

Integration und Optimierung der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge: Herausforderungen und Potenziale induktiver Ladesysteme

Von der Fakultät für
Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik
der Bergischen Universität Wuppertal

zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften
(Dr.-Ing.)**

genehmigte Dissertation

von

Amelie David (geb. Burkert), M. Sc.

aus Witten

Referent: Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling
Korreferentin: Prof. Dr.-Ing. Kerstin Siebert

Tag der mündlichen Prüfung: 04. Juli 2025

Danksagung

Mit großer Dankbarkeit blicke ich auf die Jahre, in denen ich diese Dissertation anfertigen durfte, zurück. Mit dem Abschluss dieser Dissertation geht ein intensiver und lehrreicher Abschnitt meines Lebens zu Ende. Ohne die Unterstützung und das entgegengebrachte Vertrauen zahlreicher Menschen wäre diese Arbeit nicht in der vorliegenden Form entstanden. An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich auf diesem Weg begleitet und bestärkt haben.

Mein besonderer Dank gilt zunächst Prof. Dr.-Ing. Benedikt Schmülling, der mir im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin an seinem Lehrstuhl die Möglichkeit eröffnete, an dieser Dissertation zu arbeiten. Seine kontinuierliche Unterstützung, fundierte fachliche Expertise sowie seine stets konstruktiven Anregungen haben maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ebenso möchte ich Prof. Dr.-Ing. Kerstin Siebert herzlich für die Übernahme des Zweitgutachtens sowie die wohlwollende Unterstützung danken.

Mein tief empfundener Dank gilt auch meiner Familie, die mir in jeder Lebenslage Rückhalt und Kraft schenkte. Insbesondere meinen Eltern danke ich von Herzen für ihre beständige Unterstützung. Meinen Dank richte ich zudem an meinen Ehemann Christian, der mir mit unermüdlicher Geduld, Liebe und Verständnis stets zur Seite stand. Ohne seine Unterstützung wäre dieser lange und oft herausfordernde Weg kaum zu bewältigen gewesen.

Nicht zuletzt möchte ich meiner Kollegin Dr.-Ing. Myrel Tiemann danken, die sich im Laufe der Zeit zu einer engen Freundin entwickelt hat. Ihre Herzlichkeit, ihr offenes Ohr und ihre ermutigenden Worte haben nicht nur meinen beruflichen Werdegang, sondern auch mein persönliches Leben nachhaltig bereichert.

Den Arbeitskollegen am Lehrstuhl EES spreche ich meinen Dank für die stets harmonische Zusammenarbeit und den inspirierenden Austausch aus.

Es ist die Familie,
die uns auf den Boden der Tatsachen stellt,
die uns verwurzelt
und uns gleichzeitig Flügel verleiht.

Friedrich Schiller

Kurzfassung

Die rasante Entwicklung induktiver Ladesysteme für Elektrofahrzeuge eröffnet neue Möglichkeiten, stellt jedoch auch erhebliche Herausforderungen bezüglich der Sicherheit und Akzeptanz im öffentlichen Raum dar. Diese Dissertation adressiert zwei zentrale Themen und liefert fundierte wissenschaftliche sowie praxisrelevante Erkenntnisse.

Zunächst wird ein umfassendes Messkonzept für induktive Ladesysteme entwickelt, das eine präzise Simulation elektromagnetischer Felder im urbanen Umfeld ermöglicht. Die Erfassung realer Feldverteilungen und Umgebungsbedingungen erfolgt systematisch, um einen Abgleich und eine Überprüfung der Simulationsmodelle zu ermöglichen. Hieraus resultiert eine realitätsnahe Bewertung der elektromagnetischen Exposition. Die Kombination von Mess- und Simulationsdaten erlaubt eine präzisere Identifikation von Störfeldern sowie eine optimierte Modellierung von Feldverläufen. Ziel ist die systematische Identifizierung und Minimierung potenzieller Risiken sowie die Bewertung der Einhaltung gesetzlicher Vorgaben zur elektromagnetischen Verträglichkeit und Feldexposition. Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass eine präzise Modellierung und messtechnische Validierung elektromagnetischer Felder essenziell sind, um die Sicherheit zu gewährleisten und die gesellschaftliche Akzeptanz dieser Technologie zu stärken.

Darüber hinaus werden die technologischen, politischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für den Ausbau einer zukunftsfähigen Ladeinfrastruktur analysiert. Die Untersuchung kommt zu dem Schluss, dass nur eine enge Verzahnung von Technologieentwicklung, regulatorischen Vorgaben und öffentlicher Akzeptanz eine nachhaltige und effiziente Implementierung induktiver Ladesysteme ermöglicht. Besondere Schwerpunkte liegen auf der Integration von Unterflurschränken zur Optimierung des verfügbaren städtischen Raums und der strategischen Verteilung von Ladestationen.

Diese Dissertation leistet einen ganzheitlichen und substantiellen Beitrag zur erfolgreichen Implementierung induktiver Ladesysteme und deren Bedeutung für die nachhaltige Mobilität der Zukunft. Die Arbeit liefert eine fundierte wissenschaftliche Grundlage und praxisrelevante Impulse für die Weiterentwicklung und den großflächigen Einsatz dieser Technologie.

Abstract

The rapid development of inductive charging systems for electric vehicles presents new opportunities but also significant challenges regarding safety and public acceptance. This dissertation addresses two key topics and provides well-founded scientific and practically relevant insights.

First, a comprehensive measurement concept for inductive charging systems is developed to enable precise simulation of electromagnetic fields in urban environments. The systematic acquisition of real field distributions and environmental conditions allows for the alignment and verification of simulation models, resulting in a realistic assessment of electromagnetic exposure. The combination of measurement and simulation data enables more precise identification of interference fields and optimized modeling of field distributions. The objective is the systematic identification and mitigation of potential risks while ensuring compliance with regulatory requirements for electromagnetic compatibility and field exposure. The results clearly demonstrate that accurate modeling and experimental validation of electromagnetic fields are essential for ensuring safety and fostering societal acceptance of this technology.

Furthermore, the technological, political, and societal framework conditions for the expansion of a future-proof charging infrastructure are analyzed. The study concludes that only a close integration of technological development, regulatory requirements, and public acceptance can enable the sustainable and efficient implementation of inductive charging systems. Special emphasis is placed on the integration of underground cabinets to optimize available urban space and the strategic distribution of charging stations.

This dissertation provides a holistic and in-depth contribution to the successful implementation of inductive charging systems and their significance for the future of sustainable mobility. The study establishes a solid scientific foundation and delivers practical insights for the further development and large-scale deployment of this technology.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xv
Nomenklatur	xxi
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation	1
1.2 Problemstellung und Herausforderungen	4
1.3 Wissenschaftliche Fragestellung	6
1.4 Ziel der Arbeit und angewandte Methodik	7
1.5 Aufbau der Arbeit	8
2 Grundlagen: Induktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge	11
2.1 Klassifizierung von induktiven Ladesystemen	11
2.2 Aufbau und Funktionsprinzip	13
2.2.1 Leistung	22
2.2.2 Kompensation	23
2.2.3 Leistungselektronik	26
2.2.4 Designparameter	33
2.3 Internationale Standards und Normen	35
2.4 Vorteile und Herausforderungen	38
2.5 Stand der Technik	40
2.6 Ladekonzept und Anwendungsbereiche	45
3 Grundlagen und Auswirkungen: Elektromagnetische Felder	47
3.1 Einführung in elektromagnetische Felder	47
3.2 Maxwell'sche Gleichungen	49
3.3 Elektromagnetische Verträglichkeit	51
3.4 Elektromagnetische Umweltverträglichkeit	53
3.4.1 Kopplungsmechanismen	54
3.4.2 Biologische Effekte	57

3.4.3	Internationale Standards und Normen	60
3.4.4	Referenz- und Grenzwerte für die Feldexposition	65
4	Evaluierung der Magnetfeldverteilung	69
4.1	Simulationskonzept	70
4.1.1	WPT-Module	71
4.1.2	Materialeigenschaften	75
4.1.3	Fahrzeugmodell	78
4.2	Messkonzept	82
4.2.1	Messequipment	82
4.2.2	Durchführung der Messungen	85
4.3	Test Case Study: 22 kW WPT-System	89
4.3.1	Messungen: 1 Taxi	90
4.3.2	Messungen: 2 Taxis	95
4.3.3	Simulative und messtechnische Magnetfeldauswertung	98
4.3.4	Expositionsauswertung	103
4.4	Simulationsbasierte Fallstudie: 50 kW WPT-System	104
4.4.1	Simulationsmodell	106
4.4.2	Angewandte Methodik	108
4.4.3	Simulative Magnetfeldauswertung	109
4.5	Sicherheitskonzept zur Begrenzung der elektromagnetischen Exposition	112
4.6	Zusammenfassung	118
5	Implementierung einer Ladeinfrastruktur	121
5.1	Internationale Perspektiven: Deutschland im Vergleich	123
5.2	Standortwahl	128
5.3	Zielgruppe	130
5.4	Ladetechnologien	132
5.4.1	Konduktives Ladeverfahren	133
5.4.2	Anschaffungskosten	136
5.5	Zahlungsmethoden und Backend-Lösungen	137
5.5.1	Zugang und Zahlungsmethode	138
5.5.2	Tarifmöglichkeiten	139
5.5.3	Backend-System und Roaming	140
5.6	Planung und Bau im öffentlichen Raum	140
5.6.1	Genehmigungsverfahren	141
5.6.2	Baustellenerrichtung	143
6	Integration induktiver Ladesysteme: Szenariobasierte Ansätze	145
6.1	Verteilung induktiver Ladesysteme	145
6.1.1	Definition und Rahmenbedingungen des Anwendungsszenarios	147

6.1.2	Anwendung eines graphentheoretischen Algorithmus zur Routenoptimierung	149
6.1.3	Ökonomische Bewertung der Umstellung auf induktive Ladestationen	152
6.1.4	Analyse und Diskussion der Ergebnisse	154
6.2	Nutzbarkeitsuntersuchung von Unterflurschränken	156
6.2.1	Anforderungen an Schaltschränke	156
6.2.2	Schaltschrankvarianten	157
6.2.3	Kosten-Nutzen-Analyse	158
6.3	Zusammenfassung	163
7	Strategische Weichenstellungen in Energie, Elektromobilität und Politik	165
7.1	Strategische Weichenstellungen im Bereich Energie	166
7.1.1	Integration erneuerbarer Energien	166
7.1.2	Entwicklung von Energiespeicherlösungen	171
7.1.3	Netzausbau und -integration	172
7.2	Strategische Weichenstellungen im Bereich Elektromobilität	172
7.2.1	Förderung und Anreize für Elektrofahrzeuge	173
7.2.2	Ausbau der Ladeinfrastruktur	173
7.2.3	Forschung und Entwicklung für induktive Ladetechnologie	174
7.2.4	Langfristige strategische Planung und Marktentwicklung	175
7.3	Strategische Weichenstellungen im Bereich Politik	176
7.3.1	Regulierungsrahmen und Normen	176
7.3.2	Nationale und europäische Strategien	177
7.3.3	Förderung öffentlicher und privater Kooperationen	178
7.3.4	Schaffung eines unterstützenden politischen Umfeldes	178
7.4	Entwicklung der sozialen Akzeptanz	179
7.4.1	Energiespeicherkosten	179
7.4.2	Sicherheitsrisiken bei Bränden von Elektrofahrzeugen	181
7.4.3	Reichweite aktueller Elektrofahrzeuge	181
7.4.4	Ladedauer von modernen Elektrofahrzeugen	187
7.4.5	Wandel der Wahrnehmung	189
7.5	Zusammenfassung	191
8	Schlussfolgerung	193
8.1	Zusammenfassung	193
8.2	Wissenschaftlicher Beitrag	194
8.3	Ausblick	195
9	Literaturverzeichnis	199

A Vertiefung: Maxwell'sche Gleichungen	235
A.1 Materialgleichungen	238
A.2 Verhalten an Materialgrenzen	239
B EMV-Prüfung bei induktiven Ladesystemen	243
C Normenkatalog	249
C.1 Normen für Ladetechnologien	249
C.2 Normen für EMVU	251
C.3 Normen für EMV-Prüfungen	252
C.4 Normen für Schaltschränke	253
D EMVU-Messungen	255
D.1 Allgemeine Dokumentation	255
D.2 Messablauf und -reihen	257
D.3 EMVU-Messungen im Fahrzeuginnenraum des TALAKO-Prototyps .	258
D.4 EMVU-Messungen bei 1 Taxi mit dem TALAKO-Pilotensystem . . .	260
D.4.1 Optimale Positionierung	260
D.4.2 Mit Versatz in y-Richtung	262
D.5 EMVU-Messungen bei 2 Taxis mit dem TALAKO-Pilotensystem . . .	264
D.5.1 Optimale Positionierung	264
D.5.2 Mit Versatz in x-Richtung	266
D.6 Referenzmessung fürs TALAKO-Pilotensystem	268
E Publikationen	271
E.1 Eigene Publikationen	271
E.2 Beteiligung an weiteren Publikationen	272
F Betreute Abschlussarbeiten	275
F.1 Masterthesen	275
F.2 Bachelorthesen	275

Abbildungsverzeichnis

1.1	CO ₂ -Emissionen in Deutschland nach allgemeinen Sektoren (links) und im Verkehrssektor (rechts) im Jahr 2023 (Datenquelle: [4]).	2
1.2	Aufbau und Gliederung der Dissertation.	10
2.1	Einordnung der WPT-Technologien in Bezug auf Leistung, Frequenz und Reichweite (Datenquelle: [9]).	13
2.2	Funktionsprinzip eines WPT-Systems für EVs.	14
2.3	Ersatzschaltbild eines WPT-Systems.	15
2.4	a) Ersatzschaltbild eines MRC-Systems mit S/S-Kompensation und b) die reflektierte Impedanz.	20
2.5	Kompensationstopologien: a) Seriell-Seriell, b) Seriell-Parallel, c) Parallel-Seriell, d) Parallel-Parallel.	24
2.6	Blindspannung an den Komponenten bei serieller Kompensation.	25
2.7	Blockdiagramm eines WPT-Systems mit den Ansteuer- und Empfangsstufen sowie den entsprechenden Wirkungsgraden.	26
2.8	Ersatzschaltbild eines Vollbrückenwechselrichters.	28
2.9	Ersatzschaltbild eines Brückengleichrichters.	28
2.10	Ersatzschaltbild eines Aufwärtswandlers.	30
2.11	Leistungsregelung auf der Primärseite.	32
2.12	Induktives Laden für EVs mit den entsprechenden Normen nach Komponente (Datenquelle: [54]).	36
3.1	Das elektromagnetische Spektrum (Datenquelle: [124]).	48
3.2	Übersicht der Maxwell'schen Gleichungen in Differentialform und ihrer physikalischen Bedeutung (Datenquelle: [126]).	50
3.3	Schematische Darstellung des EMV-Modells.	52
3.4	Grenzwerte für die Störaussendung nach verschiedenen Normen (Datenquelle: [29]).	53
3.5	a) Exposition eines menschlichen Körpers durch niederfrequente magnetische Felder eines WPT-Systems, b) die im Körper induzierten Wirbelströme, c) die im Körper induzierten elektrischen Felder [122].	56
3.6	Elektromagnetisches Spektrum und die damit verbundenen biologischen Effekte.	59

