertragungssystem bereitgestellt werden	wird vom Übertragungssystem durchgeführt
Nachrüstbarkeit	keine Integrierbarkeit in bestehende Fahrzeuge	hoher Aufwand	geringer Aufwand
Normierung	aktuell nicht berücksichtigt	Erfüllung einzelner Teilvorgaben wahrscheinlich	erfüllt aktuellen Normierungsvorschlag GAK 353.0.1 ¹

Tabelle 4.2.: Zielerfüllungsskala für Serie

für diese KEU-Systeme noch einzelne Komponenten nicht entwickelt wurden. Bei schon weiterentwickelten Gesamtanlagen wird von einer Kleinserie im Zeitraum 2015 bis 2017 ausgegangen. KEU-Anlagen, die schon einen früheren Kleinserieneinsatz ermöglichen, werden mit „+“ gewichtet.

Flexibilität Spulendesign

In Hinsicht auf die Integration in das Fahrzeug spielt nicht nur eine möglichst schnelle Serienreife eine Rolle, sondern auch die Möglichkeit eines speziellen Spulendesigns je nach Modellreihe. Als Beispiel seien bei einer Unterbodenlösung die unterschiedli-

chen Bodengrenzschutzflächen zu nennen. Ein flexibles Spulendesign würde eine Anpassung an die verschiedenen Modellreihen ermöglichen. Hier wird davon ausgegangen, dass die unterschiedlichen Sekundärspulen kompatibel zu einer Primärseite sind. Die Gewichtung geht von „keinem“ Freiheitsgrad über „eingeschränkten“ bis hin zu einem „hohen“ Freiheitsgrad im Spulendesign.

Feinpositionierung

Zur Herstellung einer besseren Kopplung zwischen Primär- und Sekundärspule ist eine exakte Ausrichtung der Spulen nötig. Unter Feinpositionierung versteht man die Ausrichtung im Zentimeter- und Dezimeterbereich. Diese wird nach Anfahren der Parkposition durchgeführt. Die dafür nötigen Aktionen werden in diesem Kriterium bewertet. Eine Durchführung der Feinpositionierung durch das Übertragungssystem wird als wünschenswert angenommen. Lediglich eine Bereitstellung der Informationen zur Positionierung vom Übertragungssystem ergibt eine Abstufung. Das Erfordernis einer externen Bereitstellung und Durchführung der Feinpositionierung stellt eine weitere Abstufung dar.

Nachrüstbarkeit

Dieses Kriterium ist zu berücksichtigen, wenn eine Modellserie ein KEU-System in Form einer Mehrausstattung erhält. Da ein KEU-System auch als Komfort gesehen werden kann, sollte schon in der Entwicklung auf die Nachrüstbarkeit besonders geachtet werden. Dies verhindert einen zu großen Eingriff in bestehende Komponenten. Um die Unterscheidungen skalieren zu können, wird eine Lösung, die nur mit geringem Aufwand zu integrieren ist, bevorzugt. Darunter versteht man einen Austausch geringer Baugruppen. Ein größerer Eingriff in das Fahrzeug ist nicht nötig. Die dafür nötigen Anschlussknoten sind in die Serienausstattung integriert. Ein Einbau mit hohem Aufwand würde den Tausch von mehreren Komponenten wie auch die Änderung von Serienkomponenten bedeuten. Als „schlecht“ wird der Umstand einer nicht integrierbaren Lösung bewertet.

Normierung

Wie in den vorigen Kriterien schon beschrieben, ist das Ziel eine interoperable Lösung zu finden. Durch die Beobachtung und Mitarbeit in Normierungskreisen kann diese vorangetrieben werden.

Die Erfüllung von technischen Vorgaben aus den derzeitigen Zwischenergebnissen ist wünschenswert. Da es sich derzeit um keine endgültige Normierung handelt sollte die Einhaltung nicht zu hoch eingeschätzt werden. Eine Erfüllung der derzeit bekannten Vorgaben wird als positiv gewertet, denn es zeigt den Willen zu einer gemeinsamen Lösung. Eine Abstufung ergibt sich durch die Erfüllung einzelner Teilvergaben bzw. einer Nicht-Berücksichtigung der Normierungsvorschläge.

4.3. Kundennutzen

Der Erfolg einer neuen Technologie ist abhängig von der Zufriedenheit des Nutzer bzw. der Kunden. Der Wert wird oft nicht durch seine technischen Vorteile gesehen, sondern auf die privaten Vorteile bezogen. Gerade beim Umstieg von dem seit Jahrzehnten bewährten Automobilkonzept des Verbrennungsmotors auf die Elektromobilität ist die damit verbundene andere Energiezufuhr zum Fahrzeug ein großer Schritt. Auf die durch die geringere Reichweite nötigen Ladungsintervalle wird in diesem Bereich nicht eingegangen, sondern nur auf die neuen nötigen Tätigkeiten, um ein Fahrzeug mit Energie zu versorgen. Durch diese kommt es zu einigen Unterscheidungskriterien, die in der Gruppe Nutzen zusammengefasst werden.

Bedienungsaufwand

Um ein Fahrzeug mit Energie zu versorgen, sind einige Nutzereingriffe nötig. Mit diesem Kriterium werden alle körperlichen Einsätze berücksichtigt, die zum Start eines Ladevorgangs nötig sind. Diese Tätigkeiten sind je nach Ladestation und Ladeumgebung unterschiedlich. Da es sich dabei um den Kauf eines Produktes (Energie) handelt, muss zumindest der aktuelle Kaufpreis bestätigt werden. Ist nur diese Tätigkeit nötig, wird dies als ein Optimum angesehen. Dabei ist es im privaten Bereich denkbar, eine automatisierte Freigabe zu realisieren. Dadurch würde man eine Dauerfreigabe dieser Station einstellen. Bei einem Eingriff des Benutzers innerhalb des Fahrzeugs spricht man von einer mittleren Erfüllung dieses Kriteriums. Die geringste Gewichtung bekommt ein KEU-System, im Fall einer Bedienung außerhalb des Fahrzeugs in Form einer mechanischen Tätigkeit.

4.3. Kundennutzen

Kriterien	Gewichtung		
	schlecht „-“	mittel „0“	gut „+“
Bedienungsaufwand	bedienen außerhalb des Fahrzeugs (mechanische Tätigkeit nötig, ...)	eingreifen des Benutzers innerhalb des Fahrzeugs immer nötig	lediglich eine Ladefreigabe nötig und Dauerfreigabe möglich.
Zeitaufwand Benutzung	deutlicher Mehraufwand	minimaler Mehraufwand	kein Mehraufwand
Ladedauer bzw. Ladeleistung	deutlich kleiner 3 kW	um 3 kW	deutlich größer 3 kW
Interoperabilität bei verschiedenen Fahrzeugtypen	stark Fahrzeugspezifisch	hohe Interoperabilität, Ausnahmen vorhanden	komplette Hersteller- und Fahrzeugunabhängigkeit
Parkplatzvarianten	nur Querparken vorwärts	mehrere Varianten möglich	alle Varianten (vorwärts und rückwärts)
Barrierefreiheit	Unüberfahrbares Hindernis	Überfahrbares Hindernis	kein Hindernis

Tabelle 4.3.: Zielerfüllungsskala für Kundennutzen

Zeitaufwand Benutzung

Zur Abschätzung des Nutzereingriffes um einen Ladevorgang zu starten wird bei dem Kriterium „Zeitaufwand Benutzung“ nur der Zeitaufwand für das Parken betrachtet, ohne das Fahrzeug an eine Ladestation zu koppeln. Durch die bei einigen KEU-Systemen nötige genaue Positionierung ist diese Betrachtungsweise von Bedeutung. Dabei unterscheidet man gegenüber dem Mehraufwand zum gewöhnlichen Einparken. Die Skalierung erfolgt durch die Unterscheidung von „deutlicher“, „minimaler“ und „kein“ Mehraufwand. Diese Unterscheidung gibt auch Aufschluss über die Positioniertoleranz der jeweiligen Variante.

Ladedauer bzw. Ladeleistung

Nach Abschätzung des Anfahrens des Parkplatzes und des Ladestarts ist die nötige Ladedauer ein weiteres Kriterium. Um eine Aussage unabhängig von dem zu ladenden Fahrzeug zu bekommen wird die mögliche Ladeleistung beurteilt. Da es in diesem Kriterium nur um die Zeitdauer, aber nicht um die Auswirkungen geht, wird eine möglichst schnelle Ladung als wünschenswert angesehen. Dies wurde mit einer Leistung deutlich größer als 3 kW eingestuft. Eine nicht anstrebenswerte Ladeleistung wäre deutlich kleiner als 3 kW. Neutral wird eine Ladeleistung um 3 kW gesehen.

Interoperabilität bei verschiedenen Fahrzeugtypen

Aus derzeitiger Sicht ist noch kein KEU-System von einem OEM in Serie. Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben sind unterschiedliche OEM's in Förderprojekten tätig. Daher ist der OEM-übergreifende Einsatz in Deutschland stark an den DKE-Arbeitskreis geknüpft [29]. Ein weltweit verbreitetes System ist daher zur Zeit noch nicht absehbar. Die Bewertung würde ein OEM-unabhängiges System bevorzugen und würde bis hin zu einem reinen individuellen System gehen.

Parkplatzvarianten

Um einen Einsatz im öffentlichen Raum erreichen zu können, werden unterschiedliche Parkplatzvarianten analysiert. Berücksichtigt wird dabei auch das unterschiedliche Anfahren der Parkplätze. Eine Ausführung, die bei allen Parkvarianten eingesetzt werden kann und auch vorwärts und rückwärts angefahren werden kann, wird mit gut bewertet. Mittel eingestuft werden KEU-System, die mehrere Parkvarianten ermöglichen. Als gering wird eine Lösung gewichtet, die nur eine Parkvariante, aus einer Richtung angefahren, unterstützt.

Barrierefreiheit

Nicht nur die persönlichen Vorteile heben den Erfolg dieser Technologie sondern auch die Integration in das Stadtbild. Hierbei wird die Barrierefreiheit angesprochen. Ein vollständig in die Infrastruktur des öffentlichen Raumes integriertes KEU-System, das keine wesentliche Veränderung mit sich bringt, wird vermutlich eine höhere Akzeptanz beim Kunden erreichen. Daher ist kein Vorhandensein eines Hindernisses wünschenswert. Beim notwendigen An-

bringen eines überfahrbaren Hindernisses wird eine mittlere Gewichtung des KEU-Systemes vorgenommen. Ein nicht überfahrbares Hindernis würde zu einem großen Eingriff in das Stadtbild führen und daher auch eher zu einer Ablehnung.

4.4. Kostenvorteil

Nach der Betrachtung des Nutzens eines KEU-Systems wird in dieser Gruppe auf die Kostenvorteil eingegangen. Diese Gruppe umfasst sowohl Anschaffungskosten als auch Betriebskosten. Durch den frühen Entwicklungsstand ist bei vielen Komponenten eine Kostenabschätzung nur anhand der Anzahl der benötigten Bauteile möglich, da eine genauere Unterscheidung erst bei der Angebotsstellung von Lieferanten möglich ist. Dies betrifft vor allem die Kriterien „Kosten fahrzeugseitig“ und „Kosten Infrastruktur“. Die beiden weiteren Kriterien „Energieeffizienz/Wirkungsgrad“ und „Wartungs-/Reparaturkosten“ werden auf besondere Eigenschaften bezogen.

Kosten fahrzeugseitig

Unter diesem Kriterium werden alle zusätzlichen Bauteile gewertet, die zu einer möglichen Serienausstattung dazukommen, um das Elektrofahrzeug kontaktlos laden zu können. Der Preisdurchschnitt richtet sich nach dem Mittel der Angebote und wird je nach deutlich höherem Preis bzw. deutlich günstigerem Preis gewichtet.

Kosten Infrastruktur

Hierbei werden Kosten für die Installation und für die infrastrukturseitigen Bauteile gerechnet. Eine Unterscheidung wird so wie beim Kriterium „Kosten fahrzeugseitig“ vorgenommen. Wie zuvor richtet sich der Preisdurchschnitt nach dem Mittel der Angebote.

Energieeffizienz/ Wirkungsgrad

Abseits von den Installationskosten werden im Kriterium Energieeffizienz die entstehenden Kosten während des Betriebes erfasst.

4. Kriterien zum Vergleich verschiedener Ausführungsarten

Kriterien	Gewichtung		
	schlecht „-“	mittel „0“	gut „+“
Kosten fahrzeugseitig (im Vgl. zu anderen Systemen)	Preis deutlich höher	entspricht Preisdurchschnitt	Preis deutlich günstiger
Kosten Infrastruktur (im Vgl. zu anderen Systemen)	Preis deutlich höher	entspricht Preisdurchschnitt	Preis deutlich günstiger
Energieeffizienz/Wirkungsgrad	< 90 %	90 ... 95 %	> 95 %
Wartungs-/Reparaturkosten	häufiges Reinigen oder gelegentliche Wartungsarbeiten notwendig	nur gelegentliches Reinigen und kein relevanten Wartungsarbeiten notwendig	volle Funktion auch bei Verschmutzung möglich, Reinigung nur bei Bedarf notwendig

Tabelle 4.4.: Zielerfüllungsskala für Kostenvorteil

Dabei sollte auf Auswirkungen von Offset, Wirkungsgrad und weitere technische Fakten Rücksicht genommen werden. Zur Skalierung wird der Wirkungsgrad herangezogen. Nur durch eine genaue Definition des Wirkungsgrads ist ein fairer Vergleich möglich. Um auch den vom Kunden wahrgenommenen Wirkungsgrad anzugeben, sollte dieser von AC-Netzseite bis hin zum DC-Eingang der Batterie angegeben werden. Es ist bei der Angabe darauf zu achten, dass auch der Eigenverbrauch auf Primär- und Sekundärseite berücksichtigt wird. Die möglichen Auswirkungen eines Offsets sollten dokumentiert werden. Um eine erste Unterscheidung treffen zu können, wird als „gut“ ein Wirkungsgrad größer 95 Prozent angenommen. Im Mittelfeld liegt man bei 90 bis 95 Prozent. Kleiner 90 Prozent ist nicht wünschenswert.

Wartungs- /Reparaturkosten

Nach der Betrachtung der Energieaufnahme werden bei diesem Kriterium die Wartungs- und Reparaturkosten verglichen. Speziell bei den Wartungskosten sind Systeme, die keine zusätzlichen

bewegliche Teile haben und auch keine Sensoren verwenden, als gut zu bewerten. Der Austausch von einzelnen Komponenten sollte durch leichten Zugang und möglichst geringen Aufwand durchführbar sein. Die Unterscheidung wird durch die Häufigkeit von nötigen Reinigungen und Wartungsarbeiten erreicht.

4.5. Sicherheit und Zuverlässigkeit

Zuletzt wird in dieser Gruppe auf die Sicherheit und Zuverlässigkeit von KEU-Systemen eingegangen. Durch ein universal einsetzbares System würde eine möglichst rasche Ausweitung dieser Technologie erreicht. Die damit verbundenen Anforderungen betreffen die Robustheit des Systems und die Sicherheit im Spulenzwischenraum. Die Betrachtung und Bewertung von elektromagnetischen Feldern und deren Störaussendung wird in dieser Gruppe berücksichtigt. Die dafür geltenden Normen werden in Kapitel 5.2 beschrieben.

Kriterien	Gewichtung		
	schlecht „-“	mittel „o“	gut „+“
Nicht-technisches Ablehnungspotenzial	vorstellbar/wahrscheinlich	keine Aussage möglich	mit großer Wahrscheinlichkeit keine Einschränkung
Sicherheit im Übertragungsraum	derzeit keine Maßnahme vorhanden	nötige Maßnahme bekannt	keine Maßnahme notwendig
Störaussendungen	derzeit keine Maßnahme vorhanden	kritisch, aber Maßnahme möglich	keine Maßnahme notwendig
Robustheit (Umwelt)	nur Indoor Einsatz	leichter Objektschutz nötig	witterungsunabhängig
Robustheit (Vandalismus)	leicht zu beschädigen	gering vorhanden	keines vorhanden

Tabelle 4.5.: Zielerfüllungsskala für Sicherheit und Zuverlässigkeit

Nicht-technisches Ablehnungspotenzial

Dieses Kriterium wird zur Berücksichtigung der unterbewussten Wahrnehmung eingeführt. Die Verwendung der neuen Technologie soll zu einem positiven Empfinden beitragen und keine Ängste oder Ablehnungen hervorrufen. Ein bereits in der Entwicklungsphase erkennbares Ablehnungspotenzial wird als „schlecht“ gewertet. Da es sich bei diesem Kriterium um eine subjektive Einschätzung persönlicher Vorlieben handelt, werden KEU-Systeme, über die noch keine Aussage bezüglich der unterbewussten Wahrnehmung möglich ist, als „mittel“ eingestuft. Nur KEU-Systeme, die mit großer Wahrscheinlichkeit kein Ablehnungspotenzial hervorrufen, werden mit „gut“ bewertet.

Sicherheit im Übertragungsraum

Die in der Einleitung dieser Gruppe erwähnten elektromagnetischen Felder müssen besonders im Spulenzwischenraum betrachtet werden, da dort die größten Feldstärken auftreten. Die Erfassung dieser Felder wird im Kapitel 5.1 beschrieben. Die Bewertung wird mit diesem Kriterium vorgenommen. Um eine allgemeine Unterscheidung erreichen zu können wird speziell auf Gefahren vor Erwärmung von Fremdkörpern eingegangen und auch auf die notwendige Überwachung des Spulenzwischenraumes. Sind für die Überwachung des Zwischenraumes keine Maßnahmen erforderlich, wird dieses KEU-System mit „gut“ gewichtet, bei nötigen Maßnahmen für die Überwachung, die bekannt sind, mit „mittel“. Erst wenn noch keine Maßnahmen für die Überwachung vorhanden sind, bekommt ein System die Gewichtung „schlecht“.

Störaussendung

Abseits von der Überwachung und Sicherheit im Übertragungsraum werden mit dem Kriterium „Störaussendung“ die Auswirkungen auf die Umgebung erhoben. Da bei einem KEU-System die erzeugten Störungen über die Spulen direkt ausgesendet werden, ist ein besonderes Augenmerk auf die Qualität der Signale zu legen. Bewertet werden hierbei die nötigen Maßnahmen gegen die Störaussendung durch den DC/AC-Konverter und dessen Oberwellen. Ist davon auszugehen, dass ein KEU-System zusätzliche Maßnahmen zur Minimierung der Grenzwerte benötigt und diese noch nicht bekannt sind, wird die Gewichtung „schlecht“ vergeben. Bei der Annahme einer vorhandenen kritischen Störaus-

sendung, die aber durch bekannte Maßnahmen gehemmt werden kann, wird eine mittlere Gewichtung vergeben. Nur wenn keine Maßnahmen notwendig sind, wird ein KEU-System mit „gut“ zu gewichten sein.

Robustheit (Umwelt)

Die Einsatzmöglichkeiten bezogen auf die Umwelt sollten in diesem Kriterium erfasst werden. Dafür wird die Einschätzung einer möglichen Einsatzumgebung vorgenommen. Hier kommen die Robustheit der Übertragung und Ausführung der KEU-Anlage zu tragen. Ein reiner Indoor-Einsatz ist für den privaten Gebrauch möglich, gilt aber nicht als anstrebenswertes Ziel. Daher wird ein solches KEU-System mit „schlecht“ gewichtet. Bei einer Einsatzmöglichkeit unter einem leicht geschützten Objekt ist eine mittlere Gewichtung vorzunehmen. Ein witterungsunabhängiges KEU-System wäre wünschenswert. Dieses sollte auch im öffentlichen Raum einsetzbar sein.

Robustheit (Vandalismus)

Im Rahmen der Entwicklung von öffentlich zugänglichen KEU-Anlagen sollte das Vandalismuspotential abgeschätzt werden. Eine unüberwachte Ladestation stellt ein vorhandenes Vandalismuspotential dar. Bei Wegfallen von Anschlusskabeln oder sogar der Errichtung einer in den Boden integrierten kontaktlosen Ladestation würde geringeres Vandalismuspotential bedeuten. Abstufungen in der Bewertung werden durch die Annahme eines geringen bzw. eines größeren Vandalismuspotentials vorgenommen. Unter einem großen Vandalismuspotential versteht man das Vorhandensein einer offenen Mechanik oder von leicht zu beschädigenden Sensoren.

5. Messung und Grenzwerte elektromagnetischer Felder

Nach einer Unterscheidung der Vergleichskriterien wird in diesem Kapitel auf die Messung und Grenzwerte elektromagnetischer Felder eingegangen. Wirkung und Wechselwirkung von elektrischen und magnetischen Feldern, auch als E- bzw. H-Felder bezeichnet, sind von der Entfernung zur erzeugenden Quelle abhängig. Im generellen wird bei elektromagnetischen Feldern zwischen Nahfeld und Fernfeld unterschieden. Ab einer Entfernung von $3 \cdot \lambda$ beginnt das Fernfeld.

Bei der Verwendung von Frequenzen bis zu 200 kHz wird ein Fernfeld nach Gleichung 5.1 ab einer Entfernung von 1499 m erreicht. Da sich die Betrachtungen aber auf Auswirkungen in einem Bereich einiger Meter beziehen, befindet man sich dabei im Nahfeld. E- und H-Felder müssen aus diesem Grund getrennt gemessen werden, da erst eine allgemeine Abhängigkeit im Fernfeld der beiden besteht.

Elektromagnetische Felder wirken in verschiedenen Arten auf Fremdkörper. Bevor auf Auswirkung und Normen dieser Felder eingegangen wird, befasst sich das folgende Kapitel mit der Feldmessung.

Die Wellenlänge beschreibt den kleinsten Abstand zweier Punkte gleicher Phase und Steigung einer Welle. Dabei wird die Wellenlänge im freien Raum folgendermaßen berechnet

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (5.1)$$

c entspricht der Lichtgeschwindigkeit von 299.792.458 m/s[25].

5.1. Feldmessungen

Die Erfassung von elektromagnetischen Feldern ist für die Einhaltung von Grenzwerten wichtig. Ein induktives KEU-System arbeitet mit besonders hohen magnetischen Feldern. Der Fokus der Erfassung und Auswertung wird daher auf diese magnetischen Felder gelegt. Je nach untersuchtem Bereich kommt es zur Vorgabe von entsprechend unterschiedlichen Messverfahren. Im Bereich

I (siehe 3.4.2) treten die höchsten Felder auf. Wie in der VDE-Anwendungsregel VDE-AR-E 2122-4-2 [29] in Abschnitt 5.3.1. beschrieben ist die Erwärmung von Fremdkörpern in diesem Bereich zu berücksichtigen. Die in der Anwendungsregel beschriebene Prüfdurchführung unterscheidet sich leicht von der in dieser Arbeit. In der Anwendungsregel werden fixe Positionen vorgegeben, an denen die Temperatur der Fremdkörper gemessen werden muss. Bei den in Kapitel 6 beschriebenen Test Instructions wird eine Messung des gesamten Feldbereiches vorausgesetzt. Die Positionierung der Prüfkörper erfolgt danach an Punkten der höchsten Feldstärke.

5.1.1. Messgrößen

Zur Wahl der richtigen Messmethode werden in diesem Kapitel die zu messenden Größen abgeschätzt. Bei der Erfassung der Messgrößen ist darauf zu achten, dass die Messung ohne große Veränderungen der Feldverteilung vorgenommen wird. Um eine möglichst feine Auflösung der Messergebnisse über die Fläche zu bekommen, ist eine kleine Messfläche anstrebenswert, wobei aber für eine ersten Abschätzung auch eine größere Messfläche hilfreich sein kann.

Je nach Messbereich wird von unterschiedlichen Maxima ausgegangen. Die Höhe des magnetischen Feldes richtet sich nach der Spulenfläche und der übertragenen Leistung. Im Bereich I wird bei einer Spulenfläche von $0,25 \text{ m}^2$ und einer Leistung von $3,3 \text{ kW}$ ein maximales Feld von bis zu 10 mT erwartet. In übrigen Bereichen wird von geringeren Maximalwerten ausgegangen.

Durch die große Varianz der technischen Realisierung von KEU-Systemen ist erst ein leichter Trend zu einer Frequenz um die 150 kHz zu sehen. Da aber von manchem Anbietern niedrigere Frequenzen verwendet werden, sollte die messtechnische Erfassung dieser auch möglich sein.

Temperaturmessung

Die Erfassung der Temperatur kann in einer ungestörten Umgebung mit verschiedenen Verfahren durchgeführt werden. Einige dieser Verfahren werden in der Arbeit von Florian Schmidt vorgestellt. [14] Die Besonderheit der Erfassung von Temperaturen im Spulenzwischenraum ist das Vorhandensein großer Feldstärken. Für genauere Betrachtungen sei auf die Arbeit von Herrn Schmidt

Bereich	Messgröße	
	von	bis
Bereich I	1 μT	1 mT
Bereich II	0.1 μT	800 μT
Bereich III	0.1 μT	600 μT
Bereich IV	0.1 μT	800 μT
Bereich V	0.1 μT	800 μT

Tabelle 5.1.: Abschätzung der Feldmessgrößen

verwiesen. In diesem Unterkapitel wird auf jenen Messbereich I hingewiesen, der mit einer gewählten Temperaturmessung abgedeckt werden sollte. Die maximal auftretende Berührungstemperatur wird für Metallteile mit metallischer Oberfläche mit maximal 80 °C, bei Teilen mit nicht-metallischer Oberfläche mit 90 °C angegeben.[29] Eine Erfassung dieser Temperaturen sollte mittels dem gewählten Messverfahren möglich sein.