3.7	Rechtliche Regelung für niederfrequente Felder im europäischen Vergleich (Datenquelle: [124]).	64
3.8	Bewertungsschema für die Einhaltung der menschlichen Exposition gegenüber EMF in einem zu prüfenden System (Datenquelle: [52]).	67
4.1	a) Installationsmöglichkeiten des GA-Moduls und b) Definition des magnetischen Spalts.	72
4.2	a) Anordnung und b) Aufbau der GA- und VA-Module.	73
4.3	Topologien für die Sekundärseite: a) runde Spule, b) eckige Spule und c) DD-Spule.	74
4.4	Topologien für die Primärseite: a) DDQ-, b) bipolare und c) tripolare Spule.	75
4.5	Verteilung der magnetischen Flussdichte mittels originalen Fahrzeugmodells: a) Vorderansicht, b) Seitenansicht von einem Taxi und c) Seitenansicht von zwei Taxis [152, 160].	80
4.6	Simulative Evaluationsebenen mittels Fahrzeognachbildung.	81
4.7	Anordnung der Sensorelemente für die isotrope 3-Achsen-Sonde: a) Draufsicht und b) Seitenansicht (Datenquelle: [163]).	84
4.8	Blockschaltbild zum Funktionsprinzip des Magnetometers (Datenquelle: [163]).	84
4.9	Definierte Messbereiche sowohl außerhalb als auch innerhalb des Fahrzeugs (Datenquellen: [35, 55, 56]).	86
4.10	Definierte Messpunkte auf der Evaluationslinie [56] um das Fahrzeug.	87
4.11	Definierte Messpunkte auf der Evaluationslinie [56] neben dem Fahrzeug auf unterschiedlichen Höhen.	87
4.12	Erweiterung der definierten Messpunkte auf der Evaluationslinie um zwei Fahrzeuge basierend auf Abbildung 4.10.	88
4.13	Übersichtsgrafik des zweiphasigen Forschungsprojektes TALAKO.	89
4.14	EMVU-Messung am Heck des Taxis an der Prototypanlage ($I_{p,RMS} = 55\text{ A}$, $P_{out} = 20\text{ kW}$).	91
4.15	EMVU-Messung neben der Hintertür (Fahrerseite) an der Prototypanlage ($I_{p,RMS} = 55\text{ A}$, $P_{out} = 20\text{ kW}$).	91
4.16	Einfluss der Karosserie anhand der EMVU-Messung auf dem Klappensitz (in Fahrtrichtung links) bei geschlossener und geöffneter Hecktür ($I_{p,RMS} = 55\text{ A}$, $P_{out} = 20\text{ kW}$).	92
4.17	Vergleich der EMVU-Messwerte des WPT-Systems ohne und mit seitlichem Versatz von $\Delta Y = \pm 70\text{ mm}$ ($I_{p,RMS} = 55\text{ A}$, $P_{out} = 20\text{ kW}$) rund um das Fahrzeug.	93
4.18	Vergleich der Messwerte auf verschiedenen Sitzpositionen ohne und mit seitlichem Versatz von $\Delta Y = \pm 70\text{ mm}$ ($I_{p,RMS} = 55\text{ A}$, $P_{out} = 20\text{ kW}$).	93

4.19	EMVU-Messungen unter dem Fahrzeug: Messpunkte und -werte aus unterschiedlichen Messreihen (siehe Tabelle 4.4).	94
4.20	EMVU-Messungen bei zwei hintereinander stehenden Taxen ohne und mit Versatz in $\Delta X = \pm 420$ mm ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW).	96
4.21	EMVU-Messungen bei zwei hintereinander stehenden Taxen ohne und mit Versatz in $\Delta Y = -50$ mm ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW).	97
4.22	Simulierte und gemessene magnetische Flussdichte bei einem aktiven WPT-System ohne Versatz ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW, Messpunkte rundum das Fahrzeug).	100
4.23	Simulierte und gemessene magnetische Flussdichte bei einem aktiven WPT-System ohne Versatz ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW, Messpunkt vor dem Fahrzeug).	100
4.24	Simulierte und gemessene magnetische Flussdichte bei zwei hintereinander stehenden Taxen ohne Versatz ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW, Messpunkte neben den Fahrzeugen).	102
4.25	Worst-Case Expositionsszenario aus [152].	104
4.26	Designes WPT-System: a) Anordnung des GA- und VA-Moduls, b) Ersatzschaltbild.	106
4.27	Szenarien: a) ohne Versatz und b) mit Worst-Case-Versatz.	109
4.28	Bewertungslinien und -höhen a) vor und b) neben den LKWs.	109
4.29	Magnetische Flussdichte neben einem LKW auf der Evaluationslinie in einem Abstand von 200 mm auf verschiedenen Höhen [56,4 mm, 500 mm] bei optimaler Positionierung und Worst-Case-Versatz.	110
4.30	Magnetische Flussdichte zentral zwischen den LKWs auf der Evaluationslinie auf verschiedenen Höhen [56,4 mm, 500 mm] bei optimaler Positionierung und Worst-Case-Versatz.	111
4.31	Magnetische Flussdichte vor den LKWs auf der Evaluationslinie in einem Abstand von 200 mm auf verschiedenen Höhen [56,4 mm, 500 mm] bei optimaler Positionierung und Worst-Case-Versatz.	111
4.32	Simulationsskizze zur Primärspule mit frontaler a) + b) und seitlicher c) + d) Evaluationslinie.	117
4.33	Auswertung der magnetischen Flussdichte auf frontaler Evaluationslinie zur Primärspule (siehe Abbildung 4.32)	117
4.34	Auswertung der magnetischen Flussdichte auf seitlicher Evaluationslinie zur Primärspule (siehe Abbildung 4.32)	117
5.1	a) Anzahl der Ladestationen pro Bundesland (Datenquelle: [205]), b) durchschnittliche Erreichbarkeit einer Normalladestation in Deutschland 2023 (Datenquelle: [206]).	125
5.2	Private und öffentlich zugängliche Ladestationen (Datenquelle: [54]). . .	131
5.3	Ladetechnologien mit typischen Ladeleistungen (Datenquelle: [54]). .	132

5.4	Anwendungsszenarien der verschiedenen Lademodi.	134
5.5	Konduktives Laden für EVs mit den entsprechenden Normen nach Komponente.	135
5.6	Verantwortliche Dezernate bzw. Ressorts für die Installation eines WPT-Systems im öffentlichen Raum (siehe Kapitel 4.3).	142
6.1	Ansatz zur Implementierung einer optimierten Ladeinfrastruktur für WPT-Systeme.	147
6.2	Geografische Verteilung der bestehenden Tankstellen in Wuppertal. .	150
6.3	Verknüpfung von Tankstellen im Abstand von 4 km.	151
6.4	Verschiedene Schaltschranktypen.	158
6.5	Funktionsblöcke eines WPT-Systems.	160
6.6	Baustellenskizzen zu den Schaltschrankvarianten aus Abbildung 6.4. .	160
7.1	Prozesskette "Well-to-Wheel".	168
7.2	CO ₂ -Fußabdruck verschiedener Nissan-Fahrzeugtypen.	170
7.3	Kostenentwicklung von Li-Ion-Batteriepacks und -zellen für EVs (von 2013 bis 2023) (Datenquelle: [286]).	180
7.4	Reichweite aktueller EVs im Vergleich zur durchschnittlichen Tagesreichweite amerikanischer und deutscher Autofahrer.	182
7.5	Umfrageergebnisse zur Reichweitenangst (Datenquelle: [320]). . . .	186
7.6	Ladezeit aktueller EVs in Abhängigkeit von der Ladeleistung. . . .	190
7.7	Vergleich der sozialen Akzeptanz von EVs in 2011 und 2020. . . .	191
A.1	Durchflutungsgesetz (Datenquelle: [126]).	235
A.2	Induktionsgesetz (Datenquelle: [126]).	236
A.3	Gaußscher Satz des Magnetfeldes (Datenquelle: [126]).	237
A.4	Gaußscher Satz der Elektrostatik (Datenquelle: [126]).	238
A.5	Verhalten der elektrischen Feldstärke beim Übergang von einem Dielektrikum (ϵ_{r1}) in ein zweites Dielektrikum ($\epsilon_{r2} < \epsilon_{r1}$) (Datenquelle: [126]).	241
B.1	Aufteilung der EMV-Prüfungen in Fahrzeug- und Komponentenebene bei WPT-Systemen für EVs.	243
B.2	Messergebnisse leitungsgeführter Emissionen [137]: a) schematische Darstellung, b) Gleichtaktstrom I_{CM} und c) Gegentaktstrom I_{DM} . . .	245
B.3	a) Ersatzschaltbild des entwickelten EMV-Filters, b) Versuchsaufbau der Leistungselektronik und c) gemessene Magnetfeldemissionen des WPT-Systems [123].	246
B.4	Grenzwerte für Magnetfeldemissionen (Datenquelle: [29]).	246

B.5	Prüfaufbau zur Messung gestrahlter Emissionen eines WPT-Systems: a) normgerechte Skizze (Draufsicht) (Datenquelle: [35]) und b) praktische Umsetzung (Frontansicht) (Spulensystem: [137]).	247
B.6	Prüfaufbau zur Messung gestrahlter Emissionen des Fahrzeuges (Datenquelle: [35]): a) normgerechte Skizze (Draufsicht), b) normgerechte Skizze (Seitenansicht) und c) aktuelle Grenzwerte.	247
D.1	Messpunkte a) auf den Klappsitzen, b) auf der Rückbank und c) auf dem Fahrersitz zu den Ergebnissen in Tabelle D.2.	258
D.2	Aufnahmen von den Messungen: a) auf 500 mm (rechte Hintertür), b) auf 1.000 mm (Fahrertür), c) auf 1.500 mm (Fahrertür) und d) eine Referenzmessung auf 500 mm.	260
D.3	Skizze zur EMVU-Messung mit Versatz bei 1 Taxi in y-Richtung.	262
D.4	Aufnahmen von den Messungen: a) auf Bodenhöhe, b) auf 500 mm (Fahrzeugfront), c) auf 1.000 mm (rechte Fahrzeugseite) und d) auf 1.500 mm (rechte Fahrzeugseite).	264
D.5	Skizze zur EMVU-Messung mit Versatz bei 2 Taxis in x-Richtung mit Ergebnissen zur EMVU-Messung mit optimaler Positionierung.	266
D.6	Dompropst-Ketzer-Straße, 50667 Köln.	268
D.7	Ergebnisse der Referenzmessung in der Domprobst-Ketzer-Straße, 50667 Köln.	269

Tabellenverzeichnis

2.1	Kapazitäten für verschiedene Kompensationstopologien.	25
3.1	Basisgrenzwerte für die körperinternen elektrischen Felder für die Feldexposition (Datenquelle: [52]).	65
3.2	Referenzwerte (RMS) für die Feldxposition der allgemeinen Bevölkerung (Datenquelle: [52]).	65
4.1	Positionierungstoleranz für das VA-Modul (Datenquelle: [35]).	72
4.2	Spezifikation der Z-Klassen (Datenquelle: [35]).	73
4.3	Eigenschaften der verwendeten Kupferleitung gemäß [154, 155, 159].	77
4.4	Ergebnisse zu EMVU-Messungen unter dem Fahrzeug.	94
4.5	Vergleich der $ \vec{B} _{\text{RMS}}$ -Werte: Messung vs. Simulation an den Punkten 1-6 (Abbildung 4.22) und in verschiedenen Höhen (siehe Abbildung 4.11).	101
4.6	Vergleich der $ \vec{B} _{\text{RMS}}$ -Werte: Messung vs. Simulation an den Punkten 1-4 (Abbildung 4.24) und in verschiedenen Höhen (siehe Abbildung 4.11).	101
4.7	Spulenparameter des simulierten 50 kW WPT-Systems.	108
4.8	Elektrische Parameter des simulierten 50 kW WPT-Systems.	108
4.9	Maximale magnetische Flussdichte bei den vorgeschlagenen Versätzen auf der Evaluationslinie vor den LKWs in 200 mm Entfernung und verschiedenen Höhen [0, 500 mm, 1.000 mm, 1.500 mm]	110
4.10	Einstufung der Eintrittswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Betriebsstunden.	113
4.11	Einstufung der Gefährdungslage in Abhängigkeit vom Faktor r	113
4.12	Klassifizierung der Risikostufen \mathcal{R} mit Maßnahmenempfehlungen.	114
4.13	Risikoklassifizierung der betrachteten Szenarien.	114
5.1	Kosten verschiedener Lademöglichkeiten (Datenquellen: [223, 233, 234]).	137
5.2	Planungskatalog zur Baustelleneinrichtung (Datenquelle: [245]).	143
6.1	Technische Spezifikationen der EVs gemäß definierter Anforderungen. .	148
6.2	Investitionskosten pro Tankstelle (Datenquelle: [255])	153

6.3	Investitionskosten pro 22 kW WPT-System (Datenquellen: [233, 257, 258]).	154
6.4	Funktionen eines Schaltschrankes (Datenquelle: [259]).	157
6.5	Kostenkalkulation zu den Schaltschrankvarianten (siehe Abbildung 6.4).	161
7.1	Ökobilanz-Vergleich: Nissan Leaf vs. konventionelle Modelle nach Stromquelle und Fahrleistung.	170
7.2	Prozentsatz der Bevölkerung nach jährlicher Fahrleistung für 2019 und 2021 (Datenquelle: [275]).	171
7.3	EV-Modelle zur Analyse der Reichweite (Datenquelle: [270, 297]).	183
7.4	Korrelation zwischen Kaufpreis und Reichweite.	185
7.5	Ladezeit eines Nissan Leaf mit 40 kWh Batterie in Abhängigkeit von Ladeleistung und -kapazität (Datenquelle: [273]).	188
A.1	Definition von Materialeigenschaften.	239
C.1	Normen für induktive Ladesysteme.	249
C.2	Normen für konduktive Ladesysteme.	250
C.3	Normen und Richtlinien zur EMVU.	251
C.4	EMV-Standards für Emissionsprüfungen und Störfestigkeit an Offboard-Komponenten.	252
C.5	Normen für die Produktion und Installation von Schaltschränken	253
C.6	Normen für die Produktion und Installation von Schaltschränken	254
D.1	Protokoll zur EMVU-Messung des Fahrzeuginnenraums beim Prototyp.	258
D.2	Ergebnisse der EMVU-Messungen im Fahrzeuginnenraums des Prototyps in Lathen.	259
D.3	Protokoll zur EMVU-Messung bei 1 Taxi mit Pilotensystem.	260
D.4	Ergebnisse der EMVU-Messungen um 1 Taxi mit Pilotensystem bei optimaler Positionierung.	261
D.5	Protokoll zur EMVU-Messung bei 1 Taxi mit Pilotensystem.	262
D.6	Ergebnisse der EMVU-Messungen bei 1 Taxi mit Pilotensystem bei Versatz $x = 0, y = -50 \text{ mm}, z = 140 \text{ mm}$	263
D.7	Protokoll zur EMVU-Messung bei 2 Taxis mit dem Pilotensystem in optimaler Positionierung.	264
D.8	Ergebnisse der EMVU-Messung bei 2 Taxis beim Pilot in Köln.	265
D.9	Protokoll zur EMVU-Messung bei 2 Taxis mit dem Pilotensystem mit Versatz in x-Richtung.	266
D.10	Ergebnisse der EMVU-Messung bei 2 Taxis mit dem Pilotensystem mit Versatz in x-Richtung.	267