5.1.2. Messmöglichkeiten

Um Rückschlüsse auf das vorherrschende Magnetfeld zu bekommen kann dieses über unterschiedliche Messmethoden erfasst werden. Je nach Bereich und Aufbau haben unterschiedliche Messmethoden Vor- bzw. Nachteile. Die in Tabelle 5.2 zusammengefassten Methoden wurden im Zuge dieser Arbeit auf die Verwendbarkeit getestet.

Methoden	Bemerkung
Hall-Sonde	kleine Fläche, benötigt Versorgungsschaltung
Luftspule	Eigenbau möglich, nur eine Orientierungsachse
Messgeräte	teuer, große Messfläche
Temperaturmessung	indirekte Methode, frequenz-unabhängig

Tabelle 5.2.: Übersicht über Messmethoden

Hall-Sonde

Durch den Hall-Effekt kann mittels einer Hall-Sonde ein Ma-

netfeld gemessen werden. Dazu wird ein bekannter Strom an die Sonde angelegt. Durch das vorherrschende Magnetfeld wird der Strom durch die Lorenzkraft abgelenkt und kann über die abgegriffene Spannung analysiert werden. Mit einer solchen Messsonde können Feldkomponenten vom DC-Bereich bis in hochfrequente Bereiche gemessen werden. Für Testzwecke wurde eine Messsonde vom Institut für Elektrische Antriebstechnik und Maschinen der TU-Graz ausgeborgt. Aufgrund des geringen Abstandes von Messsonde zur Auswertelektronik war ein Einsatz bei einem KEU-System nicht möglich. Eine Auftrennung von Sensor und Auswertelektronik würde zu längeren Signalpfaden der nicht verstärkten Signale führen. Eine Feldanalyse wäre nur mittels einer sehr guten Auswertelektronik zu realisieren. Durch den Wunsch, möglichst schnell Messergebnisse zu bekommen, wurde diese Lösung nicht weiter verfolgt.

Luftspule

Durch die in Kapitel 3.1.3 beschriebene 2. Maxwellgleichung kann an einer Luftspule eine dem Magnetfeld proportionale Spannung abgegriffen werden. Diese kann zur Messung des Magnetfeldes genutzt werden. Die induzierte Spannung kann - wie in Formel 5.2 beschrieben - berechnet werden.

$$U_{(t)} = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (5.2)$$

Durch Einsetzen der Gleichung 3.4 wird der Zusammenhang mit der magnetischen Feldstärke gebildet. Der zeitliche Verlauf der Feldstärke kann durch 5.3 beschrieben werden.

$$B_{(t)} = B_0 \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (5.3)$$

Durch Einsetzen des zeitlichen Verlaufes der Feldstärke in die durch 3.4 erweiterte Gleichung 5.2 und ein anschließendes Ableiten wird der zeitliche Verlauf der Spannung in Abhängigkeit des Feldes beschrieben. In Formel 5.5 wird der Spitzenwert der Spannung je nach Frequenz berechnet.

$$U_{(t)} = n \cdot \omega_0 \cdot A \cdot B_0 \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (5.4)$$

$$\hat{U} = n \cdot \omega_0 \cdot A \cdot B_0 \quad (5.5)$$

Spulenbezeichnung	Windungszahl n	Durchmesser d	Fläche A in m ²
Spule 1	1	16,50 cm	2,13 * 10 ⁻²
Spule 2	2	11,20 cm	9,85 * 10 ⁻³
Spule 3	10	2,05 cm	3,30 * 10 ⁻⁴
Spule 4	30	2,03 cm	3,22 * 10 ⁻⁴
Spule 5	13	1,01 cm*	8,01 * 10 ⁻⁵
Spule 6	30	1,01 cm*	8,01 * 10 ⁻⁵
Spule 11	10	4,26 cm	1,42 * 10 ⁻³
Spule 12	10	4,26 cm	1,42 * 10 ⁻³
Spule 13	10	4,26 cm	1,42 * 10 ⁻³
Spule 14	10	4,26 cm	1,42 * 10 ⁻³

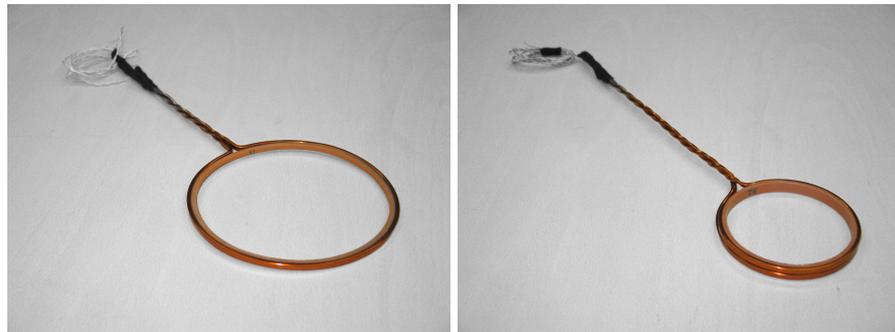
Tabelle 5.3.: Luftspulen zur Messung des Magnetfeldes

Zur Analyse des Magnetfeldes wird die induzierte Spannung mit einem Oszilloskop aufgezeichnet. Der mögliche auszuwertende Frequenzbereich ist von der Aufzeichnungslänge und Aufzeichnungsschrittweite abhängig. Mit den aufgenommenen Messwerten wird eine Frequenzanalyse durchgeführt. Aus den daraus gewonnenen Spitzenwerten je Frequenz kann bei bekannten Spulenkenndaten mit Formel 5.6 die Feldstärke bestimmt werden.

$$\hat{B} = \frac{U}{A \cdot n \cdot 2 \cdot \pi \cdot f} \quad (5.6)$$

Durch diese Erfassung ist eine Aussage über die Feldkomponenten, die normal auf die Spulenfläche stehen, möglich. Der erfasste Wert entspricht einer Mittelung über die Spulenfläche. Es wurden mehrere Spulen zur Messung angefertigt. Tabelle 5.3 gibt eine Übersicht über die Spulen. Zur schnellen großflächigen Analyse des Magnetfeldes wurden die in Abbildung 5.1 gezeigten Spule 1 und 2 verwendet. Diese ermöglichen eine grobe Abschätzung und bei einer gemeinsamen Verwendung die Analyse der zeitlichen Abhängigkeiten verschiedener Bereiche. Diese Betrachtung ist besonders bei speziellen Spulenformen interessant. Spule 1 ist durch die Ausführung mit nur einer Leiterschleife frequenzunabhängiger, da es zu keinen Kapazitäten zwischen den Windungen kommt. Bei den mit * gekennzeichneten Spulen 5 und 6 handelt es sich um rechteckige Spulen. Deren Durchmesser entspricht einer äquivalenten Kreisförmigen Spule. Zur schnelleren Messdatenerfassung wurden

5.1. Feldmessungen



(a) Spule 1

(b) Spule 2

Abbildung 5.1.: Luftspulen zur Feldmessung

die Spulen 11 bis 14 in einem Array gefertigt. Diese Anordnung ermöglichte die gleichzeitige Messung von vier Messpunkten mit Hilfe eines Vier-Kanal-Oszilloskops.



Abbildung 5.2.: Spule 11, 12, 13 und 14 in Arrayanordnung

Bei der Ausführung der Anschlussleitungen zu den Luftspulen ist auf eine gute Verdrillung zu achten, um mögliche Einkopplungen abseits der Spulenfläche zu verhindern.

Bereich	EHP-50	EHP-200
E-Feld	100 kV/m	1 kV/m
B-Feld Mode A	10 mT	376,8 μT
B-Feld Mode B		37,6 μT

Tabelle 5.4.: Grenzwerte für Narda Messsonden

Mit Hilfe der Luftspulen ist eine Messung der Feldstärke unmittelbar oberhalb der Primärspule möglich. Die Anwendung dieser Messmethode kommt vor allem im Messbereich I zum Einsatz, da dieser Messbereich nur vom Spannungsbereich des Oszilloskops abhängig ist. Es sei darauf hingewiesen, dass die Erfassung von sehr kleinen Feldern leicht von Störungen überlagert werden kann.

Messgeräte

Um die Einhaltung von Grenzwerten nachweisen zu können, sind kalibrierte Messgeräte nötig. Aus den zur Auswahl stehend Messgeräten wurden die von der Firma Narda hergestellten Messwürfel EHP-50 und EHP-200 gewählt. Diese Messgeräte werden mittels einer Lichtwellenleitung an einen PC angeschlossen. Dieser übernimmt die Analyse und Auswertung der Messdaten. Durch die Potentialtrennung mittels Lichtwellenleiter ist ein späterer Einsatz in einer EMV-Halle möglich. Das Erfassen von E- und H-Feldern ist mit beiden Geräten möglich. Es wird eine getrennte Auswertung jeder Raumachse durchgeführt. Die Messfrequenz reicht beim EHP-50 von 5 Hz bis 100 kHz, beim EHP-200 von 9 kHz bis 30 MHz. Durch die noch nicht festgelegte Frequenz war das Abdecken eines möglichst großen Bereiches ein Kriterium bei der Auswahl der beiden Geräte. Zur Positionierung der Messgeräte ist ein Kunststoffstativ vorhanden. Genauere technische Daten sind der Datenblätter der beiden Messgeräte zu entnehmen. Es sei an diesem Punkt auf die maximalen Grenzwerte der Messgeräte hingewiesen. In Tabelle 5.4 sind diese zusammengefasst.

Um einer möglichen Zerstörung der Messsonden vorzubeugen, ist eine Abschätzung der Feldgröße mit einer Luftspulenmessung anzuraten.

Temperaturmessung

Durch die Gefahr, die von der Erwärmung von Gegenständen

5.1. Feldmessungen

Prüfkörper	Beschreibung
Stahl Platte	(S235JR+AR) 100 mm x 70 mm x 10 mm
Edelstahl Platte	100 mm x 70 mm x 10 mm
Kronenkorken	
Getränke Dose	125 ml
5 Euro Cent	

Tabelle 5.5.: Prüfkörper zur Temperaturmessung

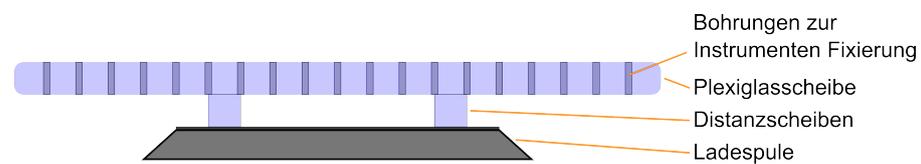


Abbildung 5.3.: Seitenansicht der Messplatte

im Spulenzwischenraum ausgeht, ist eine Temperaturmessung im Bereich I wichtig. Um ein reproduzierbares Messverfahren zu erreichen ist es nötig spezielle Prüfkörper zu definieren. Diese sollten einerseits genormte Gegenstände sein, die auch in der Praxis vorkommen. In Tabelle 5.5 werden die ausgewählten Prüfkörper aufgezählt.

Die Durchführung des Prüfvorgangs wird in den Test Instructions genau beschrieben. Die Wahl des Temperaturmessverfahrens wird in der Arbeit von Herrn Schmidt erläutert (siehe [14]).

5.1.3. Messaufbau

Zur Durchführung von Messungen im Spulenzwischenraum, wie auch in der nahen Umgebung, wird in diesem Abschnitt der Messaufbau beschrieben. Um an einer definierten Oberfläche Messungen durchführen zu können wird eine Plexiglasscheibe in den Spulenzwischenraum eingefügt. In Abbildung 5.4 ist diese sichtbar. Durch den vorhandenen Raster können Prüfkörper oder Messinstrumente positioniert werden. Speziell für das in Abbildung 5.2 gezeigte Spulenarray wurden Verankerungspunkte vorgesehen. Eine Messung der gesamten Oberfläche ist dadurch möglich. Der Messraster beträgt je nach Ausrichtung 2,5 cm oder 5 cm. Durch eine

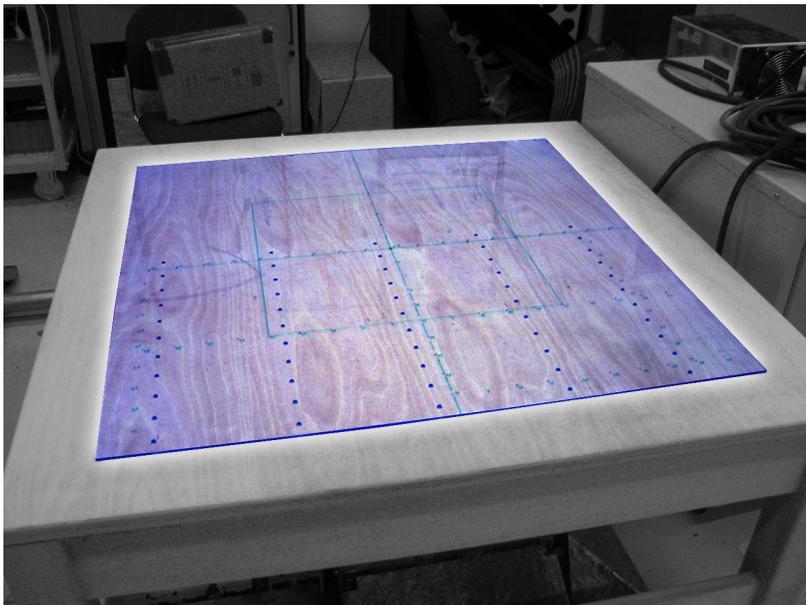


Abbildung 5.4.: Messplatte

einfache Ausrichtung erreicht man in einer Fläche von 115 cm x 95 cm bis zu 936 Messpunkte. Ein Abschalten des KEU-Systems ist bei jeder Messpositionsänderung nötig. Durch das Spulenarray ist eine Abschaltung nur nach jedem vierten Messpunkt erforderlich. Um Feldkomponenten in unterschiedlichen Z-Ebenen messen zu können, sind Distanzscheiben zwischen Primärspule und Plexiglasscheibe einzufügen.

5.1.4. Messpositionen am und um das Fahrzeug

Zur Abbildung der Feldausbreitung wurden Positionen definiert, die bei verschiedenen KEU-Systemen verglichen werden können. In Tabelle 5.6 werden diese zusammengefasst. Bei der Aufnahme der Messungen ist darauf zu achten, dass die Messsonde während der Messung nicht bewegt wird. In der Draufsicht und Seitenansicht der Abbildung 5.5 werden die Positionen veranschaulicht.

5.1. Feldmessungen

Position	Ausrichtung in cm			Beschreibung
	X	Y	Z	
A	0,0	29,5	-11,5	rechts neben der Primärspule
B	0,0	0,0	*	Mitte auf der Primärspule
C	-29,5	0,0	-11,5	vor der Primärspule
D	0,0	89,5	-11,5	
E				Fußraum Beifahrer links hinten
F	-20,5	20,5	*	auf der Primärspule
G	-20,5	-20,5	*	auf der Primärspule
H	20,5	-20,5	*	auf der Primärspule
I	0,0	20,5	**	auf der Sekundärspule
J	20,5	-20,5	*	auf der Primärspule
K	0,0	-89,5	-11,5	
L				Fußraum Fahrer links vorne
M				Fußraum Fahrer rechts vorne
N				Fußraum Beifahrer links vorne
O				Fußraum Beifahrer rechts hinten
P				Fußraum Beifahrer rechts hinten
Q				Fußraum Fahrer rechts hinten
R				Fußraum Fahrer links hinten
S				Mittelkonsole
T				vor Kombiinstrument
U	-90,0	-70,0	-11,5	
V	-90,0	70	-11,5	

Tabelle 5.6.: Messpositionen

5.2. Normen und Vorschriften

Derzeit sind nationale und internationale Arbeitsgruppen im Einsatz, um Standards und Normen für KEU-Anlagen festzulegen. Dieses Unterkapitel gibt einen Überblick über die derzeitigen Vorgaben.

5.2.1. ICNIRP

Die in Deutschland registrierte gemeinnützige internationale Strahlenschutz-Vereinigung ICNIRP macht sich zur Aufgabe, öffentlich Informationen zum Thema zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder bereitzustellen. Die Bezeichnung ICNIRP steht dabei für „International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection“. Die Organisation ist laut ihrer Internetseite unabhängig von ihren Mitgliedern und Unterstützern. Die erarbeiteten Ergebnisse werden kostenfrei auf der Internetseite www.icnirp.org bereitgestellt. Dadurch ist ein öffentlicher Zugang für alle Personen gegeben. Es wird darauf hingewiesen, dass die Mitglieder ihre freiwillige Arbeit in der Kommission unabhängig von ihrer Herkunft und beruflichen Tätigkeit

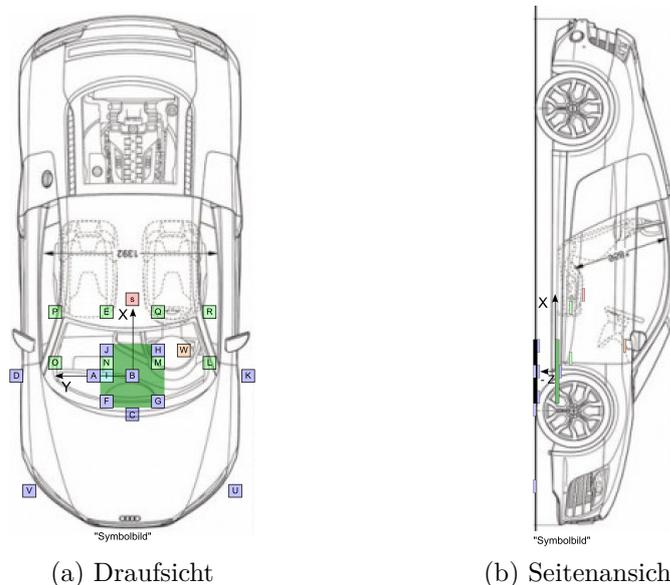


Abbildung 5.5.: Messpositionen für Feldmessungen am Fahrzeug

5.2. Normen und Vorschriften

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke $\frac{V}{m}$	Magnetische Feldstärke $\frac{A}{m}$	Magnetische Flussdichte μT
bis 1 Hz	-	$1,63 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
1-8 Hz	20.000	$1,63 \cdot 10^5 / f^2$	$2 \cdot 10^5 / f^2$
8-25 Hz	20.000	$2 \cdot 10^4 / f$	$2,5 \cdot 10^4 / f$
0,025-0,82 kHz	$500 \cdot 10^3 / f$	$20 \cdot 10^3 / f$	$25 \cdot 10^3 / f$
0,82-65 kHz	610	24,4	30,7
0,065-1 MHz	610	$1,6 \cdot 10^6 / f$	$2,0 \cdot 10^6 / f$
1-10 MHz	$610 \cdot 10^6 / f$	$1,6 \cdot 10^6 / f$	$2,0 \cdot 10^6 / f$
10-400 MHz	61	0,16	0,2
400-2000 MHz	$3 \cdot 10^{-3} \sqrt{f}$	$8 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$10 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$
2-300 GHz	137	0,36	0,45

Tabelle 5.7.: ICNIRP Referenzwerte für berufliche Exposition

absolvieren. In vielen nationalen Vorgaben wird auf die von der ICNIRP festgelegten Grenzwerte verwiesen. Eine enge Zusammenarbeit der ICNIRP besteht mit Gesundheitsorganisationen wie der Weltgesundheitsorganisation (WHO - World Health Organization) und einigen weiteren. Betrachtet wird hier das 1998 veröffentlichte Dokument mit dem Titel „Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields“. Dieses ist laut einer Bekanntmachung von 26. Mai 2009 weiterhin bis zu einer erneuten Auflage gültig. In diesem Dokument werden Expositionsgrenzen für den öffentlichen Bereich (Exposition der Bevölkerung) und Bereiche mit erhöhter Belastung (berufliche Exposition) festgelegt. Es wird von einer fünf-fach höheren zulässigen Leistungsdichte für berufliche Exposition im Gegensatz zur Exposition der Bevölkerung ausgegangen. Diese Festlegungen beruhen auf der Betrachtung der Auswirkungen auf den menschlichen Körper und wurden mit einer zusätzlichen Sicherheitstoleranz festgelegt. Bei den vorgegebenen Werten wird zwischen Basisgrenzwerte und Referenzwerte unterschieden. Die Basisgrenzwerte beziehen sich auf die tatsächliche Auswirkung auf den menschlichen Körper und setzen sich aus folgenden Parametern zusammen: Stromdichte (J), spezifische Energieabsorptionsrate (SAR) und Leistungsdichte (S). Da diese Größen in der Praxis nur schwer oder indirekt gemessen werden können, wurden Referenzwerte eingeführt. Durch das Einhalten von Referenzwerten folgt die Einhaltung von Basisgrenzwerten. Bei Überschreitung der Referenzwerte ist durch eine

Frequenzbereich	Elektrische Feldstärke $\frac{V}{m}$	Magnetische Feldstärke $\frac{A}{m}$	Magnetische Flussdichte μT
bis 1 Hz	-	$3,2 \cdot 10^4$	$4 \cdot 10^4$
1-8 Hz	10.000	$3,2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$
8-25 Hz	10.000	$4000 / f$	$5000 / f$
0,025-0,8 kHz	$250000 / f$	$4000 / f$	$5000 / f$
0,8-3 kHz	$250000 / f$	5	6,25
3-150 kHz	87	5	6,25
0,15-1 MHz	87	$730000 / f$	$920000 / f$
1-10 MHz	$87000 / \sqrt{f}$	$730000 / f$	$920000 / f$
10-400 MHz	28	0,073	0,092
400-2000 MHz	$1,375 \cdot 10^{-3} \sqrt{f}$	$3,7 \cdot 10^{-6} \sqrt{f}$	$4,6 \cdot 10^{-3} \sqrt{f}$
2-300 GHz	61	0,16	0,20

Tabelle 5.8.: ICNIRP Referenzwerte für Exposition der Bevölkerung

genauere Untersuchung ein Nachweis der Einhaltung der Basisgrenzwerte möglich[19]. Bei der Angabe von Referenzwerten wird auf die Größen der elektrischen Feldstärke (E), magnetischen Feldstärke (H), magnetischen Flussdichte (B) und weitere verwiesen. Bei Grenzwerten des magnetischen Feldes wird entweder die magnetische Feldstärke oder Flussdichte angegeben, da ein linearer Zusammenhang der beiden in Vakuum, Luft und nicht magnetischen Stoffen besteht. Durch Einsetzen der magnetischen Permeabilität $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ in die Formel 5.7 können die Größen in die jeweilige Einheit umgerechnet werden.

$$B = \mu \cdot H \tag{5.7}$$

In Tabelle 5.7 und 5.8 werden die Referenzwerte übersichtlich dargestellt. Eine graphische Darstellung der Grenzwerte zeigt Abbildung 5.6.

Im weiteren wird in den ICNIRP-Richtlinien die gleichzeitige Exposition durch Komponenten mehrerer Frequenzen beschrieben. Diese Betrachtung ist besonders bei KEU-Systemen wichtig, wo durch die DC/AC-Wandlung große Anteile von Oberwellen vorhanden sind. Dabei wird bei der Betrachtung zwischen der Berechnung von Grenzen oberhalb von 10 MHz und unterhalb un-

5.2. Normen und Vorschriften

- E_k = elektrische Feldstärke bei Frequenz k ;
- $E_{a,k}$ = der Referenzwert für das elektrische Feld;
- B_i = die magnetische Flussstärke bei Frequenz i ;
- $H_{L,i}$ = der Referenzwert für die magnetische Flussstärke;
- α = 610 V/m für die berufliche Exposition und
87 V/m für die Exposition der Bevölkerung;
- β = $30,7\mu T$ für die berufliche Exposition und
 $6,25\mu T$ für die Exposition der Bevölkerung[19].

terschieden. Da die derzeit bekannten KEU-Systeme in einem Bereich unterhalb von 10 MHz arbeiten, werden diese Berechnungen beschrieben. Falls große Anteile von Oberwellen oberhalb von 10 MHz vorkommen, müssen diese berücksichtigt werden. Um den Grenzwerten zu entsprechen, müssen die Gleichungen 5.8 erfüllt sein.

$$\sum_{k=1Hz}^{1MHz} \frac{E_k}{E_{a,k}} + \sum_{k>1MHz} \frac{E_k}{\alpha} \leq 1; \quad \sum_{i=1Hz}^{65kHz} \frac{B_i}{B_{L,i}} + \sum_{i>65kHz} \frac{B_i}{\beta} \leq 1 \quad (5.8)$$

5.2.2. BGV B11,2001

Aus Gründen der Betriebssicherheit wurde von der Berufsgenossenschaft „Energie Textil Elektro“ die Unfallverhütungsvorschrift B11,2001 veröffentlicht. Sie befasst sich mit der grundlegenden

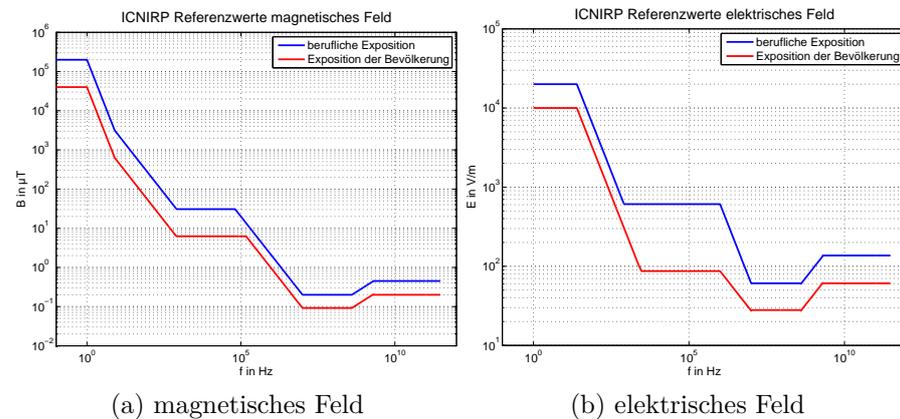


Abbildung 5.6.: ICNIRP Referenzwerte

Frequenzbereich f in MHz	Elektrische Feldstärke $\frac{V}{m}$	Magnetische Feldstärke $\frac{A}{m}$
0,091 - 0,576	1066	$4,9/f$
0,576 - 10	$614/f$	$4,9/f$
10 - 30	61,4	$4,9/f$
30 - 400	61,4	0,163
400 - 2000	$3,07 \cdot \sqrt{f}$	$8,14 \cdot \sqrt{f} \cdot 10^{-3}$
2000 - 300000	137,3	0,364

Tabelle 5.9.: BGV B11 Zulässige Effektivwerte im Expositionsbereich 1

Regelung der Messung und Bewertung von elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern. Durch die immer größere Verbreitung von Geräten, die solche Felder erzeugen, ist die Vorgabe und Einhaltung von Grenzwerten wichtig. Im Bezug auf die Entwicklung und den Betrieb einer KEU-Anlage ist besonders auf die Einhaltung der Vorschriften zu achten. Das Abschalten der Anlage bei Umbauten oder Positionsänderungen der Messsonden muss aus diesem Grund durchgeführt werden. Der Geltungsbereich der BGV B11,2001 deckt den Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz ab. Ein Festlegen von Expositionsbereichen, die Ermittlung der elektromagnetischen Felder und der Vergleich mit zulässigen Werten sind Aufgabe des Unternehmers und werden in dieser Vorschrift behandelt. Es sei darauf hingewiesen, dass eine Einhaltung der abgeleiteten Werte keinen hinreichenden Schutz für Träger von aktiven Implantaten darstellt. Die Vorschrift sieht die Festlegung von zwei Expositionsbereichen vor. Bereich 1 bedarf einer Zugangskontrolle. In der Tabelle 5.9 und 5.10 sind die zulässigen Werte aufgelistet.