D.11 Protokoll zur Referenzmessung des TALAKO-Pilotsystems.	268
---	-----

Abkürzungsverzeichnis

AC	<i>Alternating Current</i>
AGV	<i>Autonomous Ground Vehicle</i>
AL	Aktionswert
AM	Mittelwellenrundfunk
App	<i>Application</i>
AUV	<i>Autonomous Underwater Vehicle</i>
AWG	<i>American Wire Gauge</i>
BauO	Bauordnung
BEV	<i>Battery Electric Vehicle</i>
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschriften
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMS	Batteriemanagementsystem
BMW	Bayerische Motoren Werke AG
BP	Bipolar
BR	Basisgrenzwert
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CCS	<i>Combined Charging System</i>
CE	<i>Conducted Emissions</i>
CE-Norm	<i>Conformité Européenne</i>
CH₄	Methan
CIED	<i>Cardiovascular Implantable Electronic Device</i>
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
CM	<i>Common Mode</i>
CO₂	Kohlenstoffdioxid
CRC	<i>Capacitive Resonant Coupling</i>
CS	<i>Conducted Susceptibility</i>
DARC	Deutscher Amateur-Radio-Club
DC	<i>Direct Current</i>

DD	<i>Double-D</i>
DDQ	<i>Double-D&Q</i>
DGUV	Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DM	<i>Differential Mode</i>
DRL	Dosimetrischer Referenzwert
DS	<i>Driving Stage</i>
ECE	Economic Commission for Europe
EE	Erneuerbare Energien
ELF	<i>Extremely Low Frequency</i>
ELT	<i>Exposure Level Tester</i>
ELV	Expositionsgrenzwert
EMF	Elektromagnetisches Feld
EMI	Elektromagnetische Interferenzen
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EMVU	Elektromagnetische Umweltverträglichkeit
ERL	Expositionsgrenzwert
ESD	<i>Electrostatic Discharge</i>
ETSI	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
EU	Europäische Union
EV	<i>Electric Vehicle</i>
F1	Frontebene 200 mm von der Fahrzeugfront entfernt
F2	Frontebene 1.000 mm von der Fahrzeugfront entfernt
FAME II	<i>Faster Adoption and Manufacturing of Electric Vehicles in India</i>
FDTD	<i>Finite-Difference Time-Domain</i>
FEM	Finite Element Methode
FOD	<i>Foreign Object Detection</i>
FOM	<i>Figure-of-Merit</i>
GA	<i>Ground Assembly</i>
GM	<i>General Motors</i>
HEV	<i>Hybrid Electric Vehicle</i>
HF	Hochfrequenz
HGÜ	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung
IARC	<i>International Agency for Research on Cancer</i>
ICCB	<i>In-Cable Control Box</i>
ICNIRP	<i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i>
ID	<i>Identification</i>

IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IF	<i>Intermediate Frequency</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IMD	<i>Implantable Medical Device</i>
INTIS	<i>Integrated Infrastructure Solutions GmbH</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IPT	<i>Inductive Power Transfer</i>
ISM	<i>Industrial, Scientific, Medical</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
KAIST	<i>Korea Advanced Institute of Science and Technology</i>
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
LCC	Filtertyp bestehend aus einer Induktivität (L) und zwei Kapazitäten (C)
LCL	Filtertyp bestehend aus zwei Induktivitäten (L) und einer Kapazität (C)
LCR-Meter	Messgerät zur Bestimmung von Induktivitäten (L), Kapazitäten (C) und Widerständen (R)
LEVC	<i>London Electric Vehicle Company Limited</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
Li-Ion	Lithium-Ionen
LISN	<i>Line Impedance Stabilization Network</i>
LKW	Lastkraftwagen
LOD	<i>Living Object Detection</i>
LSV	Ladesäulenverordnung
MCR	<i>Magnetic Resonant Coupling</i>
MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>
MnZn	Mangan-Zink
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistors</i>
MRT	Magnetresonanztomographie
MW	Mikrowelle
NCA	Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxide
NIR	<i>Non-Ionizing Radiation</i>
NO₂	Stickstoffdioxid
NRW	Nordrhein-Westfalen
OATS	<i>Open Area Test Site</i>
OLEV	<i>On-Line Electric Vehicle</i>

OPEX	<i>Operational Expenditures</i>
Peak	Spitzenwert
PHEV	<i>Plug-In-Hybrid Electric Vehicle</i>
PNS	Peripheres Nervensystem
POI	<i>Points of Interest</i>
P/P	Parallel-Parallel
P/S	Parallel-Seriell
PV	Photovoltaik
PWM	Pulsweitenmodulation
QR	<i>Quick Response</i>
RC	<i>Resonant Coupler</i>
RE	<i>Radiated Emissions</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RFID	<i>Radio Frequency Identification</i>
RL	Referenzwert
RMS	Effektivwert
RPEV	<i>Roadway-Powered Electric Vehicle</i>
RS	<i>Radiated Susceptibility</i>
rs	<i>Receiving Stage</i>
R_x	<i>Receiver</i>
S1	Seitebene 200 mm von der Fahrzeugseite entfernt
S2	Seitebene 1.000 mm von der Fahrzeugseite entfernt
SAC	<i>Semi-Anechoic Chamber</i>
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SAR	Spezifische Absorptionsrate
SF-FDTD	<i>Scaled-Frequency Finite-Difference Time-Domain</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SoC	<i>State of Charge</i>
S/P	Seriell-Parallel
SRD	<i>Short Range Devices</i>
S/S	Seriell-Seriell
SSK	Strahlenschutzkommission
STND	<i>Exposure Standard</i>
TALAKO	Taxiladekonzept für Elektrotaxis im öffentlichen Raum
TEN-T	<i>EU-Trans-European Transport Network</i>
TtW	<i>Tank-to-Wheel</i>
T_x	<i>Transmitter</i>

UBC	<i>University of British Columbia</i>
UN	<i>United Nations</i>
USA	<i>United States of America</i>
UV	Ultraviolett
V2G	<i>Vehicle-to-Grid</i>
VA	<i>Vehicle Assembly</i>
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VW	Volkswagen AG
WHO	<i>World Health Organization</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WLTP	<i>Worldwide Harmonised Light-Duty Vehicles Test Procedure</i>
WPT	<i>Wireless Power Transfer</i>
WtT	<i>Well-to-Tank</i>
WtW	<i>Well-to-Wheel</i>
ZNS	Zentrales Nervensystem

Nomenklatur

ΔZ	Länge des Magnetspalts
δ	Eindringtiefe
ϵ	Dielektrische Permittivität
η	Wirkungsgrad
λ	Wellenlänge
\mathcal{R}	Risikowert
μ	Magnetische Permeabilität
μ_0	Permeabilität des Vakuums
μ_r	Relative Permeabilität des Mediums
ω	Kreisfrequenz
Φ	Magnetischer Fluss
Ψ_e	Elektrischer Fluss
ρ	Raumladungsdichte
σ	Elektrische Leitfähigkeit
\emptyset	Durchmesser
A	Adjazenzmatrix
B	Magnetische Flussdichte
C	Kapazität
D	Tastgrad
E	Elektrisches Feld
E	Kanten (<i>Dijkstra-Algorithmus</i>)
f	Frequenz
f_0	Resonanzfrequenz
G	Gewichteter Graph

<i>H</i>	Magnetische Feldstärke
<i>I</i>	Elektrischer Strom
<i>J</i>	Stromdichte
<i>j</i>	Imaginäre Zahl
<i>J_L</i>	Leitungsstromdichte
<i>J_V</i>	Verschiebungsstromdichte
<i>k</i>	Kopplungskoeffizient
<i>L</i>	Selbstinduktivität
<i>l</i>	Länge der Spule
<i>M</i>	Gegeninduktivität
<i>P</i>	Leistung
<i>Q</i>	Gütefaktor
<i>R</i>	Elektrischer Widerstand, parasitärer elektrischer Widerstand
<i>r</i>	Verhältnis des gemessenen Magnetfeldwertes zum ICNIRP-Grenzwert
<i>R_i</i>	Innenwiderstand der Spannungsquelle
<i>S</i>	Schweregrad
<i>T</i>	Periode
<i>t_{on}</i>	Impulsdauer
<i>U</i>	Spannung
<i>V</i>	Knoten
<i>W</i>	Eintrittswahrscheinlichkeit
<i>X</i>	Reaktanz
<i>x</i>	Länge entlang der X-Achse
<i>X_C</i>	Kapazitive Reaktanz
<i>X_L</i>	Induktive Reaktanz
<i>y</i>	Länge entlang der Y-Achse
<i>Z</i>	Impedanz
<i>Z_i</i>	Interne Impedanz der Wechselspannungsquelle
<i>A</i>	Fläche
<i>C</i>	Kontur
<i>d</i>	Abstand
FOM	Leistungskennzahl

N Anzahl der Windungen

Q Ladungsmenge

V Volumen

Index

\perp Orthogonal

ac Wechselstrom

bat Batterie

CM Common Mode

dc Gleichstrom

DM Differential Mode

ds Ansteuerstufe

F Oberfläche

ges Gesamt

i Nummer des Mediums

in Eingang

ind Induziert

L Last

mag Magnitude

max Maximal

n Normalenkomponente senkrecht zur Oberfläche

opt Optimal

out Ausgang

p Primärseite

r Reflektiert

rc Resonanter Koppler

rs Empfangsstufe

s Sekundärseite

t Tangentiale Komponente parallel zur Grenzschicht

1 Einleitung

Das Kapitel liefert die für das Verständnis des Dissertationsthemas notwendigen Hintergrundinformationen. Es ordnet die Dissertation innerhalb eines breiteren wissenschaftlichen Kontexts ein, indem es den aktuellen Stand der Forschung darstellt und bestehende Forschungslücken identifiziert, die durch die vorliegende Arbeit geschlossen werden sollen. Ausgehend von den diskutierten Forschungsproblemen und -herausforderungen werden die zentralen Forschungsfragen der Dissertation präzise formuliert. Diese Forschungsfragen bilden den Kern der Studie und stellen die Basis der gesamten Untersuchung dar. Im weiteren Verlauf des Kapitels werden das Hauptziel der Forschung sowie die angewandte Methodik erläutert. Abschließend wird ein Überblick über den Aufbau der Dissertation gegeben, wobei die Inhalte der einzelnen Kapitel kurz skizziert werden.

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Wende von der heutigen, überwiegend noch fossil-nuklearen zu einer nachhaltigen, mehrheitlich regenerativ geprägten Energieversorgung ist eine der globalen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts. In der Europäischen Union (EU) konnte im Jahr 2022 nur das Mitgliedsland Schweden mehr als 50 % seines Bruttostroms aus erneuerbaren Energiequellen erzeugen [1]. Im Durchschnitt der europäischen Länder wird die Energieversorgung immer noch zu 77 % durch fossile sowie nukleare Energieträger und zu 23 % durch erneuerbare Energien (EE) sichergestellt [1].

Ein Umdenken in der Energieversorgung wird einerseits bedingt durch den nach wie vor weltweit zukünftig stark ansteigenden Energiebedarf – dieser steht im Zusammenhang mit der zunehmenden Globalisierung, Urbanisierung sowie Industrialisierung. Andererseits sind ein wesentlicher Faktor die beschränkten Ressourcen konventioneller bzw. fossiler Energieträger und die Eigenschaften sowie Risiken der Kernenergie, die keine auf Dauer verlässliche und gefahrlose Alternative darstellt. Ein Umwelt belastender Nebeneffekt resultiert aus den CO₂-Emissionen, die eine Folge der Verbrennung konventioneller Energieträger ist. Die in der Erdatmosphäre erhöhte CO₂-Konzentration löst einen Treibhauseffekt aus, der für die globale

Erderwärmung verantwortlich ist. Die gravierenden Folgen zeigen sich weltweit zunehmend durch Naturkatastrophen (z. B. Wüstenbildung, Dürren, Feuer, schmelzende Gletscher, Überflutungen) [2].

In Konsequenz dessen erfolgt eine Neuorientierung, welche sich auf regenerative bzw. erneuerbare Energien sowie auf eine umweltfreundliche Politik fokussiert. Allerdings erweist sich dieser Transformationsprozess als nicht gänzlich reibungslos, da die Etablierung einer vollständig neuen Energieversorgung erforderlich ist und auch die Industrie einen entsprechenden Wandel durchlaufen muss. Der Industriezweig, der sich infolgedessen fundamental umstrukturieren muss, ist hierbei die Automobilbranche. Der Verkehrssektor, der drittgrößte Verursacher von CO₂-Emissionen, steht vor der Herausforderung, seinen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten [3]. Die Abbildung 1.1 bietet eine Aufschlüsselung der CO₂-Emissionen in allgemeine Sektoren sowie im Detail im Verkehrssektor [4]. Insgesamt werden dem Verkehrssektor 22 % der gesamten CO₂-Emissionen zugerechnet. Der Personenverkehr ist für 61 % der CO₂-Emissionen verantwortlich und stellt somit einen wesentlichen Ausgangspunkt für grundlegende Veränderungen dar. Diesbezüglich ist die Automobilbranche gefordert, neue, wettbewerbsfähige Technologien zu den derzeitig konventionellen Fahrzeugen zu entwickeln. Die enorme Herausforderungen besteht nicht nur in der Entwicklung innovativer Antriebe und entsprechender Ladetechnologien, sondern auch in der Konzeptionierung einer völlig neuen Ladeinfrastruktur.

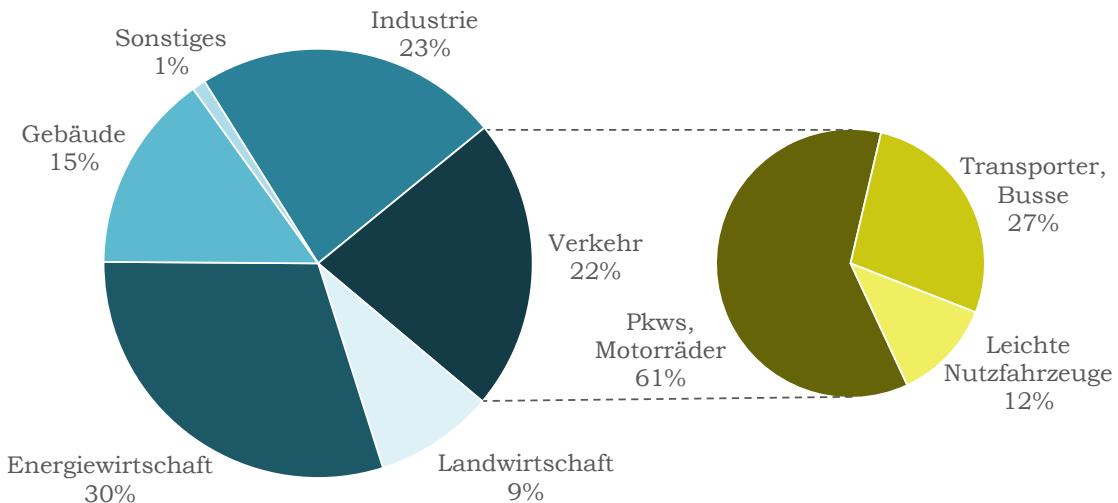


Abbildung 1.1: CO₂-Emissionen in Deutschland nach allgemeinen Sektoren (links) und im Verkehrssektor (rechts) im Jahr 2023 (Datenquelle: [4]).

Die Elektromobilität stellt eine nachhaltige Lösung für die Anforderungen dar, die von der nationalen wie auch internationalen Gesetzgebung in Folge der begrenzten Verfügbarkeit von fossilen Energieträgern sowie des Klima- und Umweltschutzaspekts verfasst wurden. In Konsequenz der neuen Auflagen der Regierungen sieht

sich die Automobilbranche bis zum Jahr 2030 gezwungen, die Elektromobilität für die Massenproduktion zu optimieren. Das Klimaschutzziel der Bundesregierung für das Jahr 2050 beinhaltet die weitestgehende Treibhausgasneutralität [5].