Die Bewertung von Feldern mit Komponenten unterschiedlicher Frequenz wird in der BGV B11 nach einem ähnlichen Berechnungsverfahren wie in den ICNIRP-Richtlinien vorgenommen. Die Formeln 5.9 zeigen die laut Unfallverhütungsvorschrift zu verwendenden Berechnungen.

$$\sum_k \left(\frac{E_k}{E_{a,k}} \right)^2 \leq 1; \sum_k \left(\frac{B_k}{B_{a,k}} \right)^2 \leq 1 \quad (5.9)$$

5.2. Normen und Vorschriften

Frequenzbereich f in MHz	Elektrische Feldstärke $\frac{V}{m}$	Magnetische Feldstärke $\frac{A}{m}$
0,091 - 0,14	333,3	16,8
0,14 - 0,826	333,3	$2,35/f$
0,826 - 10	$275/f$	$2,35/f$
10 - 30	27,5	$2,35/f$
30 - 400	27,5	0,073
400 - 2000	$1,375 \cdot \sqrt{f}$	$3,64 \cdot \sqrt{f} \cdot 10^{-3}$
2000 - 300000	61,5	0,163

Tabelle 5.10.: BGV B11 Zulässige Effektivwerte im Expositionsbereich 2

Unter E_k und B_k versteht man die gemessenen und berechneten spektralen Effektivwerte gemessen über ein 6-Minuten-Intervall. Die Werte $E_{a,k}$ und $B_{a,k}$ beziehen sich auf die jeweiligen zulässigen Werte. k steht jeweils für die Frequenz[3].

5.2.3. Richtlinie 2004/40/EG

Das Amtsblatt der Europäischen Union L 159 vom 30. April 2004 umfasst die Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor Gefährdung durch physikalische Einwirkungen[9]. Wie die zuvor erwähnte Unfallverhütungsvorschrift bezieht sich die Europäische Union auf die ICNIRP-Richtlinien (ICNIRP 7/99). Die Ausführungen der Messungen und Grenzwerte sind ähnlich den vorangegangenen Kapiteln, daher wird hier nicht näher drauf eingegangen.

5.2.4. VW Konzernnormen

Als Grundlage für die Auslegung von Steuergeräten und anderen elektronischen Bauteilen gibt es Konzernnormen. Diese Normen sind von Zulieferfirmen einzuhalten und durch nachgewiesene Tests zu bestätigen. Nur durch eine Einhaltung dieser Konzernnormen ist ein Einbau in ein Fahrzeug möglich, ohne dass es zu Störungen von anderen Komponenten oder Beeinflussung durch andere Komponenten kommt.

Störaussendung TL965

Die in den technischen Lieferbedingungen beschriebenen Anforderungen geben Aufschluss über die Grenzwerte von zulässigen Störaussendungen von elektrischen Feldern. Da es bei KEU-Systemen auch zur Erzeugung von E-Feldern kommt, müssen diese Aussendungen beurteilt und geprüft werden [32].

Störfestigkeit TL82166

Um einen störungsfreien Betrieb gewährleisten zu können, müssen Kfz-Elektronikbauteile eine gewisse Störfestigkeit gegenüber E-Feldern aufweisen. In der technischen Lieferbedingung 82166 werden die Grenzwerte dafür festgelegt. Diese Bedingungen sind im Bezug auf KEU-Systeme besonders für die Wechselrichterschaltungen zu untersuchen[31].

Störfestigkeit gegenüber Magnetfelder TL82566

Der erste Entwurf von 10. Februar 2011 beschäftigt sich mit der Störfestigkeit gegenüber magnetischen Feldern. Dieser Entwurf deckt Magnetfelder von 15 Hz bis 30 kHz ab. Es ist der erste Ansatz von einheitlichen technischen Lieferbedingungen, dieser liegt aber bezüglich der kontaktlosen Energieübertragung in einem zu geringen Frequenzbereich. Es sollte auf die weiteren Aktivitäten im Bereich der Konzernnormen hinsichtlich magnetischer Felder geachtet werden [30].

6. Erfassen von technischen Kenndaten

Zur Erfassung der technischen Kennwerte von KEU-Systemen wurden die hier beschriebenen Prüfanweisungen ausgearbeitet. Die englische Fassung befindet sich im Anhang [E.1](#).

6.1. Prüfanweisung

Die Prüfanweisung sollte einen technischen Einblick in das untersuchte KEU-System geben. Durch die unterschiedlichen Ausführungen von solchen Systemen ist es wichtig, technische Details wie zum Beispiel Feldverteilungen verständlich zu machen. Verwendete Frequenzen, magnetische Flussdichten, Spannungen und andere Parameter sind wichtige Daten, um KEU-Systeme vergleichen zu können. Diese Kenndaten geben Aufschluss über einen möglichen Einsatz im öffentlichen wie privaten Raum. Vor der Integration von neuen Technologien in ein Fahrzeug sind relevante Sicherheitsrichtlinien zu befolgen. Bei der Prüfdurchführung sollte das System wenn möglich an einem Fahrzeug verbaut sein.

Die Einhaltung der international anerkannten ICNIRP- Grenzwerte in der unmittelbaren räumlichen Umgebung des KEU-Systems dient bereits bei den ersten Labortests der Sicherheit der Mitarbeiter.

6.1.1. Definitionen

In diesem Unterkapitel sei auf das in Abschnitt [3.4.1](#) beschriebene Koordinatensystem verwiesen. Eine Einhaltung der definierten Koordinaten ermöglicht eine klare Aussage der Prüfanweisung und

beugt Missverständnissen vor. Die in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen Bereiche finden auch hier Anwendung. Bei Tests am reinen Laboraufbau ist für die Konstante w_{car} 180 cm einzusetzen.

6.1.2. Allgemeine Kenndaten

In diesem Bereich kommt es zur Erfassung von systembestimmenden Kenndaten mit denen ein Vergleich ermöglicht wird.

P_{input}	Eingangsleistung Maximaler Energieaufnahme aller Bauteile auf der Primärseite.
P_{output}	Ausgangsleistung Verfügbare Ladeleistung nach dem Wechselrichter auf der Sekundärseite.
$P_{Sinternal}$	Eigenverbrauch Sekundärseite Falls eine externe Stromversorgung auf der Sekundärseite nötig ist, wird mit $P_{Sinternal}$ die Leistungsaufnahme dieser beschrieben.
$P_{SStandby}$ $P_{PStandby}$	Energieverbrauch bei Betriebsbereitschaft Energieverbrauch der Primär- bzw. Sekundärseite im Leerlauf. Bei mehreren Betriebszuständen sind diese gesondert anzugeben.
η	Wirkungsgrad Zur Beurteilung der Effektivität wird der Wirkungsgrad der Gesamtanlage erfasst. Er berechnet sich durch:

$$\eta = \frac{P_{input}}{P_{output} - P_{Sinternal}} \quad (6.1)$$

Spannungsversorgung Primärseite

Zur Bereitstellung der passenden Energieversorgung ist eine genaue Angabe der Anforderungen erforderlich. Der unter *Netzform_P* definierte Netzanschluss wird entweder AC-einphasig, AC-dreiphasig oder DC ausgeführt. Um auch eine ausreichende Energiemenge bereitstellen zu können, müssen Spannung und Maximalstrom vom KEU-Hersteller bekannt gegeben werden.

Netzform_P
U_{Psupply}
I_{Psupplymax}

Spannungsversorgung Sekundärseite

Wie auf der Primärseite müssen die Anforderungen auf der Sekundärseite festgelegt werden. Die dabei zur Verfügung stehenden Netzformen sind DC oder AC-einphasig. Bei einer benötigten Wechselspannungsversorgung ist die Frequenz noch gesondert anzugeben.

Netzform_S
U_{Ssupply}
I_{Ssupplymax}

Spulenzwischenraum

Die Größe des Spulenzwischenraumes auf welche das KEU-System dimensioniert ist.

d

Spulenversatz

Der maximale Offset bei dem das KEU-System noch arbeitet.

Offset *x, y*

Messbereich II

Die vom Fahrzeug abhängige Messbereichsgröße *k*.

k

Spulengrößen und Gewicht Primärseite

Die bauliche Größe der Primärspule wird durch die horizontalen Abmessungen *a* und *b* und die vertikale Abmessung *c* angegeben. Weiters werden hier das Gewicht der Primärspule angegeben und die Art des Verbindungssteckers.

w_{primary}
a_{primary}
b_{primary}
c_{primary}
Con_{primary}

Spulengrößen und Gewicht Sekundärseite

Die bauliche Größe der Sekundärspule wird durch die horizontalen Abmessungen *a* und *b* und die vertikale Abmessung *c* angegeben. Weiters werden hier das Gewicht der Sekundärspule angegeben und die Art des Verbindungssteckers.

w_{secondary}
a_{secondary}
b_{secondary}
c_{secondary}
Con_{secondary}

Betriebstemperaturen

$T_{primarycoil}$
 $T_{secondarycoil}$
 $T_{maxoperation}$
 $T_{minoperation}$
 $T_{\delta operation}$

Unter $T_{primarycoil}$ und $T_{secondarycoil}$ wird die maximale Oberflächentemperatur der Spulenkörper nach einer Übertragungsdauer von 3h unter Volllast angegeben. Für die zulässigen Aufstellorte ist die maximale und minimale Außentemperatur erforderlich. Mit dem Kennwert $T_{\delta operation}$ wird die maximale Temperaturdifferenz von Primärspule und Sekundärspule angegeben. Durch eine zu hohe Temperaturdifferenz der beiden Komponenten könnte eine Verstimmung des Resonanzkreises erfolgen.

Neigungswinkel

α
 β

Zur Definition des Neigungswinkels sei auf die in Abschnitt 3.4.1 festgelegte Ausrichtung verwiesen.

3D Feldsimulation

Nur durch Kenntnis der Ausbreitung des magnetischen Feldes ist eine Abschätzung der Auswirkungen möglich.

6.1.3. B- und E-Feldmessungen

Das Verhalten einer KEU-Anlage wird bei einer genaueren Betrachtung der Feldausbreitung möglich. Da es bei den derzeitigen KEU-Systemen zu unterschiedlichen Spulenanordnungen kommt, ist es nötig die Bereiche zu kennen, wo die größten magnetischen Felder auftreten. Aus Sicherheitsgründen müssen die Feldwerte in jedem Bereich erhoben werden.

Dabei ist die Aufzeichnung von folgenden Kennwerten nötig:

Position

x, y, z

Die Position mit der größten magnetischen Feldstärke. Dies definiert auch den Messpunkt der weiteren Messdaten.

Magnetisches Feld

B_{RMS}
 $B_{FFT(f)}$

Der magnetische Effektivwert sollte unter Angabe des gemessenen Frequenzbereiches dokumentiert werden. Weiters sollte ein Frequenzspektrum dargestellt werden, das die nötigen Frequenzanteile abbildet (bis zu 10 MHz).