Die Elektro- bzw. Hybridfahrzeuge sind dadurch gekennzeichnet, dass sie über einen elektrischen bzw. teilweise elektrischen Antrieb verfügen, wodurch eine Anbindung an das öffentliche Energieversorgungsnetz erforderlich wird. Die Schnittstelle zwischen dem Energieversorgungsnetz und den Elektro- bzw. Hybridfahrzeugen bildet u. a. das konduktive Ladesystem. Die konduktive Ladetechnologie weist allerdings eine geringe Benutzerfreundlichkeit auf. Zudem stellen die Ladekabel nicht nur für die Fahrzeugnutzer eine Stolpergefahr dar, sondern auch für Dritte. Des Weiteren ist das Ladekabel wie auch der Stecker ständig den verschiedenen Witterungsverhältnissen (z. B. Sonne, Regen, Eis, Schnee) ausgesetzt und führt zu einem höheren Verschleiß. Vor allem auch in öffentlich zugänglichen Bereichen bietet das Ladekabel ein höheres Potential für Vandalismus, wodurch nicht nur das Ladekabel beschädigt werden kann, sondern auch das Fahrzeug sowie die Ladeinfrastruktur.

Um den Komfort des Fahrzeugnutzers beim Ladevorgang zu optimieren und potenziellen Schwierigkeiten, wie zuvor erörtert, vorzubeugen, werden induktive Ladesysteme als alternative Option in Erwägung gezogen. Bei der hier thematisierten Ladetechnologie erfolgt der Energietransport in Form eines magnetischen Feldes von einem Sender über einen Luftspalt zu einem Empfänger. Der Ladevorgang erfolgt ohne die Notwendigkeit von Steckern, Kabeln oder Ladesäulen. Der Ladevorgang kann vollständig automatisiert ablaufen. In naher Zukunft ist zu erwarten, dass die meisten auf dem Markt eingeführten Elektrofahrzeuge (EVs) um Funktionen des autonomen oder assistierten Fahrens und Parkens ergänzt werden. Die Ausweitung des Anwendungsbereichs sowie die Sicherstellung einer breiten Akzeptanz von EVs bedingen eine gesetzte Fahrzeugverfügbarkeit. Diese kann jedoch nur gewährleistet werden, wenn das Aufladen der Fahrzeuge schnell, sicher und benutzerfreundlich erfolgt. Die Erfüllung dieser Anforderungen bei gleichzeitiger Gewährleistung eines hohen Maßes an Komfort für die Verbraucher stellt ein erstrebenswertes Ziel dar. Das induktive, kabellose Laden von EVs erfüllt die genannten Anforderungen und ist ein wesentlicher Bestandteil zukünftiger Mobilitätskonzepte. In den vergangenen Jahren erfolgte eine Ausweitung des Anwendungsbereichs der Wireless Power Transfer (WPT)-Technologien auf leichte und schwere Nutzfahrzeuge sowie unbemannte Luftfahrzeuge. Daher ist es erforderlich, dass drahtlose Ladesysteme mit verschiedenen Standards kompatibel sind und die Kriterien Leistung, Interoperabilität und Sicherheit erfüllen. Die Dringlichkeit des Themas wurde seitens der Städte und Gemeinden bereits erkannt. In Deutschland werden diverse Projekte gefördert bzw. befinden sich in der Förderung, um die Anforderungen an eine induktive Ladeoption für die diversen Bereiche des Mobilitätssektors zu analysieren. Der Fokus der meisten Projekte liegt auf dem Aufbau von induktiven Ladeinfrastrukturen (statische sowie dynamische).

sche Ladevorgänge) in öffentlichen Räumen für Flotten, Taxis oder Lieferfahrzeuge. Des Weiteren ist der ästhetische Aspekt für Städte von Relevanz, da die Installation von Ladesäulen nicht erforderlich ist. Stattdessen besteht die Möglichkeit, Schaltschränke unterflur zu installieren. Das Thema Sicherheit spielt eine entscheidende Rolle, insbesondere in öffentlichen Bereichen, in denen eine hohe Frequentierung von Personen zu erwarten ist. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich Objekte oder kleine Tiere auf den Ladeflächen befinden, auf öffentlichem Gelände höher als auf privatem Gelände. Dies impliziert die Notwendigkeit der Erkennung lebender Objekte (LOD) sowie von Fremdkörpern (FOD). Des Weiteren ist die Einhaltung von Expositionsgrenzwerten durch elektromagnetische Felder zur Vermeidung potenzieller gesundheitlicher sowie technischer Risiken unerlässlich. Daher müssen die Komponenten des Ladesystems nationale sowie internationale Normen erfüllen, bevor sie auf dem Automobilmarkt freigegeben werden dürfen.

1.2 Problemstellung und Herausforderungen

Die hier abzuleitenden Problemstellungen und Herausforderungen zeigen die Komplexität und die unterschiedlichen Dimensionen auf, die bei der Realisierung einer umfassenden Ladeinfrastruktur und der Implementierung von WPT-Systemen berücksichtigt werden müssen. Sie umfassen technische, politische, wirtschaftliche, soziale und gesundheitliche Aspekte, die alle miteinander verknüpft sind und eine sorgfältige sowie interdisziplinäre Herangehensweise erfordern.

1. Problemstellung und Herausforderungen bei der Entwicklung und Implementierung induktiver Ladesysteme

• Sicherheits- und Gesundheitsbedenken

Die Nutzung von WPT-Systemen wirft Sicherheits- und Gesundheitsfragen auf, die sich auf die elektromagnetische Strahlung und deren potenzielle Auswirkungen auf die Öffentlichkeit beziehen. Die Herausforderung besteht folglich darin, mögliche Risiken zu minimieren und regulatorische Anforderungen zu erfüllen, um eine breite gesellschaftliche Akzeptanz zu erreichen.

• Mess- und Simulationskonzept für elektromagnetische Felder

Eine zentrale Herausforderung bei WPT-Systemen ist die Entwicklung eines geeigneten Messkonzepts zur genauen Erfassung und Bewertung der elektromagnetischen Felder (EMF), insbesondere in öffentlichen Bereichen. Dies ist erforderlich, um die Sicherheit für Mensch und Umwelt zu

gewährleisten. Die Lösung dieser Aufgabe erfordert sowohl eine Methodik zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit als auch die Entwicklung adäquater technischer Modelle.

- **Effizienz und technologische Reife**

Die Wettbewerbsfähigkeit von WPT-Systemen gegenüber konventionellen Ladesystemen setzt voraus, dass sie sowohl effizient als auch zuverlässig sind. Die Herausforderung besteht in der Maximierung der Effizienz dieser Systeme, der Minimierung von Energieverlusten sowie der Gewährleistung einer ausreichenden Ladeleistung, um die Erwartungen der Nutzer zu erfüllen.

- **Infrastrukturkompatibilität und Aufwendungen**

Die Implementierung von WPT-Systemen bedingt eine Adaption der bestehenden Verkehrs- und Ladeinfrastruktur. Das Design der WPT-Technologie, bspw. in Form von dynamischen oder statischen Ladesystemen, übt einen maßgeblichen Einfluss auf die notwendigen infrastrukturellen Maßnahmen aus. Dynamische Ladesysteme, welche eine Energieübertragung während der Fahrt ermöglichen, erfordern signifikante Eingriffe in die Straßeninfrastruktur. Demgegenüber sind statische Systeme, die ausschließlich an fest installierten Ladepunkten arbeiten, mit einem geringeren infrastrukturellen Aufwand verbunden. Diese Unterschiede im Design wirken sich nicht nur auf die technische Komplexität der Umsetzung aus, sondern auch auf die damit verbundenen finanziellen Aufwendungen. Die zentrale Herausforderung besteht in der Entwicklung und Integration von WPT-Systemen, sodass eine kosteneffiziente Kompatibilität mit der bestehenden Verkehrs- und Ladeinfrastruktur gewährleistet wird, ohne den finanziellen Rahmen unverhältnismäßig zu belasten.

2. Problemstellung und Herausforderungen beim Ausbau der Ladeinfrastruktur

- **Technologische Vielfalt und Skalierbarkeit**

Die fortschreitende technologische Entwicklung sowie die Vielzahl an unterschiedlichen Ladetechnologien, bspw. Schnelllade- und Normalladesysteme sowie netzgebundene und netzunabhängige Lösungen, bedingen flexible und skalierbare Konzepte für den Infrastrukturausbau. Die Herausforderung besteht in der Schaffung einer Infrastruktur, die sowohl gegenwärtigen als auch zukünftigen Anforderungen gerecht wird.

- **Komplexität der Multi-Faktor-Integration**

Der Ausbau der Ladeinfrastruktur für EVs stellt nicht nur eine technologische Herausforderung dar, sondern erfordert zudem die Integration zahlreicher politischer, gesellschaftlicher und ökonomischer Fakto-

ren. Dies führt zu einer hohen Komplexität und Vielschichtigkeit in der Planung und Umsetzung.

- **Politische Rahmenbedingungen und Regulierungen**

Die divergierenden politischen Rahmenbedingungen, Förderprogramme, Regulierungen und Standards auf nationaler und internationaler Ebene erschweren die einheitliche Planung und den Ausbau der Ladeinfrastruktur. Die Herausforderung besteht in der Entwicklung konsistenter und unterstützender politischer Maßnahmen, welche den Ausbau erleichtern und beschleunigen.

- **Soziale Akzeptanz und Nutzerverhalten**

Die gesellschaftliche Akzeptanz der Ladeinfrastruktur ist maßgeblich von deren Verfügbarkeit, Zugänglichkeit und Benutzerfreundlichkeit abhängig. Eine wesentliche Herausforderung besteht darin, das Vertrauen der Nutzer zu gewinnen und etwaige Bedenken hinsichtlich der Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit der Ladestationen auszuräumen.

1.3 Wissenschaftliche Fragestellung

Die vorliegende Dissertation widmet sich zentralen Fragestellungen im Kontext der induktiven Ladeinfrastruktur sowie der damit verbundenen Sicherheits- und Akzeptanzaspekte. Dabei werden zwei übergeordnete wissenschaftliche Fragestellungen besonders in den Fokus gerückt:

- *Wie kann ein Messkonzept für induktive Ladesysteme entwickelt und wie können elektromagnetische Felder im öffentlichen Raum simuliert werden, um präzise und standardisierte Daten zur Sicherheitsbewertung zu liefern und die Akzeptanz dieser Technologien durch eine nachvollziehbare und transparente Risikoeinschätzung zu fördern?*
- *Welche technologischen, politischen und gesellschaftlichen Faktoren müssen beim Ausbau der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge berücksichtigt werden, um eine nachhaltige und effiziente Entwicklung zu gewährleisten?*

Die dargelegten Fragestellungen dienen als Grundlage für die vorliegende Forschung und definieren die wissenschaftliche Herangehensweise zur Entwicklung sicherer, effizienter und akzeptierter Lösungen für eine induktive Ladeinfrastruktur. Die Beantwortung dieser Fragen erfolgt auf Basis der in der vorgelegten Dissertation präsentierten Ergebnisse und Erkenntnisse.

1.4 Ziel der Arbeit und angewandte Methodik

Die Dissertation kombiniert theoretische, simulative und empirische Methoden, um die Herausforderungen und Chancen von WPT-Systemen und der Ladeinfrastruktur für EVs zu untersuchen. Der erste Teil widmet sich den WPT-Systemen und den damit einhergehenden Herausforderungen der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) sowie der Exposition (EMVU). Die Entwicklung und Validierung eines umfassenden Simulations- und Messkonzepts zur Bewertung von Magnetfeldern bildet hierbei die Grundlage. Ein weiteres Ziel ist die Ableitung eines Sicherheitskonzepts, das auf die strengen Richtlinien im öffentlichen Raum abgestimmt ist. Der zweite Teil adressiert die strategische Planung einer nachhaltigen Infrastruktur und die Untersuchung der sozialen Akzeptanz, basierend auf umfassenden Datenerhebungen und analytischen Methoden. Diese methodische Herangehensweise ermöglicht eine ganzheitliche Betrachtung der technologischen, infrastrukturellen und gesellschaftlichen Aspekte der Elektromobilität.

Quantitative Untersuchung von WPT-Systemen und EMF (*Kapitel 2 bis 4*)

- **Literaturrecherche:** Systematische Erfassung und Auswertung von wissenschaftlicher Literatur und Standards zu WPT-Systemen sowie EMV und EMVU, um eine fundierte Grundlage für die weiteren Analysen zu schaffen.
- **Theoretische Analyse:** Aufbereitung und Darstellung der grundlegenden technischen Konzepte und physikalischen Prinzipien, die in WPT-Systemen Anwendung finden, einschließlich der Berechnung von Leistungsübertragungseffizienzen.
- **Numerische Simulation:** Entwicklung eines Finite-Elemente-Methode (FEM)-Modells, das die realen Bedingungen eines WPT-Systems für EVs nachbildet. Dabei wurden die geometrischen und physikalischen Parameter des Systems sowie die Materialeigenschaften und Randbedingungen in einer Simulationssoftware (z. B. ANSYS Electronics Desktop) definiert.
- **Entwicklung eines Messkonzeptes:** Basierend auf den Simulationsergebnissen wird ein Messkonzept entwickelt, um die EMF im realen Umfeld statt unter Laborbedingungen zu erfassen. Dieses Konzept umfasst die Auswahl der Messbereiche, geeigneter Messgeräte, die Definition der Messpunkte sowie -höhen und die Festlegung der Messprotokolle.
- **Quantitative Methode:** Evaluierung der Messungen und der Simulationen, um die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Simulation zu validieren und die Magnetfeldverteilung unter realen Bedingungen zu bewerten.

Analyse der Ladeinfrastruktur und die Entwicklung der sozialen Akzeptanz (Kapitel 5 bis 7)

- **Strategische Analyse:** Untersuchung der Schritte zur Implementierung einer durchdachten Ladeinfrastruktur, einschließlich der Standortwahl, Kundengruppe, Ladetechnologie u. v. m.
- **Analytische Modellierung:** Verwendung eines graphentheoretischer Algorithmus von Dijkstra, um eine optimale Verteilung von WPT-Systemen auf Basis bestehender Tankstellen zu ermitteln. Die algorithmische Optimierung integriert dabei Faktoren wie die Fahrzeugreichweite, die Verfügbarkeit der Stationen sowie die Minimierung der Ladezeiten.
- **Simulative Planung:** Durchführung von Simulationen zur Veranschaulichung der Infrastrukturplanung und -optimierung basierend auf den Ergebnissen des Algorithmus und den festgelegten Kriterien.
- **Anforderungsanalyse:** Untersuchung der Anforderungen an Unterflurschränke (z. B. Platzbedarf, Kühlung, Zugänglichkeit und Witterungsbeständigkeit) und Bewertung der Funktionalität anhand eines Anwendungsszenarios.
- **Policy-Analyse:** Analyse von politischen Strategien und Maßnahmen zur Förderung der Elektromobilität, um deren Einfluss auf die Entwicklung der Ladeinfrastruktur zu bewerten.
- **Datenanalyse:** Untersuchung der sozialen Akzeptanz von EVs im Zeitraum von 2011 bis 2020 anhand zentraler Faktoren wie Energiespeicher Kosten, Ladezeiten, Reichweitenangst und sicherheitsbezogener Bedenken. Im Rahmen der Analyse erfolgt ein vergleichender Ansatz der Umfrageergebnisse aus den Jahren 2011 und 2020, um die Entwicklung der Akzeptanzdynamik und deren Einflussfaktoren über diesen Zeitraum differenziert zu bewerten.

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Dissertation ist in acht Kapitel unterteilt, welche in ihrer Gesamtheit einen in sich geschlossenen, aufeinander aufbauenden und in sich kohärenten Forschungsbeitrag darstellen. Der Forschungsbeitrag umfasst dabei zum einen die Untersuchung der WPT-Systeme für EVs, zum anderen die Analyse der Ladeinfrastruktur sowie die Untersuchung der gesellschaftlichen Akzeptanz. Die vollständige Struktur der Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt, welche eine visuelle Darstellung der Organisation bietet.

Das **Kapitel 1** dient der Einführung in die Problemstellung und die Herausforderungen im Kontext der Elektromobilität und WPT-Systeme. Es beschreibt die

wissenschaftlichen Fragestellungen, das Ziel der Arbeit, die angewendete Methodik und gibt einen Überblick über den Aufbau der Dissertation.

Im **Kapitel 2** erfolgt eine Darlegung der Grundlagen von WPT-Systeme. Das Kapitel beinhaltet eine detaillierte Darstellung des Aufbaus und des Funktionsprinzips, die Klassifizierung verschiedener Ladesysteme, internationale Standards und Normen sowie die Vorteile und Herausforderungen dieser Technologie. Des Weiteren werden aktuelle Forschungsansätze sowie Anwendungsbereiche dargelegt.

Im **Kapitel 3** werden die theoretischen Grundlagen elektromagnetischer Felder erörtert und eine Differenzierung zwischen EMV und EMVU vorgenommen. Zudem wird die Exposition durch elektromagnetische Felder untersucht, wobei auch die biologischen Effekte beleuchtet werden. Darüber hinaus werden relevante internationale Standards und Normen präsentiert.

In **Kapitel 4** erfolgt eine Evaluierung der Magnetfeldverteilung im Kontext von WPT-Systemen für EVs. Das Kapitel beinhaltet die Entwicklung eines Simulations- und Messkonzepts sowie die Auswertung der Simulations- und Messergebnisse. Im Folgenden werden Maßnahmen zum Schutz und zur Reduzierung der Magnetfelder sowie eine Bewertung der Übertragbarkeit derselben präsentiert.

Kapitel 5 widmet sich der Implementierung einer nachhaltigen Ladeinfrastruktur für EVs. Im Folgenden erfolgt eine Analyse der internationalen Perspektiven, der Standortwahl, der Zielgruppen sowie der verfügbaren Ladetechnologien. Des Weiteren werden Aspekte der Zahlungsabwicklung, der Backend-Lösungen sowie der Planung und des Baus im öffentlichen Raum erörtert.

In **Kapitel 6** erfolgt eine Analyse der Integration von WPT-Systemen unter Zuhilfenahme szenariobasierter Ansätze. Im Rahmen der Untersuchung erfolgt eine Analyse der Verteilung von Ladestationen unter Verwendung des Dijkstra-Algorithmus, eine ökonomische Bewertung der Umstellung auf WPT-Systeme sowie eine Nutzbarkeitsuntersuchung für Unterflurschränke.

Kapitel 7 legt die strategischen Weichenstellungen im Bereich Energie, Elektromobilität und Politik dar. Dies umfasst die Förderung erneuerbarer Energien (EE), den Ausbau der Ladeinfrastruktur, Forschung und Entwicklung sowie die Schaffung eines unterstützenden politischen Umfelds. Des Weiteren wird die Entwicklung der sozialen Akzeptanz in Bezug auf verschiedene Einflussfaktoren, darunter die Kosten für Energiespeicher sowie Sicherheitsbedenken untersucht.

In **Kapitel 8** erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse der Dissertation, eine Diskussion des wissenschaftlichen Beitrags sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Entwicklungsfelder im Bereich der WPT-Systeme und der nachhaltigen Ladeinfrastruktur.

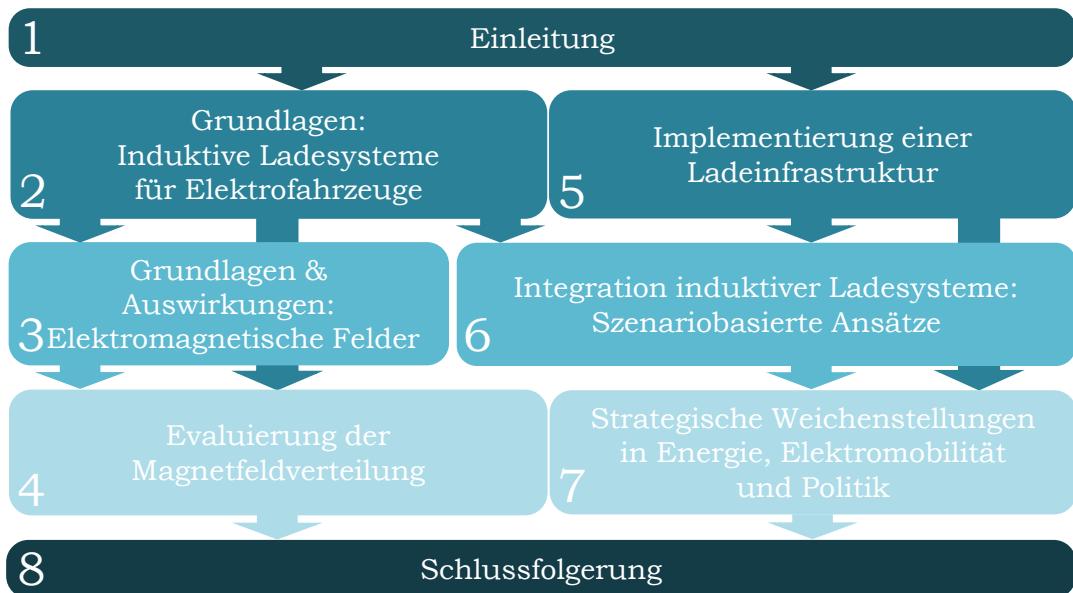


Abbildung 1.2: Aufbau und Gliederung der Dissertation.

2 Grundlagen: Induktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine detaillierte Betrachtung der grundlegenden Aspekte von WPT-Systemen für EVs. Zunächst werden die WPT-Systeme klassifiziert, um ein grundlegendes Verständnis für die verschiedenen Technologien und ihre jeweiligen Einsatzbereiche zu entwickeln. Im Anschluss werden Aufbau und Funktionsprinzipien solcher Systeme erläutert. Dabei werden sowohl die elektrische Leistung, als auch die wichtigsten Designparameter ausführlich besprochen. Im weiteren Verlauf des Kapitels erfolgt eine Untersuchung internationaler Standards und Normen, welche für die Implementierung und den Betrieb von WPT-Systemen von zentraler Bedeutung sind. Im Anschluss werden die Vorzüge und Problematiken dieser Technologie sowie der gegenwärtige Stand der Technik und Forschung dargelegt. Abschließend werden ein Überblick über die verschiedenen Ladekonzepte und Anwendungsbereiche gegeben sowie die diversen Einsatzmöglichkeiten und praktischen Umsetzungen von WPT-Systemen in der heutigen Zeit beleuchtet. Dieses Kapitel liefert folglich eine umfassende Grundlage für das Verständnis und die weiterführende Untersuchung von WPT-Systemen für EVs.

2.1 Klassifizierung von induktiven Ladesystemen

Die Technologie des induktiven Ladens erlaubt die Übertragung elektrischer Energie von einer Quelle (dem Sender), welche in der Regel mit Wechselstrom (AC) bei einer Frequenz f betrieben wird, zu einem Gerät (dem Empfänger) ohne den Einsatz von Kabeln. Die Übertragung erfolgt stattdessen durch ein zeitlich veränderliches elektromagnetisches Feld. Der Empfänger entnimmt dem elektromagnetischen Feld Energie und leitet sie an eine Last weiter, welche in der Regel eine Batterie ist. Der Begriff „Reichweite“ wird üblicherweise verwendet, um den Abstand zwischen Sender und Empfänger zu beschreiben. In zahlreichen Anwendungsbereichen, insbesondere im Kontext der Mobilität, befinden sich Sender und Empfänger in einem Abstand

voneinander, der durch die Luft hindurch verläuft. In diesem Zusammenhang wird der Begriff „Luftspalt“ verwendet. In anderen Fällen kann das Medium zwischen den beiden Geräten aus biologischen Geweben z. B. bei implantierbaren medizinischen Geräten [6], aus Boden bei unterirdischen drahtlosen Geräten [7] oder aus Wasser bei Unterwassergeräten [8] bestehen.

Die Klassifizierung von induktiven Ladesystemen kann auf Grundlage verschiedener Faktoren erfolgen, wobei insbesondere die Kriterien Leistung, Reichweite, Frequenz und Technologie zu nennen sind. In Abhängigkeit von der Übertragungsfrequenz f sowie der entsprechenden Wellenlänge λ lässt sich eine Unterteilung in zwei Hauptkategorien vornehmen, die sich im Betriebsmodus unterscheiden:

- Nahfeld: $d \ll \lambda$,
- Fernfeld: $d \gg \lambda$.

In diesem Zusammenhang kann d als Abstand betrachtet werden. Im Nahfeldbetrieb erfolgt die Energieübertragung über relativ kurze Distanzen mittels magnetischer Felder durch induktive Kopplung (auch als magnetische Kopplung bezeichnet) oder elektrischer Felder durch kapazitive Kopplung (auch elektrische Kopplung genannt). Unter resonanten Bedingungen führt die Anwendung der genannten Kopplungsmethoden zu einer Steigerung der Effizienz der Energieübertragung. Diese Verfahren werden in der Literatur als magnetische Resonanzkopplung (Magnetic Resonant Coupling, MRC) bzw. kapazitive Resonanzkopplung (Capacitive Resonant Coupling, CRC) bezeichnet.

In Bezugnahme auf die induktiven Technologien ist im Fernfeldbetrieb eine Unterteilung in die drei Kategorien Hochfrequenz (Radio Frequency, RF), Mikrowelle (MW) und Optik zu nennen.

Die zu übertragende Leistung sowie der Abstand zwischen Sender und Empfänger stellen die wesentlichen Parameter dar, auf deren Grundlage die am besten geeignete Ladetechnologie für eine spezifische Anwendung ausgewählt wird. Die in Abbildung 2.1 dargestellten Leistungskennzahlen der verschiedenen Ladetechnologien umfassen das Leistungsniveau, die Distanz und die Frequenz [9].

Die MRC-Technologie stellt gegenwärtig die populärste Lösung für das induktive Laden von Elektrofahrzeugen dar. Dies ist auf ihr hohes Effizienzniveau, das nahezu dem einer kabelgebundenen Verbindung entspricht, sowie ihre ausgezeichnete Toleranz gegenüber einer potenziellen Spulenfehlanordnung zurückzuführen [10–12]. Zudem können etwaige Probleme im Zusammenhang mit der elektromagnetischen Verträglichkeit durch den Einsatz geeigneter Feldminderungstechniken [13] und die hohe Sensibilität von metallischen Fremdkörpern zwischen Sender und Empfänger

kann durch eine entsprechende FOD detektiert werden [14, 15]. Daher wird im weiteren Verlauf dieser Dissertation die magnetische Resonanzkopplung als bevorzugte Technologie verwendet.

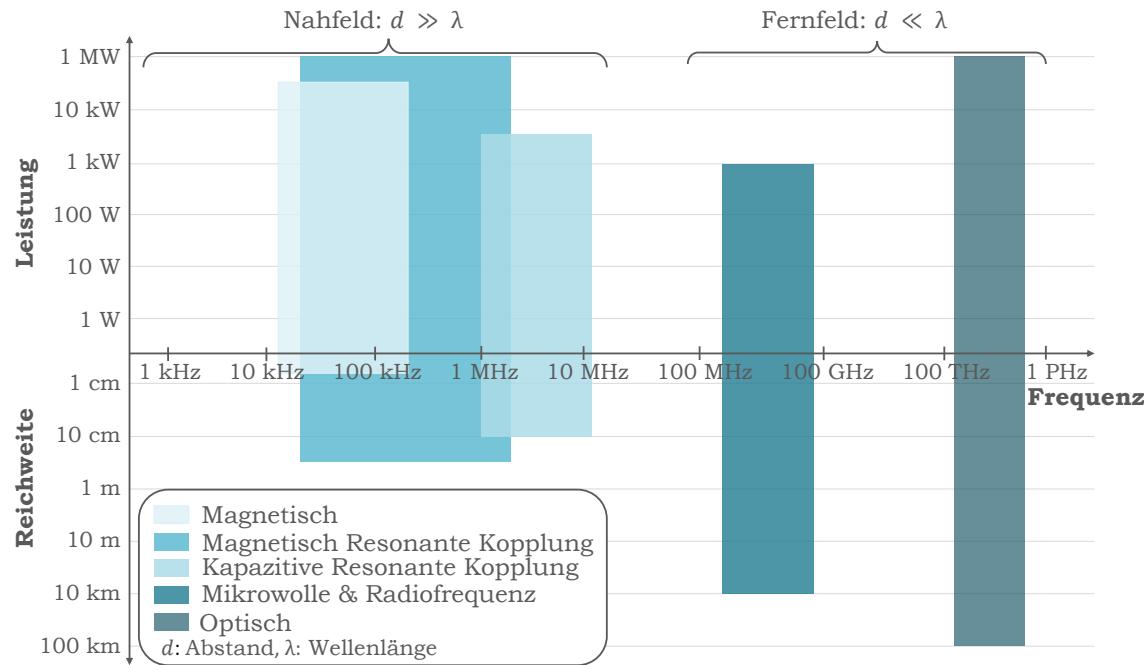


Abbildung 2.1: Einordnung der WPT-Technologien in Bezug auf Leistung, Frequenz und Reichweite (Datenquelle: [9]).

2.2 Aufbau und Funktionsprinzip

Die elektromagnetische Induktion stellt das fundamentale physikalische Prinzip dar, das der induktiven Energieübertragung zugrunde liegt. Sie beschreibt das Phänomen der Induktion einer elektrischen Spannung in einem Leiter durch ein zeitlich veränderliches Magnetfeld. Erstmals entdeckt wurde dieses Prinzip im Jahr 1831 durch Michael Faraday und ist seitdem als Faradaysches Induktionsgesetz bekannt.

Mathematisch kann das Faradaysche Induktionsgesetz durch folgende Gleichung ausgedrückt werden:

$$U_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

wobei U_{ind} die induzierte Spannung (in V), Φ der magnetische Fluss (in Wb) ist und $\frac{d\Phi}{dt}$ die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses darstellt.

In einem WPT-System wird die Senderspule von einem Wechselstrom mit einer Frequenz f (in Hz) durchflossen, der ein sich änderndes Magnetfeld erzeugt. Dieses veränderliche Magnetfeld erzeugt in der Empfängerspule eine Spannung gemäß dem Faradayschen Induktionsgesetz. Die aus dem EMF entnommene Energie wird weiter an eine Last (bspw. eine Batterie) geleitet. Der Abstand d sowie die Materie zwischen dem Sender und Empfänger variieren je nach Anwendungsbereich. Durch die Wahl geeigneter Materialien und die präzise Abstimmung der Systemkomponenten kann die Effizienz der Energieübertragung maximiert werden. Die nachfolgende Abbildung 2.2 zeigt das Funktionsprinzip anhand eines WPT-Systems für ein EV.