Elektrisches Feld

Der elektrische Effektivwert des E-Feldes sollte unter Angabe des gemessenen Frequenzbereiches dokumentiert werden. Weiters sollte ein Frequenzspektrum dargestellt werden, welches die die nötigen Frequenzanteile abbildet (bis zu 10 MHz).

$$E_{RMS}$$

$$E_{FFT(f)}$$

6.1.4. Temperaturmessungen

Zur Verhinderung der Überschreitung zugelassener Temperaturen von Fremdkörpern im Spulenzwischenraum ist eine Temperaturmessung an definierten Prüfkörpern vorzunehmen. Die Prüfkörper werden in Tabelle 5.5 beschrieben. Die Temperaturmessungen müssen für die Bereiche I, IV und V durchgeführt werden. Die Messpositionen sollten den ermittelten Positionen aus den magnetischen Feldmessungen entsprechen. Der genaue Abstand zur Primärspule sollte in der Dokumentation festgehalten werden. Die Durchführung der Temperaturmessungen sollte bei einer Raumtemperatur von 25 °C (± 5 °C) durchgeführt werden.

Die Testabfolge von jedem Prüfkörper und jedem Bereich ist abhängig von der maximal erreichbaren Temperatur. Zu Beginn sollten die Prüfkörper Raumtemperatur (25 °C) aufweisen.

1. **Ermittlung der Maximaltemperatur.** Durch dauerhafte Exposition im Magnetfeld sollte die maximale Temperatur der Prüfkörper ermittelt werden. Dabei ist die Zeit t_h zur Erreichung dieser Maximaltemperatur zu messen. Ist der gemessene Maximalwert kleiner 60 °C ist eine Aufzeichnung von t_{60} und t_{80} nicht nötig. Bei einer Maximaltemperatur unter 80 °C fällt die Messung 3 weg.
2. **60 °C Grenzwert** Ist der Maximaltemperaturwert höher als 60 °C, sollte die Zeit t_{60} bis zum Erreichen der Temperaturgrenze von 60 °C gemessen werden.
3. **80 °C Grenzwert** Ist der Maximaltemperaturwert höher als 80 °C, sollte die Zeit t_{80} bis zum Erreichen der Temperaturgrenze von 80 °C gemessen werden.

6.1.5. Einhaltung der ICNIRP-Grenzwerte

Um den sicheren Umgang mit dem KEU-System zu gewährleisten muss bekannt gegeben werden, in welchem Umkreis die ICNIRP-Grenzwerte einzuhalten sind. Dabei ist auch das verwendete Messverfahren zu dokumentieren.

6.2. Auswertung der Prüfanweisung am vorhandenen KEU-System

Aus Gründen der Geheimhaltung sind die gemessenen Daten in einem verschlossenen Dokument der Audi Electronics Venture GmbH zusammengefasst.

7. Strukturierter Vergleich

Nach Festlegung der Kriterien in Kapitel 4 wird in diesem Teil der Arbeit auf die Lösungsfindung eingegangen. Diese kann für die Bewertung der im Abschnitt 3.3 beschriebenen Ausführungsarten angewandt werden, aber auch in weiterer Folge zur Auswahl von KEU-System-Lieferanten. Dabei wird versucht, eine Lösung zu finden, die der Pareto-Effizienz entspricht. Darunter versteht man das Finden einer Lösung, die nicht verbessert werden kann, ohne ein Kriterium zu verschlechtern[24].

Um dieses Ziel zu erreichen, wurde der in Abbildung 7.1 veranschaulichte Ablauf durchgeführt. Durch die getrennte Bewertung der Kriterien wird ein von den Ausführungsarten unabhängiger Vergleich möglich. Ein im Zuge dieser Arbeit erstelltes Tool erleichtert die Auswertung. Die Bewertung sollte von mehreren Personen aus unterschiedlichen Fachgebieten durchgeführt werden, um eine größere Streuung der Aussagekraft der Ergebnisse zu erreichen. Mit Hilfe des erstellten Tools ist eine sofortige Berechnung möglich. Eine schnelle und effiziente Bewertung wird somit erreicht.

7.1. Kriterien Bestimmung

Dieser Teil der Lösungsfindung wurde weitgehend im Kapitel 4 vorbereitet. Die in den Zielerfüllungsmatrizen beschriebenen Unterscheidungen müssen in diesem Teil noch gewichtet werden um



Abbildung 7.1.: Ablaufdiagramm des Strukturierten Vergleichs

7.1. Kriterien Bestimmung

Pkt	Bedeutung
1	schlecht
2	mittel
3	gut

Tabelle 7.1.: Abstufung der verwendeten Nutzwerte

Pkt	Bedeutung
0	absolut unbrauchbare Lösung
1	sehr mangelhafte Lösung
2	schwache Lösung
3	tragbare Lösung
4	ausreichende Lösung
5	befriedigende Lösung
6	gute Lösung mit geringen Mängeln
7	gute Lösung
8	sehr gute Lösung
9	über die Zielvorstellungen hinausgehende Lösung

Tabelle 7.2.: Abstufung für Bewertungsrang zur Nutzenanalyse[17]

in die Berechnung eingehen zu können. In dieser Arbeit wurde eine Unterscheidung der Nutzenwerte mit den Abstufungen „gut“, „mittel“ und „schlecht“ vorgenommen. In Tabelle 7.1 wird die Punktevergabe je nach Abstufung festgelegt.

Bei weiterführenden Arbeiten ist eine erweiterte Bewertung möglich. Beispiele für andere Einstufungslisten werden in Tabelle 7.2 und Tabelle 7.3 erwähnt.

Pkt	Bedeutung
0	unbefriedigend
1	gerade noch tragbar
2	ausreichend
3	gut
4	sehr gut

Tabelle 7.3.: Abstufung für Bewertungsrang nach der Richtlinie VDI 2225 [17]

Kriterien		11	12	13	14	Reihung
11	Package Fahrzeugseitig	x	1	1	1	4
12	Gewicht Fahrzeugseitig	0	x	1	0	2
13	Größe Infrastruktur	0	0	x	0	1
14	Größe Sekundärspule	0	1	1	x	3

Abbildung 7.2.: Beispiel für einen paarweisen Vergleich der Gruppe Spulenparameter

7.2. Gewichtungstabellen

Um die erarbeiteten Kriterien zu gewichten, wird in diesem Teil ein paarweiser Vergleich beschrieben. Dabei wird bei einer logisch richtigen Bewertung eine Reihung der Kriterien erreicht. Abbildung 7.2 zeigt einen Ausschnitt aus dem Bewertungstool. Dabei wird jedes Kriterium mit jedem anderen in derselben Gruppe verglichen. Es sind nur die hinterlegten Felder auszufüllen. Eine „1“ bedeutet, dass die Zeile wichtiger ist als die Spalte. Als Beispiel sei die fett umrandete Zelle beschrieben. Mit dem in dieser Zeile vorhandenen Wert „1“ kommt es zur Aussage, dass das Package fahrzeugseitig wichtiger ist als das Gewicht fahrzeugseitig. Eine genauere Beschreibung der Kriterien findet sich im Kapitel 4. Hier sei nochmal darauf hingewiesen, dass es sich bei den in Abbildung 7.2 gezeigten Bewertungen um Beispiele handelt.

Nach Vergleich der jeweiligen Kriterien wird die daraus resultierende Reihung in die weiteren Bewertungen übernommen. Dieser paarweise Vergleich wird für jede Gruppe separat durchgeführt. Eine Gewichtung der Gruppen selbst kann noch gesondert durchgeführt werden.

7.3. Bewertungsmatrix

Zur Lösungsfindung werden in diesem Bereich die Erfüllung der Kriterien je nach Varianten bewertet. Als Varianten können die im Abschnitt 3.3 beschriebenen Ausführungsarten herangezogen werden. Es können aber auch unterschiedliche Systemlieferanten als Varianten gesehen und mit demselben Bewertungstool verglichen werden.

7.3. Bewertungsmatrix

Varianten		Bewertungsmatrix Gruppe 1 Spulenparameter							
A		-	-	+	-				
B		o	+	-	+				
C									
D									
E									
Kriterien- Beschreibung		Package Fahrzeugseitig	Gewicht Fahrzeugseitig	Größe Infrastruktur	Größe Sekundärspule				

Abbildung 7.3.: Beispiel einer Bewertungsmatrix

Varianten		Bewertungsmatrix Gruppe 1 Spulenparameter							
A		1 * 4 = 3	1 * 2 = 2	+	-				
B		2 * 4 = 8	3 * 2 = 6	-	+				
C									
D									
E									
Kriterien- Beschreibung		Package Fahrzeugseitig	Gewicht Fahrzeugseitig	Größe Infrastruktur	Größe Sekundärspule				

Abbildung 7.4.: Berechnung der Bewertungsergebnisse

Durch Bearbeitung der Bewertungsmatrix wird erhoben, wie die einzelnen Varianten die Kriterien erfüllen. Dabei wird nach den in den jeweiligen Zielerfüllungsmatrizen festgelegten Unterscheidungen vorgegangen. Ein Ausschnitt aus dem Bewertungstool in Abbildung 7.3 zeigt den Vergleich von zwei Ausführungsvarianten nach den jeweiligen Gewichtungen der Bewertungsmatrix für die Gruppe 1. Zur Auswertung der Bewertungsmatrix müssen für die jeweiligen Bewertungen die in der Einstufungsliste (siehe Tabelle 7.1) definierten Punkte vergeben werden. Die Berechnung erfolgt aus dem Produkt von Punkten und der Gewichtung des Kriteriums. Abbildung 7.4 zeigt die Berechnung für die ersten Zellen der Gruppe 1. Nach Bewertung jeder Zelle können die einzelnen Varianten verglichen werden.

7.4. Lösungsvorschläge

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit der Analyse der Ergebnisse aus der Bewertungsmatrix. Eine nachvollziehbare Interpretation der Ergebnisse sollte mit Hilfe der Analyse der Bewertung ermöglicht werden. Durch folgende Verfahren ist ein zuvor erwähntes Pareto-Optimum zu erreichen[17]:

Utilitaristischer Nutzen

Durch die Summierung der einzelnen Ergebnisse einer Variante wird ein Nutzen-Maximum sichtbar. Die Variante mit der höchsten Summe ist in Hinblick auf den utilitaristischen Nutzen zu bevorzugen. Durch die reine Addition wird ein Nichterfüllen eines Kriteriums nicht gesondert berücksichtigt und kann von einem hohen Wert eines anderen Kriteriums aufgehoben werden[17].

Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Wert des utilitaristischen Nutzens durch die Anzahl der bewerteten Kriterien dividiert. Dies entspricht somit dem arithmetischen Mittelwert.

Nash Produkt

Der hier berechnete Nutzen nennt sich auch Nash Produkt. Dabei handelt es sich um das Produkt der Einzelergebnisse einer Variante. Durch die Multiplikation wird eine Fairness zwischen den Kriterien gewährleistet und die Variante mit der stabilsten Zielerfüllung erreicht den höchsten Nutzen[17]. Dieser Nutzen wird zum besseren Vergleich mit Hilfe der n -ten Wurzel skaliert. n steht dabei für die Anzahl der bewerteten Kriterien. So erreicht man in diesem Fall den geometrischen Mittelwert.

In Abbildung 7.5 werden die beiden Auswertungen grafisch dargestellt. Durch die Betrachtung von einzelnen Varianten in einem Spinnendiagramm können Schwachstellen erkannt werden. Eine mögliche Kombination zweier Varianten führt zu einem weiteren Lösungsvorschlag.

Auswertung Gewichtet

Varianten	Gruppe 1 Spulenparameter	
	Arithmetischer Mittelwert	Geometrischer Mittelwert
A 		
B 		
C 		
D 		
E 		

Abbildung 7.5.: Nutzensauswertung der Gruppe 1 für die ersten beiden Varianten

8. Zusammenfassung und Ausblick

8.1. Zusammenfassung

Künftig soll es möglich sein, Elektrofahrzeuge ohne großen Aufwand und störende Infrastruktur laden zu können, die Energiespeicher von Elektrofahrzeugen an Ampeln, Haltestellen oder Stadteinfahrten aufzufüllen oder Antriebsmotoren während der Fahrt zu versorgen. Ziel der Arbeit war es, anwendungsorientiertes Grundlagenwissen über die neue Technologie des kontaktlosen Ladens im Automobilbereich zu generieren. Die Herstellung der kontaktlosen Energieübertragung erfordert insbesondere ein theoretisches Verständnis über die magnetische Kopplung zweier Spulen sowie das Resonanz-Prinzip zur Erzielung eines hohen Wirkungsgrades. Der empirische Forschungszugang erfolgte über die Kooperation im Förderprojekt W-Charge und die erste Analyse eines KEU-Systems bei der AUDI AG.