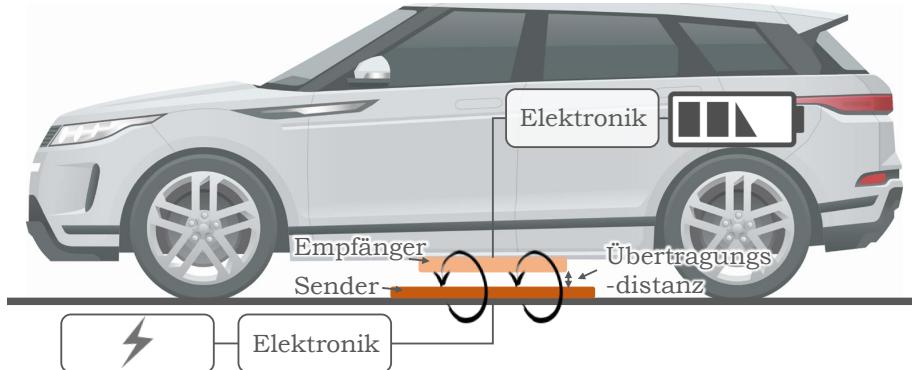


Abbildung 2.2: Funktionsprinzip eines WPT-Systems für EVs.

Eine Spule, auch als Induktivität bezeichnet, besteht aus einem Draht, der spiralförmig gewickelt ist. Bei einem elektrischen Stromfluss durch die Spule entsteht ein Magnetfeld, dessen Stärke proportional zur Stromstärke sowie der Anzahl der Windungen der Spule ist. Die magnetische Flussdichte B (in T) in der Nähe einer Spule lässt sich durch die folgende Formel beschreiben:

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l} \quad (2.2)$$

wobei μ_0 die Permeabilität des Vakuums ($4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$), μ_r die relative Permeabilität des Mediums, N die Anzahl der Windungen der Spule, I die Stromstärke (in A) und l die Länge der Spule (in m) ist.

Das Ersatzschaltbild von zweier gekoppelten Spulen im freien Raum wird durch die Selbstinduktivitäten L_p und L_s sowie die Gegeninduktivität M charakterisiert.

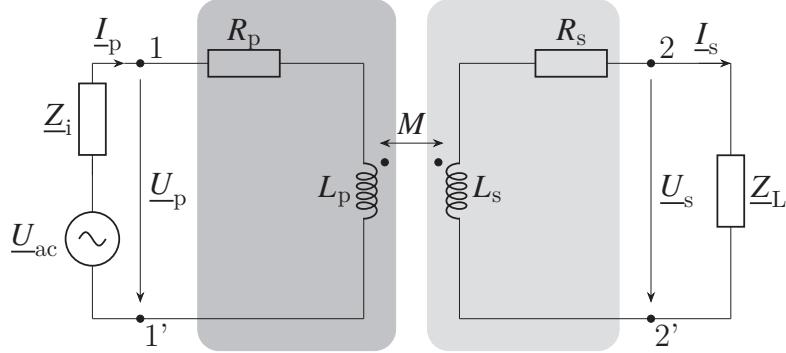


Abbildung 2.3: Ersatzschaltbild eines WPT-Systems.

Um den Betrieb eines WPT-Systems zu modellieren, wird das grundlegende Ersatzschaltbild allgemein durch eine Wechselspannungsquelle \underline{U}_{ac} mit einer internen Impedanz \underline{Z}_i gespeist und an eine Impedanzlast \underline{Z}_L angeschlossen, wie in Abbildung 2.3 gezeigt. Die Leistungsverluste in den Primär- und Sekundärspulen werden durch die Widerstände R_p und R_s modelliert. Die Spannungen und Ströme am Eingangsport (1-1') sind \underline{U}_p und \underline{I}_p , und die am Ausgangsport (2-2') \underline{U}_s und \underline{I}_s . Der Wirkungsgrad der Energieübertragung η wird wie folgt berechnet:

$$\eta = \frac{P_s}{P_p} \quad (2.3)$$

wobei $P_s = P_L$ die tatsächlich an die Last \underline{Z}_L gelieferte Leistung ist:

$$P_s = P_L = \text{real}\{\underline{U}_s \cdot \underline{I}_s^*\} = \text{real}\{\underline{Z}_L\} \cdot |\underline{I}_s|^2 \quad (2.4)$$

und P_p ist die tatsächlich verfügbare Leistung am Eingang des Primärkreises. Sie ist gegeben durch:

$$P_p = \text{real}\{\underline{U}_p \cdot \underline{I}_p^*\}. \quad (2.5)$$

Unter Zuhilfenahme des in Abbildung 2.3 dargestellten Ersatzschaltbildes lassen sich die Maschengleichungen für die Primär- und Sekundärseite wie folgt aufstellen:

$$\underline{U}_{ac} = (\underline{Z}_i + R_p + j\omega L_p) \cdot \underline{I}_p - j\omega M \underline{I}_s \quad (2.6)$$

$$0 = -j\omega M \underline{I}_p + (\underline{Z}_L + R_s + j\omega L_s) \cdot \underline{I}_s \quad (2.7)$$

Ausgehend von den Maschengleichungen lassen sich die Ströme \underline{I}_p und \underline{I}_s ableiten:

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{U}_{ac}}{(\underline{Z}_i + R_p + j\omega L_p) + \frac{\omega^2 M^2}{(\underline{Z}_L + R_s + j\omega L_s)}} \quad (2.8)$$

$$\underline{I}_s = \frac{j\omega M \underline{U}_{ac}}{(\underline{Z}_i + R_p + j\omega L_p) \cdot (\underline{Z}_L + R_s + j\omega L_s) + \omega^2 M^2} \quad (2.9)$$

Diesbezüglich sind die Spannungen \underline{U}_p und \underline{U}_s an den Eingangs- und Ausgangsports wie folgt definiert:

$$\underline{U}_p = \underline{U}_{ac} - \underline{Z}_i \cdot \underline{I}_p \quad (2.10)$$

$$\underline{U}_s = \underline{Z}_L \cdot \underline{I}_s \quad (2.11)$$

Der Kopplungskoeffizient k bezeichnet eine dimensionslose Größe, die das Ausmaß der magnetischen Kopplung zwischen zwei Spulen in einem induktiven System quantifiziert. Dabei handelt es sich um einen Parameter, der die Effizienz der Übertragung magnetischer Energie von einer Spule auf die andere beschreibt. Der Kopplungskoeffizient k lässt sich mathematisch wie folgt ausdrücken:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_p \cdot L_s}} \quad (2.12)$$

wobei M die Gegeninduktivität (in H), L_p die Selbstinduktivität der Senderspule und L_s die Selbstinduktivität der Empfängerspule ist.

Der Kopplungskoeffizient k nimmt stets Werte zwischen 0 und 1 an. Ein hoher Wert (nahe 1) lässt auf eine optimale Kopplung der Spulen schließen, was eine effiziente Übertragung der magnetischen Energie und damit eine höhere Effizienz des Ladesystems zur Folge hat. Ein niedriger Wert (nahe 0) lässt den Schluss zu, dass ein erheblicher Teil der erzeugten magnetischen Energie verloren geht, da sie die Empfängerspule nicht erreicht. In derartigen Konstellationen erfolgt die Übertragung ineffizient, was mit Energieverlusten in Form von Wärme einhergeht. Der Kopplungskoeffizient unterliegt einer Einflussnahme durch diverse Faktoren:

- **Abstand zwischen den Spulen**

So zeigt sich eine Reduktion des Kopplungskoeffizienten bei einer Vergrößerung des Abstands zwischen den Senderspulen und Empfängerspulen, da weniger magnetischer Fluss die Empfängerspule erreicht.

- **Ausrichtung der Spulen**

Eine ungünstige Ausrichtung der Spulen, bspw. wenn die Achsen der Spulen nicht aufeinander ausgerichtet sind, führt zu einer Verringerung des Kopplungskoeffizienten.

- **Geometrie der Spulen**

Die Geometrie der Spulen wirkt sich auf die Verteilung des magnetischen Feldes aus, was wiederum den Kopplungskoeffizienten beeinflusst. Spulen, die so gestaltet sind, dass sie ein stark konzentriertes Magnetfeld erzeugen und empfangen, können die Energieübertragung erheblich verbessern.

- **Materialien**

Die Materialien, die sich um und zwischen den Spulen befinden, insbesondere ferromagnetische Materialien, können den Kopplungskoeffizienten erhöhen, indem sie das Magnetfeld konzentrieren und leiten.

In Anbetracht der unzureichenden magnetischen Kopplung bei Vorhandensein eines Luftspalts sind die Leistungen eines konventionellen IPT-Systems nur als gut zu bewerten, sofern sich die Sender- und Empfängerspulen in nächster Nähe zueinander befinden. Die Leistungsfähigkeit der IPT-Technologie kann durch den Einsatz der MRC gesteigert werden, deren Funktionsweise im Folgenden erörtert wird.

Die magnetische Resonanzkopplung stellt eine bedeutsame Weiterentwicklung der traditionellen IPT-Technologie dar, welche eine Vergrößerung der Reichweite, d. h. des Abstands zwischen der Senderspule und der Empfängerspule, ermöglicht [10, 11, 16]. Die zugrundeliegende Idee besteht darin, den magnetischen Fluss gemäß dem Faradayschen Gesetz durch eine Erhöhung der in den Spulen fließenden Ströme zu steigern. Dies ist möglich, indem die Impedanz der Spulen, die von Natur aus eine beträchtliche Selbstinduktivität aufweisen, minimiert wird. Es sei darauf hingewiesen, dass bei der Betriebsfrequenz die Reaktanz $X_L = \omega L$ viel größer ist als der Widerstand R . Induktivitäten werden in der Praxis typischerweise so ausgelegt, dass sie den Gütefaktor Q maximieren, der wie folgt definiert ist [17]:

$$Q = \frac{\text{Blindleistung}}{\text{Wirkleistung}} = \frac{X_L}{R} = \frac{\omega L}{R} \quad (2.13)$$

Um die Impedanz Z zu minimieren, ist die Integration eines Schaltungselementes mit negativer Reaktanz, wie bspw. einer Kapazität C , erforderlich. In der vorliegenden Untersuchung wird eine Kapazität C in Reihe mit der Induktivität betrachtet,

obwohl dies nicht der einzige Weg ist, Resonanzbedingungen zu erreichen. Auch andere Verbindungen, bspw. eine parallele, könnten dasselbe Ziel verfolgen [18, 19] (siehe Kapitel 2.2.2). Durch das Einfügen einer Kapazität C in Reihe wird die Spulenimpedanz wie folgt modifiziert:

$$\underline{Z} = R + j(X_L + X_C) = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (2.14)$$

Eine vollständige Kompensation der induktiven Reaktanz ist nur gegeben, wenn die Gesamtreaktanz X den Wert null annimmt.

$$X = X_L + X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0 \quad (2.15)$$

Die Resonanzfrequenz bezeichnet die Frequenz, bei der die Induktivität der Spulen und die Kapazität der Schaltung in optimaler Weise zusammenwirken, um eine maximale Energieübertragung zu ermöglichen. Die Berechnung der Resonanzfrequenz f_0 erfolgt gemäß der folgenden Formel:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.16)$$

Eine Minimierung der Impedanz führt zu einer Maximierung des Spulenstroms, welcher als Quelle des Magnetfeldes dient und folglich zu einer Maximierung des magnetischen Flusses führt. Eine vollständige Kompensation der Reaktanz der Sender- und Empfängerspulen ist erforderlich, um Resonanz und damit ein MRC-System zu erreichen. Es sei darauf hingewiesen, dass in der technischen Literatur ein MRC-System mitunter auch als IPT-System oder unter anderen Namen oder Akronymen bezeichnet wird. In der Regel erfolgt eine separate Kompensation der primären und sekundären Spulen mit zusätzlichen Kapazitäten. Eine vollständige Kompensation erfordert eine Null-Reaktanz im Primärkreis unter Berücksichtigung der Reaktanz der Quellimpedanz \underline{Z}_i und eine Null-Reaktanz im Sekundärkreis unter Berücksichtigung der Reaktanz der Lastimpedanz \underline{Z}_L . Es ist empfehlenswert, Resonanz bei derselben Frequenz f_0 auf beiden Seiten des Stromkreises zu erreichen. Die Seriell-Seriell (S/S)-Kompensationstopologie wird durch das Hinzufügen einer Kapazität in Serie zu den primären und sekundären Spulen gemäß dem in Abbildung 2.4 gezeigten Ersatzschaltbild erreicht. Die vorliegende Schaltung modelliert lediglich die elektromagnetische Kopplungsstufe, welche in der Regel bei einer relativ hohen Frequenz auftritt. Aufgrund dessen wird sie als Hochfrequenzschaltung bezeichnet, da f viel größer ist als die Netzfrequenz (50 Hz/ 60 Hz). In Hochleistungsanwendungen,

bspw. im Automobilbereich, liegt die Betriebsfrequenz in der Regel im Bereich von einigen Kilohertz bis zu einigen Megahertz.

Die Kapazitäten C_p und C_s der S/S-Kompensation ergeben sich aus folgenden Gleichungen (siehe Kapitel 2.2.2):

$$C_{p,s} = \frac{1}{\omega_0^2 L_{p,s}} \quad (2.17)$$

Die Berechnung der Gesamtempedanzen der Primärseite $\underline{Z}_{p,ges}$ und Sekundärseite $\underline{Z}_{s,ges}$ erfolgt gemäß der Formeln:

$$\underline{Z}_p = \underline{Z}_i + R_p + j\omega L_p - j\frac{1}{\omega C_p} \quad (2.18)$$

$$\underline{Z}_s = \underline{Z}_L + R_s + j\omega L_s - j\frac{1}{\omega C_s} \quad (2.19)$$

Die Ströme \underline{I}_p und \underline{I}_s lassen sich angeben als:

$$\underline{I}_p = \frac{\underline{Z}_s}{\underline{Z}_p \underline{Z}_s + \omega^2 M^2} \underline{U}_{ac} \quad (2.20)$$

$$\underline{I}_s = \frac{j\omega M}{\underline{Z}_p \underline{Z}_s + \omega^2 M^2} \underline{U}_{ac} \quad (2.21)$$

Die an den Eingangs- bzw. Ausgangsanschlüssen messbaren Spannungen \underline{U}_p und \underline{U}_s werden durch die folgenden Gleichungen beschrieben:

$$\underline{U}_p = \left(1 - \frac{\underline{Z}_i \underline{Z}_s}{\underline{Z}_p \underline{Z}_s + \omega^2 M^2} \right) \underline{U}_{ac} \quad (2.22)$$

$$\underline{U}_s = \frac{j\omega M \underline{Z}_L}{\underline{Z}_p \underline{Z}_s + \omega^2 M^2} \underline{U}_{ac} \quad (2.23)$$

Die durch Gleichung definierte Eingangsimpedanz am Anschluss 1-1' lässt sich mittels der in Abbildung 2.4 b) dargestellten Schaltung abbilden.

$$\underline{Z}_{1-1'} = \frac{\underline{U}_p}{\underline{I}_p} = \underline{Z}_p - \underline{Z}_i + \frac{\omega^2 M^2}{\underline{Z}_s} = \underline{Z}_p - \underline{Z}_i + \underline{Z}_r \quad (2.24)$$

Die Impedanz \underline{Z}_r , welche von der Sekundär- zur Primärseite reflektiert wird, lässt sich gemäß folgender Gleichung berechnen:

$$\underline{Z}_r = \frac{\omega^2 M^2}{\underline{Z}_s} \quad (2.25)$$

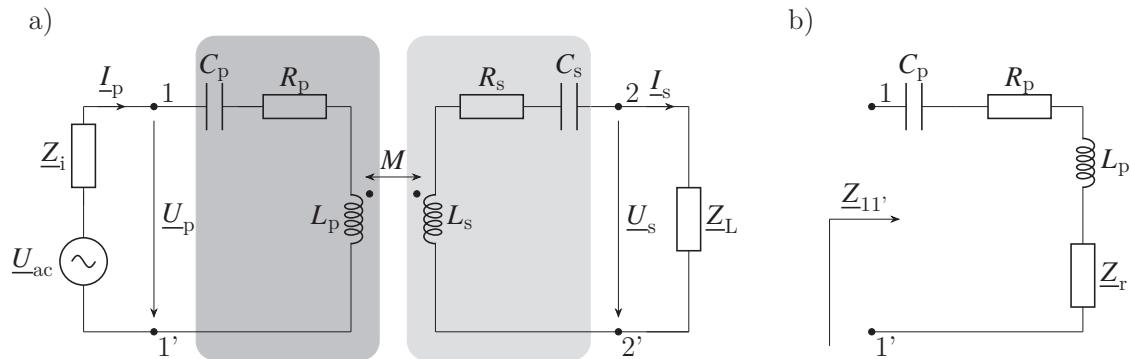


Abbildung 2.4: a) Ersatzschaltbild eines MRC-Systems mit S/S-Kompensation und b) die reflektierte Impedanz.

Die durch die Gleichungen 2.18 und 2.19 gegebenen Gesamtmpedanzen von Primär- und Sekundärkreis werden bei der Resonanzfrequenz $\omega = \omega_0$ rein ohmsch:

$$\underline{Z}_p(\omega_0) = R_i + R_p \quad (2.26)$$

$$\underline{Z}_s(\omega_0) = R_L + R_s \quad (2.27)$$

Es sei darauf verwiesen, dass bei einer Resonanzsituation die Größen $\underline{Z}_i = R_i$ und $\underline{Z}_L = R_L$ als potenzielle Reaktanzen betrachtet werden können, welche durch Kapazitäten kompensiert werden können.

Die Ströme \underline{I}_p und \underline{I}_s bei Resonanz lassen sich aus den Gleichungen 2.20 und 2.21 sowie den Gleichungen 2.26 und 2.27 ableiten.

$$\underline{I}_p(\omega_0) = \frac{(R_L + R_s)}{(R_i + R_p)(R_L + R_s) + \omega_0^2 M^2} \underline{U}_{ac} \quad (2.28)$$

$$\underline{I}_s(\omega_0) = \frac{j\omega_0 M}{(R_i + R_p)(R_L + R_s) + \omega_0^2 M^2} \underline{U}_{ac} \quad (2.29)$$

Die an den Eingangs- bzw. Ausgangsanschlüssen messbaren Spannungen \underline{U}_p und \underline{U}_s lassen sich wie folgt berechnen:

$$\underline{U}_p(\omega_0) = \left(1 - \frac{R_i(R_L + R_s)}{(R_i + R_p)(R_L + R_s) + \omega_0^2 M^2} \right) \underline{U}_{ac} \quad (2.30)$$

$$\underline{U}_s(\omega_0) = \frac{j\omega_0 M R_L}{(R_i + R_p)(R_L + R_s) + \omega_0^2 M^2} \underline{U}_{ac} \quad (2.31)$$

Die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{1-1'}$ am Anschluss 1-1' ergibt sich gemäß den Gleichungen 2.28 und 2.30:

$$\underline{Z}_{1-1'}(\omega_0) = R_p + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L + R_s} = R_p + \underline{Z}_r(\omega_0) \quad (2.32)$$

wobei die Impedanz \underline{Z}_r , die von der Sekundär- zur Primärseite reflektiert wird, durch

$$\underline{Z}_r(\omega_0) = \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L + R_s} \quad (2.33)$$

gegeben ist.

Es sei darauf verwiesen, dass bei Resonanz sowohl die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{1-1'}$ als auch die reflektierte Impedanz \underline{Z}_r für die S/S-Kompensation rein ohmsch sind.

Der Wirkungsgrad η der Leistungsübertragung lässt sich gemäß folgender Formel bestimmen:

$$\eta(\omega_0) = \frac{P_s(\omega_0)}{P_p(\omega_0)} = \frac{\omega_0^2 M^2 R_L}{\left(R_p + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_L + R_s} \right) (R_L + R_s)^2} = \frac{1}{1 + \frac{R_s}{R_L} + \frac{R_p(R_L + R_s)^2}{\omega_0^2 M^2 R_L}} \quad (2.34)$$

2.2.1 Leistung

Die Bewertung der Leistung eines induktiven Ladesystems erfolgt in erster Linie anhand des Wirkungsgrads sowie der an die Last abgegebenen Leistung. Der Wert des optimalen Lastwiderstands $R_{L, \text{opt}}$, der die maximale Effizienz η_{max} bei Resonanz liefert, wird durch die Lösung der folgenden Gleichungen bestimmt:

$$R_{L, \text{opt}} = R_s \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_p R_s}} \quad (2.35)$$

Unter Berücksichtigung der Resonanz ergibt sich für die maximale Effizienz:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\frac{\omega_0^2 M^2}{R_p R_s}}{\left(1 + \sqrt{1 + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_p R_s}}\right)^2} \quad (2.36)$$

Die Einführung der Gütefaktoren Q_p und Q_s für die Primär- und Sekundärspulen gemäß Gleichung 2.13 resultiert in einer maximalen Effizienz η_{max} bei Resonanz, die durch folgende Formel beschrieben werden kann [20]:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{k^2 Q_p Q_s}{(1 + \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s})} \quad (2.37)$$

und dementsprechend ergibt sich für den optimalen Lastwiderstand $R_{L, \text{opt}}$:

$$R_{L, \text{opt}} = R_s \sqrt{1 + k^2 Q_p Q_s} \quad (2.38)$$

$$FOM = k^2 Q_p Q_s \quad (2.39)$$

Eine Effizienz-Optimierung durch Vergrößerung von $k^2 Q_p Q_s$ ist möglich. Die Leistungskennzahl (figure of merit, FOM) auf Basis der induktiven Kopplung kann durch Vergrößerung des Kopplungskoeffizienten k , der Kreisfrequenz ω , der Selbstinduktivitäten L_p und L_s sowie durch Verringerung der Verluste (Widerstände R_p und R_s) erhöht werden.

Die maximale an die Last gelieferte Leistung $P_{s, \text{max}}$ und der entsprechende Lastwiderstand $R_{L, \text{max}}$ lassen sich wie folgt ableiten:

$$R_{L,\max} = R_s + \frac{\omega_0^2 M^2}{R_i + R_p} \quad (2.40)$$

$$P_{s,\max} = \frac{\omega_0^2 M^2 U_{ac}^2}{4(R_s(R_i + R_p) + \omega_0^2 M^2)(R_i + R_p)} \quad (2.41)$$

2.2.2 Kompensation

Unter Kompensation bei WPT-Systemen wird die Verwendung zusätzlicher Schaltungselemente, in der Regel Kapazitäten, verstanden, welche die induktive Reaktanz der Spulen im System vollständig ausgleichen und die Resonanz erreichen soll [18, 21, 22]. Die Kompensation verfolgt das Ziel, die Effizienz der Energieübertragung zwischen der Primär- und Sekundärspule zu optimieren.

Die Resonanz kann durch verschiedene Topologien erreicht werden. Bspw. kann eine Kapazität parallel zu der Induktivität (Sender bzw. Empfänger) geschaltet werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, auf komplexere Kompensationstopologien zurückzugreifen, welche auf der Verwendung einer Kombination von reaktiven Elementen, wie bspw. Induktivitäten und Kapazitäten, in unterschiedlichen Konfigurationen basieren.

Im Rahmen dieser Dissertation erfolgt eine Fokussierung auf Kompensationstopologien, welche auf der Verwendung einer einzelnen kapazitiven Komponente basieren. In diesem Fall manifestiert sich bei Anregung der Schaltung durch eine Spannungsquelle eine einfache Resonanz, die als mono-resonante Schaltung bezeichnet wird. Dies impliziert, dass lediglich eine Resonanzfrequenz in der betrachteten Schaltung (primär oder sekundär) existiert und die Resonanz durch den Einsatz lediglich einer Kapazität pro Seite erreicht werden kann. Es besteht die Möglichkeit, die Kapazität in Reihe oder parallel zur Induktivität (Sender bzw. Empfänger) zu schalten. Das Kompensationsschema, welches auf der Verwendung von zwei Kapazitäten (einem auf der Primärseite und einem auf der Sekundärseite) basiert, stellt die einfachste Topologie zur separaten Kompensation der induktiven Reaktanz der beiden Spulen dar. In Bezug auf die Herstellungskosten, die Komplexität, die Größe sowie das Gewicht erweist sich diese Lösung als außerordentlich vorteilhaft [23, 24]. Es stehen vier grundlegende mono-resonante Kompensationstopologien zur Verfügung, wie in Abbildung 2.5 dargestellt [19]: Seriell-Seriell (S/S), Seriell-Parallel (S/P), Parallel-Seriell (P/S) und Parallel-Parallel (P/P).

In jeder Kompensationstopologie wird der Begriff „Seriell“ oder „Parallel“ in Bezug auf eine Kapazität verwendet, die in Reihe oder parallel zur Induktivität geschaltet

ist. Der erste Buchstabe gibt die Verbindung an, die für die Primärspule verwendet wird, während der zweite Buchstabe für die Sekundärspule gilt. In diesem Zusammenhang sei auf die S/S-Topologie verwiesen: Kapazität C_p ist mit der Primärspule und C_s mit der Sekundärspule in Reihe geschaltet. Die schematische Anordnung ist in Abbildung 2.5 a) dargestellt.

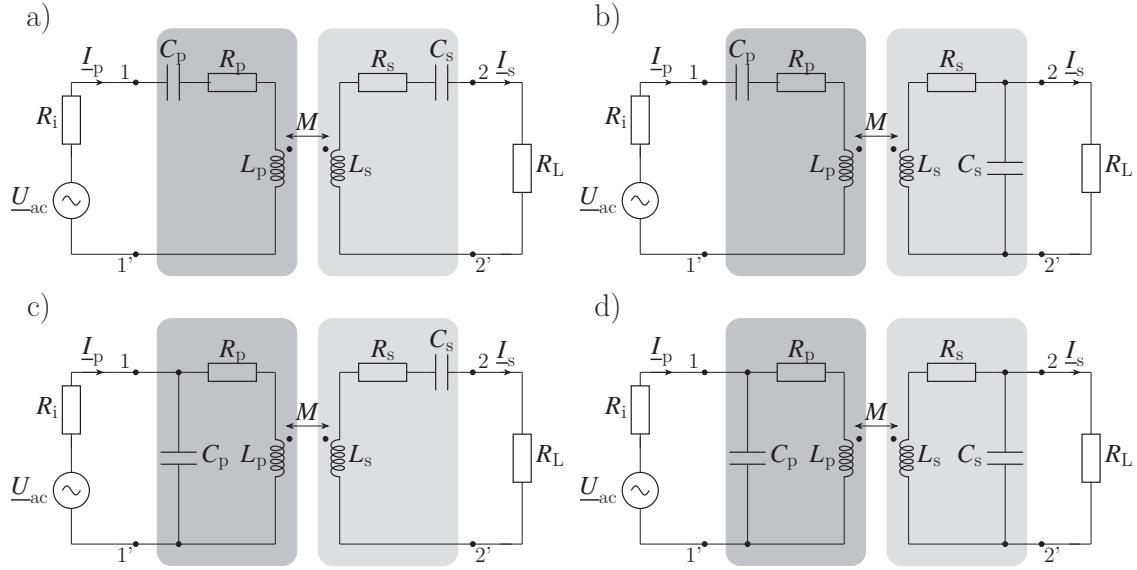


Abbildung 2.5: Kompensationstopologien: a) Seriell-Seriell, b) Seriell-Parallel, c) Parallel-Seriell, d) Parallel-Parallel.

Die in Tabelle 2.1 dargestellten Formeln dienen der Berechnung der Kapazitäten C_p und C_s für jede Kompensationstopologie bei Resonanz [19]. Es lässt sich erkennen, dass die Werte von C_p und C_s von den Selbstinduktivitäten, den Gegeninduktivitäten sowie der Last R_L abhängig sind.

In Bezug auf die Auslegung der Kompensation für eine Spule stehen verschiedene Varianten zur Verfügung. Um zu vermeiden, dass an einem Kompensationsblock die gesamte Spannung anfällt, wird zunehmend die Verwendung mehrerer Kompensationsblöcke bevorzugt. Es besteht die Möglichkeit, sowohl den Eingang als auch den Ausgang einer Spule zu kompensieren, als auch die Spule selbst in Anbetracht ihrer Induktivität aufzuteilen, sodass schließlich zwei gleich große Spulen vorliegen. In diesem Fall würde nicht nur der Eingang sowie der Ausgang mit einem Kompensationsblock versehen werden, sondern auch ein Kompensationsblock zwischen die beiden Spulenteile geschaltet werden (vgl. Abbildung 2.6). Allerdings kann dieses Verfahren nur dann zur Anwendung kommen, wenn die Induktivitäten der beiden Spulenteile übereinstimmen. Bei einer Reihenschaltung zweier unterschiedlicher Induktivitäten ist eine Berücksichtigung der Gegeninduktivität erforderlich, um eine

Tabelle 2.1. Kapazitäten für verschiedene Kompensationstopologien.

Abk.	Topologie	Primärseite	Sekundärseite
S/S	Seriell-Seriell	$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_p}$	$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_s}$
S/P	Seriell-Parallel	$C_p = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_p \cdot (1-k^2)}$	$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_s}$
P/S	Parallel-Seriell	$C_p = \frac{L_p}{\left(\frac{\omega_0^2 \cdot M^2}{R_L}\right)^2 + \omega_0^2 \cdot L_p^2}$	$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_s}$
P/P	Parallel-Parallel	$C_p = \frac{L_p \cdot (1-k^2)}{\left(\frac{R_L \cdot M^2}{L_s^2}\right)^2 + \omega_0^2 \cdot L_p^2 \cdot (1-k^2)^2}$	$C_s = \frac{1}{\omega_0^2 \cdot L_s}$

Kompensation zu ermöglichen. Zu diesem Zweck wird von der betroffenen Spule (ohne Gegenspule) eine Leerlauf- und Kurzschlussmessung zur Bestimmung der Induktivitäten der unterschiedlichen Wicklungen vorgenommen (z. B. LCR-Meter). Auf Basis der hierbei ermittelten Werte kann die Gegeninduktivität berechnet und ebenfalls kompensiert werden.