Zunächst wurden die KEU-Systemkomponenten anhand eines Blockschaltbildes dargestellt, um den Testaufbau vorzubereiten und die Möglichkeit eines flexiblen Einsatzes verschiedener Ausführungsarten von KEU-Systemen zu erkunden. In einem weiteren Schritt wurde ein reproduzierbarer Messaufbau als Grundlage für den empirischen Vergleich verschiedener KEU-Systeme entwickelt. Aus dem theoretischen und praktischen Wissen über die kontaktlose Energieübertragung konnten Kriterien für erreichbare Ziele und Zielerfüllungsskalen zur Bewertung dieser neuen Technologie festgelegt werden. Die finale Systementscheidung wird durch ein Testverfahren unterstützt, welches aus den erhobenen Kenndaten und Kriterien durch einen strukturierten Vergleich einen Lösungsvorschlag generiert. Mit Hilfe des utilitaristischen Nutzens und des Nash-Produkts wird die Analyse des Vergleiches erleichtert. Die verfasste Prüfanweisung ermöglicht der AUDI AG das Abfragen

erster technischer Daten von Herstellern und das Erstellen interner Vergleiche. Mit dem Messaufbau kann auch der Nachweis der Einhaltung von Normen und Vorschriften erbracht und gegebenenfalls öffentlichkeitswirksam präsentiert werden. Durch die neuesten Kenntnisse aus dem Zwischenbericht des Normungskreises des DKE wurde ein Großteil der erarbeiteten Kenndaten eines solchen Systems bestätigt [29].

Die vorliegende Arbeit zeigt, dass folgende Rahmenbedingungen zu beachten und in weiterer Folge zu bearbeiten sind:

Einparken

Erst nach Ausstattung eines Fahrzeugs mit einem KEU-System ist eine genaue Analyse von Einparkvorgängen möglich. Durch die vom KEU-System vorgegebene Positionsgenauigkeit können unterschiedliche Parkkonzepte berücksichtigt werden. Möglich ist dabei sowohl die Nutzung von bestehenden Sensoren als auch die neue Integration von Sensoren. Die Unterstützung des Parkvorganges seitens des Fahrzeugs wird dabei als zusätzlicher Komfort gesehen und wird ein Differenzierungsmerkmal zu anderen Herstellern ergeben. Eine möglichst gute Unterstützung des Fahrers zur exakten Positionierung erleichtert den täglichen Parkvorgang und erhöht auch die Effizienz des KEU-Systems und somit des gesamten Elektrofahrzeugs.

Spulenzwischenraum

Je nach Ausführungsart kommt der Überwachung des Spulenzwischenraumes besondere Aufmerksamkeit zu. Bei kleineren Spulengrößen entstehen durch die geringere Fläche höhere Felder im Spulenzwischenraum. Um mögliche Fremdkörper erkennen zu können, sind entsprechende Konzepte zu entwickeln. Die ersten Untersuchungen in diese Richtung werden in der Arbeit über „Überwachung des Spulenzwischenraums bei der kontaktlosen Energieübertragung“ betrachtet [14].

8.1.1. Mögliche Weiterführende Arbeiten

weitere Prüfparameter

Durch die in den Testinstruktionen abgefragten Kenndaten wurden schon die meisten Parameter erhoben. Durch weitere Feldver-

suche könnte darüber hinaus die Auswirkung von Temperaturunterschieden zwischen Primärspule und Sekundärspule erhoben werden. Als Anwendungsfall kommen vor allem das Parken im Winter in Garagen zu tragen. Nach einer Fahrt bei mehreren Minusgraden ist die Sekundärspule des Fahrzeugs stark abgekühlt. Nach dem Abstellen in einer geheizten Garage können dabei größere Temperaturdifferenzen zwischen den beiden Spulen auftreten. Dabei sollten die Auswirkungen auf die Güte des Resonanzkreises durch Drift der Kondensatoren betrachtet werden.

Luftspulen

Um eine schnellere Auswertung der Feldverteilung zu bekommen ist es denkbar, die beschriebene Messoberfläche mit einem matrixförmig angeordneten Spulenaufbau zu versehen. Mit einer integrierten Messdatenauswertung würde dies zu einem raschen Überblick führen. Dabei würden die Bereiche mit hohen Feldanteilen ohne mehrstündigen Messaufwand ersichtlich werden. Eine Integration von Luftspulen zur Messung der x- und y-Feldkomponenten könnte in Erwägung gezogen werden. Ein mögliches Anbringen von zusätzlichen Messspulen mit einer solchen Ausrichtung wäre sicher zielführend. Eine Analyse-Software würde die Erweiterung der Messoberfläche vervollständigen. Mit dieser könnte man die erhobenen Messdaten visualisieren und dem Benutzer ein leicht verständliches Ergebnis liefern.

A. Glossar

AC

Wechselstrom

DC

Gleichstrom

EMV

Elektromagnetische Verträglichkeit

KEU-Anlage

Der gesamte Aufbau eines KEU-Systems inklusive der nötigen Ansteuerungen und Bedienelemente ergeben gemeinsam eine *kontaktlose **E**nergie **Ü**bertragungs Anlage*.

KEU-System

Unter einem **kontaktlosen **E**nergie **Ü**bertragungs-System** versteht man eine Energieübertragung ohne eine elektrisch leitende Verbindung.

Kfz

Kraftfahrzeug

kW

Kilowatt, Leistung

OBC

Ladevorrichtung, die im Elektrofahrzeug eingebaut ist.

OEM

Original Equipment Manufacturer bzw. Erstausrüster

Pkw

Personenkraftwagen

Range-Extender-Fahrzeug

Engl. 'Reichweitenverlängerer' werden Fahrzeuge genannt die eine zusätzliche Energiequelle zur Ladung der Batterie haben (meist Verbrennungsmotor).

Resonanz

Zwei Systeme mit der gleichen Eigenresonanz, die bei der gleichen Erregerfrequenz angeregt werden können.

B. Literaturverzeichnis

- [1] Audi AG. Produktionsstandort Ingolstadt, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.audi.de.
- [2] Autobild.de. Schriebers Stromkasten 86: induktives Laden, zuletzt besucht am 9.5.2011. URL <http://www.autobild.de/artikel/schriebers-stromkasten-teil-86-1206801.html>.
- [3] Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro. Unfallverhütungsvorschrift Elektromagnetischer Felder, 1.Juni 2001.
- [4] Bombardier. Firmen Home page, zuletzt besucht am 9.5.2011. URL <http://www.bombardier.com/>.
- [5] Bundesministerium für Finanzen für Österreich, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.bmf.gv.at.
- [6] Margaret Cheney and Gisela Bongart. *Nikola Tesla: Erfinder, Magier, Prophet; über ein außergewöhnliches Genie und seine revolutionären Entdeckungen*. Omega, Aachen, 6 edition, 2009. ISBN 3930243016. URL <http://www.worldcat.org/oclc/699586429>.
- [7] Conductix wampfler. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL <http://www.conductix.de>.
- [8] e-connected Klima-und Energiefonds, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.e-connected.at.
- [9] Europäische Union. Richtlinie 2004/40/EG des Europäischen Parlaments und des Rates, 30. April 2004.
- [10] Evatran. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.pluglesspower.com.
- [11] evworld. EV1 Produktvorstellung, zuletzt besucht am 20.04.2011. URL <http://www.elweb.info/data/ev1/datenblatt.htm>.

B. Literaturverzeichnis

- [12] F. Uppenborn. *History of the Transformer*. London, 1889. URL <http://www.archive.org/stream/historyoftransfo00upperich#page/n3/mode/2up>.
- [13] Klaus Finkenzyler. *RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten*. Hanser, München, Wien, 3. aktualisierte und erw. edition, 2002. ISBN 3-446-22071-2.
- [14] Florian Schmidt. Überwachung des Spulenzwischenraums bei der kontaktlosen Energieübertragung: Bachelorarbeit, 15. Januar 2011.
- [15] Förderprojekt W-Charge, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.w-charge.de/.
- [16] halo IPT. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.haloipt.com.
- [17] Helmut Christian Schreiber. Entwicklung einer Absicherungsmethodik für elektrotraktionsspezifische Komponenten hinsichtlich der Produkt- und Prozesstechnik: Diplomarbeit, 11.03.2011.
- [18] IFG Ingolstadt GmbH. Ingolstadt an der Donau attraktiv & innovativ, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.ingolstadt.de/ifg.
- [19] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), 2. Oktober 1997. URL www.icnirp.de.
- [20] Horst Kuchling. *Taschenbuch der Physik*. Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verl, München, 20., aktualisierte aufl. edition, 2010. ISBN 3446424571.
- [21] Daniel Kürschner. *Methodischer Entwurf toleranzbehafteter induktiver Energieübertragungssysteme*. Shaker, Aachen, 2009. ISBN 9783832288976. URL <http://www.worldcat.org/oclc/643533123>.
- [22] Marlene Marinescu. Elektrische und magnetische Felder: Eine praxisorientierte Einführung. *Elektrische und magnetische Felder*, 2009. URL <http://www.worldcat.org/oclc/699178691>.

- [23] Markt Gaimersheim. Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL <http://www.gaimersheim.de/>.
- [24] Stephan Matzka. *Efficient resource allocation for automotive active vision systems*, volume 24 of *Audi Dissertationsreihe*. Cuvillier, Göttingen, Edinburgh, 1 edition. ISBN 3869552506.
- [25] Reinhold Paul. *Felder und einfache Stromkreise: Mit 32 Tafeln*. Springer-Lehrbuch. Springer, Berlin [u.a.], 3., überarb. und erw edition, 1993. ISBN 9783540557531.
- [26] Peter Wambsganß and Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour. Stromversorgung aus dem HF-Feld, 2010. URL http://www.elektroniknet.de/power/technik-know-how/acdc-dcdc-wandler/article/1644/0/Stromversorgung_aus_dem_HF-Feld/.
- [27] SEW-Eurodrive. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.sew-eurodrive.de.
- [28] Vahle. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.vahle.de.
- [29] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen-Induktive Ladung von Elektrofahrzeugen - Teil 4-2: Niedriger Leistungsbereich VDE-AR-E 2122-4-2, März 2011.
- [30] VOLKSWAGEN AG Konzernnorm Entwurf TL82566. EMV von Kfz-Elektronikbauteilen Störfestigkeit gegenüber Magnetfeldern, 10. Februar 2011.
- [31] VOLKSWAGEN AG Konzernnorm TL82166. EMV von Kfz-Elektronikbauteilen Eingestrahlte Störungen, Jänner 2011.
- [32] VOLKSWAGEN AG Konzernnorm TL965. Störaussendung, Mai 2009.
- [33] Wampfler. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL www.wampfler.com.
- [34] Wireless Power Consortium. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011. URL <http://www.wirelesspowerconsortium.com/>.

B. Literaturverzeichnis

- [35] WiTricity. Firmen Home page, zuletzt besucht am 30.4.2011.
URL www.witricity.com/.

C. Abbildungsverzeichnis

1.1.	Hauptfirmensitz der AUDI AG in Ingolstadt	3
1.2.	Logo der Audi Electronics Venture GmbH	4
2.1.	Auszug aus dem e-connected Bericht[8]	9
2.2.	Busladestation in Turin (Italien)[7]	10
2.3.	Nummernschildintegration von Vahle und Kostal[2]	11
2.4.	Symbolbild einer Ladestation von Evatran [10]	12
2.5.	Symbolbild einer Ladestation von SEW-Eurodrive	14
2.6.	Symbolbild einer Ladestation von Halo IPT [35]	14
2.7.	Dynamische Ladesystem für Elektrobusse von Bombardier in Flanders' DRIVE Projekt[4]	16
2.8.	Symbolbild einer Ladestation von Bombardier[4]	16
3.1.	Betrachtung von Leiterschleifen mit unterschiedlichem Radius. Bei einem Leiterstrom von $I = 1A$ und der Windungszahl $n = 1$	18
3.2.	Verlauf der Feldstärke H einer Sendeantenne bei konstantem Abstand x und variablem Radius R. Bei einem Leiterstrom von einem A und einer Windung [13]	19
3.3.	Darstellung der Kopplung von Spulen	20
3.4.	Allgemeines Ersatzschaltbild[21]	22
3.5.	T-Ersatzschaltbild[21]	23
3.6.	Schaltbilder von Schwingkreisen	24
3.7.	Blockschaltbild der Hauptkomponenten eines KEU-Systems	25
3.8.	Blockschaltbild einer KEU-Anlage	27
3.9.	Festlegung des Koordinatensystems	31
3.10.	Bereichsdefinition	31
4.1.	Gruppierung der Kriterien	33
4.2.	Parkfreiraum	36
5.1.	Luftspulen zur Feldmessung	52
5.2.	Spule 11, 12, 13 und 14 in Arrayanordnung	52

5.3. Seitenansicht der Messplatte	54
5.4. Messplatte	55
5.5. Messpositionen für Feldmessungen am Fahrzeug . .	57
5.6. ICNIRP Referenzwerte	60
7.1. Ablaufdiagramm des Strukturierten Vergleichs . . .	71
7.2. Beispiel für einen paarweisen Vergleich der Gruppe Spulenparameter	73
7.3. Beispiel einer Bewertungsmatrix	74
7.4. Berechnung der Bewertungsergebnisse	74
7.5. Nutzensauswertung der Gruppe 1 für die ersten bei- den Varianten	76
E.1. Test Instructions Seite 1	xxvii
E.2. Test Instructions Seite 2	xxviii
E.3. Test Instructions Seite 3	xxix
E.4. Test Instructions Seite 4	xxx
E.5. Test Instructions Seite 5	xxxi
E.6. Test Instructions Seite 6	xxxii
E.7. Test Instructions Seite 7	xxxiii

D. Tabellenverzeichnis

4.1. Zielerfüllungsskala für Spulenparameter	34
4.2. Zielerfüllungsskala für Serie	37
4.3. Zielerfüllungsskala für Kundennutzen	40
4.4. Zielerfüllungsskala für Kostenvorteil	43
4.5. Zielerfüllungsskala für Sicherheit und Zuverlässigkeit	44
5.1. Abschätzung der Feldmessgrößen	49
5.2. Übersicht über Messmethoden	49
5.3. Luftspulen zur Messung des Magnetfeldes	51
5.4. Grenzwerte für Narda Messsonden	53
5.5. Prüfkörper zur Temperaturmessung	54
5.6. Messpositionen	56
5.7. ICNIRP Referenzwerte für berufliche Exposition . .	58
5.8. ICNIRP Referenzwerte für Exposition der Bevölke- rung	59
5.9. BGV B11 Zulässige Effektivwerte im Expositions- bereich 1	61
5.10. BGV B11 Zulässige Effektivwerte im Expositions- bereich 2	62
7.1. Abstufung der verwendeten Nutzwerte	72
7.2. Abstufung für Bewertungsrang zur Nutzenanalyse[17]	72
7.3. Abstufung für Bewertungsrang nach der Richtlinie VDI 2225 [17]	72

E. Anhang

E.1. Test Instructions

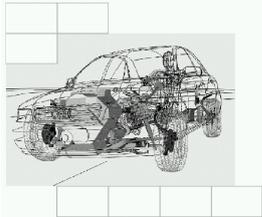
Test Instructions	Audi Electronics Venture GmbH	
		
Wireless Charging System		
Test Instruction		
Author	Reinhard Peer	
Dept./OU	I/AEV-3	
Phone no.	+49-841-89-39491	
E-mail	reinhard.peer@audi.de	
First issue	01.12.2010	
Date of revision	12.04.2011	
Version	2.0	
Distribution list		
	I/AEV-3, Dr. Elias, Björn	
<small>Confidential. All rights reserved. No part of this document may be provided to third parties or reproduced without the prior written consent of the relevant AUDI AG department. This document is available to contracting parties solely via the responsible Procurement Department. The English translation is believed to be accurate. In case of discrepancies, the German version is alone authoritative and controlling. Numerical notation according to ISO convention (see VW 01000).</small>		
<small>© AUDI AG</small>		

Abbildung E.1.: Test Instructions Seite 1

E.1. Test Instructions

Test Instructions		Wireless Charging System		Audi	
Version 2.0				Electronics Venture GmbH 	
Dept: I/AEV-3		Date of revision: 12.04.2011		Page 2 of 7	

Revision

Version	Description of Change(s)	Author/Editor (Name, OU)
01.12.2010 V1.001	General Values: The center of the coordinate system is selected as (x,y,z) (0,0,0) in the center of the secondary coil on the car.	Reinhard Peer I/AEV-3
15.01.2011 V1.002	General Values: third point Offset and distance: "distance (d)" Name all parts of the system which are used and report the weight, dimension and connectors. B-/E- field measuring procedure: FFTs[x scale logarithmical] At general Values:	Reinhard Peer I/AEV-3
12.04.2011 V2.00	general revision	Reinhard Peer I/AEV-3

Confidential. All rights reserved. No part of this document may be provided to third parties or reproduced without the prior written consent of the relevant AUDI AG department. This document is available to contracting parties solely via the responsible Procurement Department. The English translation is believed to be accurate. In case of discrepancies, the German version is alone authoritative and controlling. Numerical notation according to ISO convention (see VW 01000).

© AUDI AG

Abbildung E.2.: Test Instructions Seite 2

Test Instructions Version 2.0 Dept: I/AEV-3 Date of revision: 12.04.2011 Page 3 of 7	Wireless Charging System Audi Electronics Venture GmbH	
--	--	---

Table of contents

1.) Instructions.....	3
1. A) Definitions	4
1. B) General Values:	5
1. C) B-/E- field measuring procedure	6
1. D) Temperature measurement procedure on test bodies	7
1. E) Observation of the ICNIRP Guidelines.....	7

1.) Instructions

The testing instructions should give an overview of the considered wireless charging system. The different design types of wireless charging systems made it essential to clarify technical details like e.g. field arrangements. Used frequencies, magnetic field density, voltage and other parameters are not only important facts for comparing systems. They are also basics to proof the possibility to use a wireless charging system in daily live in public and private areas. For integration of a new technology in a car it is important to look at relevant safety guidelines. If possible, the system should be attached to the car during tests.

The ICNIRP Guidelines are internationally accepted and are important even for first lab setups for a safe working area around the wireless charging system.

Confidential. All rights reserved. No part of this document may be provided to third parties or reproduced without the prior written consent of the relevant AUDI AG department. This document is available to contracting parties solely via the responsible Procurement Department. The English translation is believed to be accurate. In case of discrepancies, the German version is alone authoritative and controlling. Numerical notation according to ISO convention (see VW 01000).

© AUDI AG

Abbildung E.3.: Test Instructions Seite 3

E.1. Test Instructions

Test Instructions Version 2.0 <small>Dept: I/AEV-3 Date of revision: 12.04.2011 Page 4 of 7</small>	Wireless Charging System 	Audi Electronics Venture GmbH
---	-------------------------------------	---

1. A) Definitions

Coordinate System:

To prove that the values of distances and offsets are the same for different wireless charging systems respect the given coordinate system. The center of the coordinate system is on the bottom side in the center of the secondary coil that is mounted on the car. The axis are defined as follows: Z is vertical and negative to the primary coil, X goes horizontal against the travel direction and Y horizontal to the right if you are aligned in travel direction.

top view symbol picture

side view symbol picture

Area Definition:

The different limits at particular positions require a definition of areas around the wireless charging system. There are five areas.

in-cabin room	Area I	between the coils
secondary coil	Area II	next to the coils but only under the car
coil gap	Area III	outside the footprint of the car
primary coil	Area IV	above the secondary coil
bottom chord	Area V	under the primary coil

The distance k depends on the coil dimensions and the car. For the testing instructions w_{coil} is the maximum diameter of the coils in the Y axis and w_{car} is set to 180cm.

$$k = \frac{w_{car}}{2} - \frac{w_{coil}}{2}$$

Confidential. All rights reserved. No part of this document may be provided to third parties or reproduced without the prior written consent of the relevant AUDI AG department. This document is available to contracting parties solely via the responsible Procurement Department. The English translation is believed to be accurate. In case of discrepancies, the German version is alone authoritative and controlling. Numerical notation according to ISO convention (see VW 01000).

© AUDI AG

Abbildung E.4.: Test Instructions Seite 4

Test Instructions Version 2.0 Dept: I/AEV-3 Date of revision: 12.04.2011 Page 5 of 7	Wireless Charging System  Audi Electronics Venture GmbH
--	---

1. B) General Values:

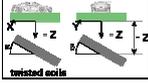
Name	Parameter	Measuring Unit	Description
Source Power	P_{input}	Watt	Includes the power consumption off all devices on the primary side.
Output Power	P_{output}	Watt	The available power output on the secondary side after rectification.
Power consumption secondary side	$P_{s, internal}$	Watt	If an additional power supply is necessary on the secondary side. This value shows the internal power consumption.
Stand by Power	$P_{S, Standby}$	Watt	Primary and secondary power consumption in standby mode.
	$P_{S, Standby}$	Watt	
Efficiency	η	%	$P_{input} / (P_{output} + P_{s, internal})$
Power Supply primary side	Mode _P		Supply Voltage Mode as AC/3AC/DC
	$U_{p, supply}$	V	Supply voltage on primary side
	$I_{p, supply, max}$	A	Maximal supply current on primary side
Power Supply secondary side	Mode _S		Supply Voltage Mode as AC/DC
	$U_{s, supply}$	V	Supply voltage on secondary side
	$I_{s, supply, max}$	A	Maximal supply current on secondary side
Coil gap	d	cm	Is defined from the top of primary coil to bottom of secondary coil
Location of primary coil	Offset x, y	cm	The offset shows the setup of the arrangement of the primary coil to the secondary coil and includes the deviation in x and y direction
Area II	k	cm	Width of the area on the side of the coil
Primary coil	$w_{primary}$	kg	Weight primary coil
	$a_{primary}$	cm	Length primary coil in X direction
	$b_{primary}$	cm	Width primary coil in Y direction
	$c_{primary}$	cm	Thickness of primary coil in Z direction
	Con _{primary}	Type	Connection Type on the primary Side
Secondary coil	$w_{secondary}$	kg	Weight secondary coil
	$a_{secondary}$	cm	Length secondary coil in X direction
	$b_{secondary}$	cm	Width secondary coil in Y direction
	$c_{secondary}$	cm	Thickness of secondary coil in Z direction
	Con _{secondary}	Type	Connection Type on the secondary Side

Confidential. All rights reserved. No part of this document may be provided to third parties or reproduced without the prior written consent of the relevant AUDI AG department. This document is available to contracting parties solely via the responsible Procurement Department. The English translation is believed to be accurate. In case of discrepancies, the German version is alone authoritative and controlling. Numerical notation according to ISO convention (see VW 01000).

© AUDI AG

Abbildung E.5.: Test Instructions Seite 5

E.1. Test Instructions

Name	Parameter	Measuring Unit	Description
Operation Temperatures	$T_{\text{primary coil}}$ $T_{\text{secondary coil}}$ $T_{\text{max operation}}$ $T_{\text{min operation}}$ $T_{\Delta \text{operation}}$	$^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$ $^{\circ}\text{C}$	Surface temperature of the coils after a working period of 3h at maximum power. Maximum operation temperature Minimal operation temperature Maximum temperature difference of primary and secondary coil
Angle tolerance	α β	Degree degree	
3D magnetic field simulation			

1. C) B-/E- field measuring procedure

The behaviour of a wireless charging system becomes obvious at a closer look on the field parameters. As there are different coil constructions on the market it's important to get to know the areas with the highest field densities. The knowledge of these field parameters are necessary to assess the effects on other devices. For safety and construction reasons, the parameters have to be measured at each area defined before.

Name	Parameter	Measuring Unit	Description
Position	X,Y,Z	cm, cm, cm	Position with the highest magnetic flux density and also measurement position
RMS magnetic flux density	B_{RMS}	Tesla	Root mean square magnetic flux density in a frequency range as far as possible.
Magnetic flux frequency spectrum	$B_{\text{EFF}}(f)$	Tesla	Graph and values to a magnetic flux frequency spectrum up to 10MHz.
RMS electrical field density	E_{RMS}	V/m	Root mean square electrical field density in a frequency range as far as possible.
Electrical field frequency spectrum	$E_{\text{EFF}}(f)$	V/m	Graph and values to an electrical field frequency spectrum up to 10MHz.

Confidential. All rights reserved. No part of this document may be provided to third parties or reproduced without the prior written consent of the relevant AUDI AG department. This document is available to contracting parties solely via the responsible Procurement Department. The English translation is believed to be accurate. In case of discrepancies, the German version is alone authoritative and controlling. Numerical notation according to ISO convention (see VW 01000).

© AUDI AG

Abbildung E.6.: Test Instructions Seite 6

Test Instructions Version 2.0 Dept: I/AEV-3 Date of revision: 12.04.2011 Page 7 of 7	Wireless Charging System Audi Electronics Venture GmbH	
--	--	---

1. D) Temperature measurement procedure on test bodies

To prevent fire and to guarantee compliance with permitted touch temperatures, an exact analysis about warming of test bodies is necessary. Test bodies are defined below. They have to be placed at the positions with the highest magnetic flux density in **area I, IV and V**. This position should be the same as chosen for the field measurement before. Include the distance to the primary coil in the measuring report. The measurement procedure should be conducted in a dry room with a temperature of 25°C (±5°C).

Test bodies:

- steel plates (S235JR+AR)
size: 100mm x 70mm x 10mm
- stainless steel plates
size: 100mm x 70mm x 10mm
- crown cap
- beverage cans, 125ml
- 5 eurocent

The testing procedure for each test body and each area is depending on maximum temperature obtained. At the beginning of each test assure that the test bodies are at a temperature of 25°C.

First run a **maximum temperature test**. That test includes the maximum temperature T_{max} during permanent field exposure and t_b the time to reach the maximum temperature.

Second if the maximum temperature is higher than 60°C. Measure the time t_{60} to reach the **60°C threshold**.

Third if the maximum temperature is higher than 80°C measure the time t_{80} to reach the **80°C threshold**.

1. E) Observation of the ICNIRP Guidelines

Describe the area around your device where the appropriate ICNIRP guidelines are fulfilled.

Confidential. All rights reserved. No part of this document may be provided to third parties or reproduced without the prior written consent of the relevant AUDI AG department. This document is available to contracting parties solely via the responsible Procurement Department. The English translation is believed to be accurate. In case of discrepancies, the German version is alone authoritative and controlling. Numerical notation according to ISO convention (see VW 01000).

© AUDI AG

Abbildung E.7.: Test Instructions Seite 7