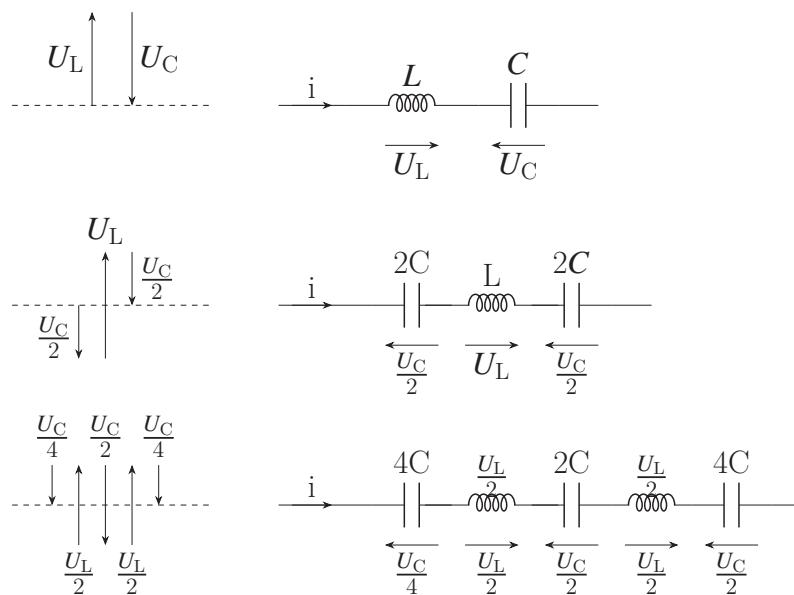


Abbildung 2.6: Blindspannung an den Komponenten bei serieller Kompensation.

2.2.3 Leistungselektronik

Die beiden gekoppelten und resonanten Spulen, die in den vorigen Abschnitten erörtert und durch die Schaltung in Abbildung 2.5 a) modelliert wurden, stellen zweifelsfrei das Schlüsselement für das WPT-System dar. Allerdings repräsentieren sie nur die Hochfrequenzstufe eines WPT-Systems, welches auf resonanter induktiver Kopplung basiert und im Weiteren als „resonanter Koppler“ bezeichnet wird. Dabei erfolgt eine Betrachtung des Teils der Schaltung, der sich vor sowie nach dem resonanten Koppler befindet. Ein detailliertes WPT-System ist in Abbildung 2.7 dargestellt, welches aus drei in Serie geschalteten Blöcken besteht [25]:

1. Ansteuerstufe (Driving Stage, DS)

Die elektronische Schaltung stromaufwärts des resonanten Kopplers,

2. Resonanter Koppler (Resonant Coupler, RC)

Die gekoppelten Spulen mit Kompensationsschaltungen,

3. Empfangsstufe (Receiving Stage, RS)

Die elektronische Schaltungen stromabwärts des resonanten Kopplers.

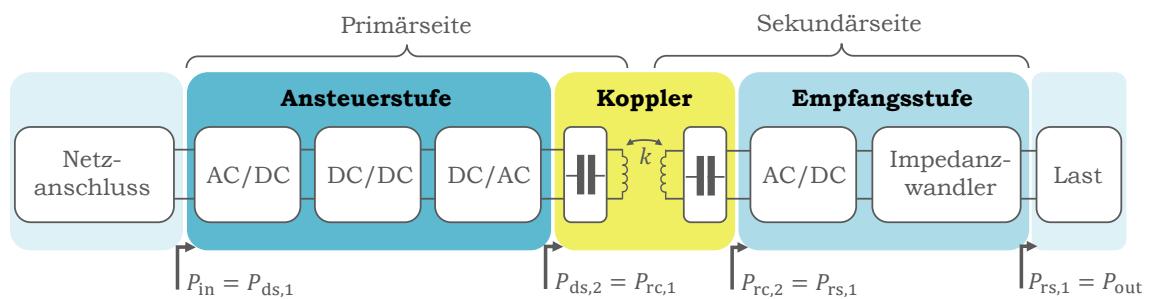


Abbildung 2.7: Blockdiagramm eines WPT-Systems mit den Ansteuer- und Empfangsstufen sowie den entsprechenden Wirkungsgraden.

Die einzelnen Blöcke weisen jeweils Leistungsverluste auf, sodass sich die Gesamteffizienz η_{ges} wie folgt definieren lässt:

$$\eta_{\text{ges}} = \frac{P_{\text{in}}}{P_{\text{out}}} = \frac{P_{\text{rs},2}}{P_{\text{ds},1}} \quad (2.42)$$

wobei P_{in} die Eingangs- und P_{out} die Ausgangsleistung des Gesamtsystems ist. Die Effizienz der leistungselektronischen Schaltungen in den Ansteuer- und Empfangsblöcken wird durch die Parameter η_{ds} und η_{rs} beschrieben, während η_{rc} die Energieübertragungseffizienz des resonanten Kopplers definiert.

Die Ansteuerstufe ist so aufgebaut, dass sie eine hohe Leistung bei hoher Frequenz an den Eingang des resonanten Kopplers liefert. Sie setzt sich aus mehreren zentralen Komponenten zusammen. Der AC/DC-Wandler übernimmt die Gleichrichtung der sinusförmigen Wechselspannung der Netzstromversorgung bei einer niedrigen Frequenz von 50 Hz. Anschließend erfolgt durch den DC/DC-Wandler die Anpassung der Spannung. Zuletzt stellt der DC/AC-Wandler die Hochfrequenzleistung zur Betriebsfrequenz bereit, die dann an den Eingang der kompensierten Primärspule weitergeleitet wird. Die Empfangsstufe besteht aus zwei Hauptkomponenten: Der AC/DC-Wandler übernimmt die Gleichrichtung der Hochfrequenzleistung, während der Impedanzwandler für die Anpassung der Last sorgt.

Im Folgenden werden diejenigen Konverter beschrieben, welche die größte Bedeutung innerhalb der Anwendung von WPT-Systemen haben.

DC/AC-Wandler (Wechselrichter)

In Bezug auf die Hochfrequenzstufe besteht die Möglichkeit, verschiedene Konfigurationen zu nutzen [26, 27]. In der Automobilindustrie findet häufig die Vollbrückenarchitektur Anwendung, welche aus vier leistungselektronischen Schaltern besteht (siehe Abbildung 2.8) [28]. Die Schalter arbeiten paarweise gegensätzlich, d. h. wenn M_1 und M_4 geschlossen sind, sind M_2 und M_3 geöffnet und umgekehrt. Die Eingangsgleichspannung wird als V_{in} bezeichnet, während die Ausgangsspannung als U_{out} eine rechteckförmige Wellenform mit der Betriebsfrequenz des resonanten Kopplers aufweist. Die Grundharmonische der Ausgangsspannung lässt sich durch folgende Formel beschreiben:

$$U_{out} = \frac{4}{\pi\sqrt{2}} \cdot U_{in} \quad (2.43)$$

Die Ausgangsspannung U_{out} lässt sich durch die Eingangsgleichspannung U_{in} linear steuern. Bei derartigen Anwendungen finden sich in der Praxis häufig MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistors) und IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistors) als Schaltkomponenten. Die Auswahl erfolgt in Abhängigkeit von der Leistungsstufe, dem Stromniveau, der Frequenz sowie weiteren Designparametern.

AC/DC-Wandler (Gleichrichter)

Die Umwandlung von Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC) kann mittels verschiedener Gleichrichtertopologien erfolgen. Eine gängige und effiziente Variante ist der Brückengleichrichter, der vier Dioden in einer Konfiguration verwendet, die bei

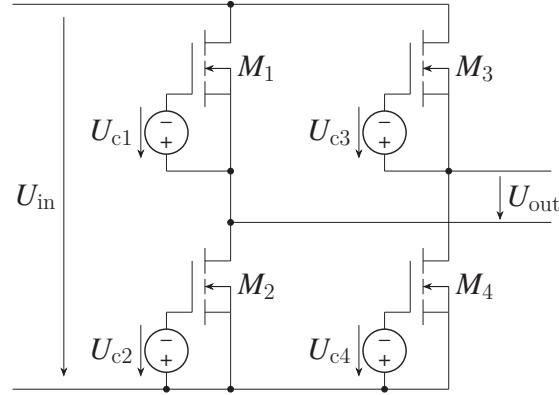


Abbildung 2.8: Ersatzschaltbild eines Vollbrückenwechselrichters.

beiden Polaritäten des Eingangs dieselbe Ausgangspolarität liefert. Dies ermöglicht eine Vollwellen-Gleichrichtung und führt zu einer Kosten- und Gewichtserspartis [29]. In Abbildung 2.9 findet sich eine grafische Darstellung eines Brückengleichrichters. Weitere fortgeschrittene Techniken nutzen aktive Gleichrichter [30].

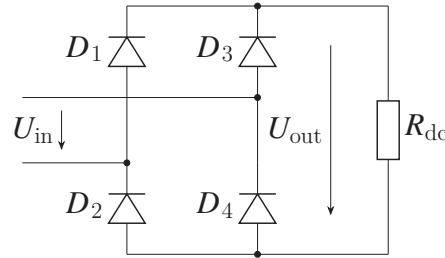


Abbildung 2.9: Ersatzschaltbild eines Brückengleichrichters.

Die Gleichstromkomponente U_{out} der Ausgangsspannung $u_{\text{out}}(t)$ lässt sich wie folgt beschreiben:

$$U_{\text{out}} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{\text{in}} \quad (2.44)$$

wobei der Effektivwert U_{in} der harmonischen Eingangswechselspannung $u_{\text{in}}(t)$ ist. Um die Restwelligkeit auf der DC-Last R_{dc} zu reduzieren, wird in der Praxis eine große Kapazität C parallel zur Last geschaltet [31].

In einem vereinfachten Modell wird die Elektronik nach der Empfangsspule als Widerstandslast R_L dargestellt, die sich über die Eingangsimpedanz des Gleichrichters ausdrücken lässt.

Der äquivalente Wechselstromwiderstand R_L lässt sich wie folgt berechnen:

$$R_L = \frac{\pi^2}{8} \cdot R_{dc} \quad (2.45)$$

Im Falle einer Batterie, deren Last durch die Parameter $U_{bat} = U_{out}$ und $I_{bat} = I_{out}$ charakterisiert ist, lässt sich die äquivalente AC-Last durch Gleichsetzung der Batterieleistung mit der Leistung in der äquivalenten Widerstandslast R_L berechnen. Die resultierende Gleichung hat folgende Formel:

$$R_L \cdot I_L^2 = U_{bat} \cdot I_{bat} \quad (2.46)$$

In Bezug auf eine Spannungsquelle (U_{bat} konstant, I_{bat} variabel) lässt sich festhalten, dass R_L durch die dargestellte Gleichung 2.45 definiert ist. Bei einer Stromquelle (U_{bat} variabel, I_{bat} konstant) ergibt sich:

$$R_L = \frac{8}{\pi^2} \cdot R_{dc} \quad (2.47)$$

In diesem Kontext besteht eine Abhängigkeit zwischen dem Ausgangstrom und dem Wechselstrom gemäß der folgenden Formel:

$$I_{out} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_L \quad (2.48)$$

Der auf der Sendeseite befindliche Gleichrichter arbeitet mit Netzfrequenz, sodass die Verluste hauptsächlich durch den Spannungsabfall an den Dioden bedingt sind. Demgegenüber arbeitet der auf der Empfangsseite befindliche Gleichrichter mit hoher Frequenz, sodass auch die Schaltverluste des Geräts in die Betrachtung mit einbezogen werden müssen [29, 31].

DC/DC-Wandler (Spannungswandler)

Ein essentieller Bestandteil von induktiven Ladesystemen ist der Spannungswandler. Die Anpassung der Gleichspannung kann durch Erhöhung oder Verringerung derselben erfolgen. In Bezug auf die Funktionsweise lassen sich DC/DC-Wandler in zwei Hauptkategorien einteilen: passive und Schaltwandler.

Passive Wandler reduzieren die Eingangsspannung und sind durch eine geringe Umwandlungseffizienz gekennzeichnet. Der Spannungsabfall zwischen Ein- und Ausgangsspannung wird durch die Leistungsverluste an einem passiven (Widerstand)

oder aktiven (Transistor) Bauelement erzielt. In der Regel weisen Schaltwandler eine höhere Effizienz auf, weshalb in induktiven Ladetechnologien ausschließlich Schaltwandler zum Einsatz kommen [32]. Hierbei werden insbesondere nicht isolierte Schaltwandler verwendet, welche Induktoren zur Energiespeicherung für die Spannungsumwandlung nutzen [29, 33].

DC/DC-Wandler lassen sich in drei Hauptkategorien unterteilen:

- **Abwärtswandler (Buck):**
Eingangsspannung ist höher als Ausgangsspannung.
- **Aufwärtswandler (Boost):**
Eingangsspannung ist niedriger als Ausgangsspannung.
- **Buck-Boost-Wandler:**
Kombination aus Abwärts- und Aufwärtswandler.

Die Steuerung der Wandler erfolgt durch ein elektronisches Signal, die sogenannte Pulsweitenmodulation (PWM) [31]. Die Ausgangsspannung wird dabei durch die Änderung des Tastverhältnisses des Signals reguliert. Ein exemplarisches Schema eines Aufwärtswandlers ist in Abbildung 2.10 dargestellt.

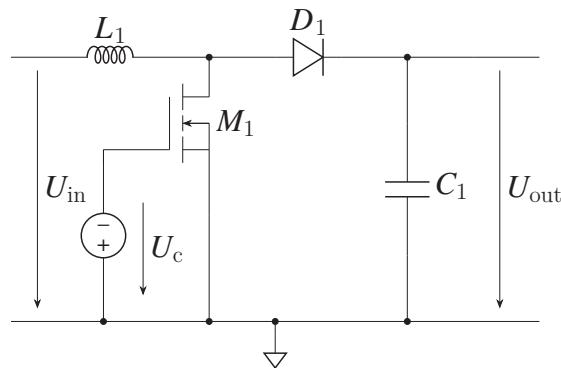


Abbildung 2.10: Ersatzschaltbild eines Aufwärtswandlers.

Der Schaltkreis umfasst einen Leistungsschalter, der typischerweise als MOSFET oder IGBT ausgeführt ist und mit hoher Frequenz arbeitet, wobei Werte zwischen wenigen kHz und mehreren MHz erreicht werden. Der Schaltkreis wird durch einen Induktor, eine Diode sowie eine Kapazität vervollständigt. Bei initial ausgeschaltetem Schalter erfolgt eine Aufladung der Ausgangskapazität auf Basis der anliegenden Eingangsspannung, wobei eine Reduktion der Spannung durch den Diodenspannungsabfall zu verzeichnen ist. Bei Aktivierung des Schaltkreises fließt der gesamte Strom durch den Induktor und den MOSFET. Der Induktor beginnt, magnetische Energie zu speichern. Nach Abschalten des Schaltkreises erzeugt der Induktor eine

hohe Spannung mit Polarität entgegengesetzt zur ursprünglich gelieferten, um die Stromflüsse aufrechtzuerhalten.

Die Ausgangsspannung U_{out} beim Aufwärtswandler ist eine Funktion des Tastgrades D , wobei $D = \frac{t_{\text{on}}}{T}$ mit t_{on} als Impulsdauer und T als Periode definiert wird.

$$U_{\text{out}} = \frac{U_{\text{in}}}{1 - D} \quad (2.49)$$

Der äquivalente Widerstand zwischen Ein- und Ausgang kann gemäß folgender Formel ausgedrückt werden:

$$R_{\text{in}} = R_{\text{out}} \cdot (1 - D)^2 \quad (2.50)$$

Die Möglichkeit, die Impedanz anzupassen, spielt bei induktiven Ladetechnologien eine entscheidende Rolle, da sie eine optimale Ausgestaltung der Ein- und Ausgangsimpedanzen ermöglicht. Andererseits sind mit dem Einsatz eines Wandlers auch Verluste verbunden, die sich in Leistungs- und Schaltverlusten am Leistungsschalter manifestieren. Des Weiteren sind Spannungsverluste an der Diode sowie Verluste am Induktor zu verzeichnen.

Leistungsregelung

Ein wesentlicher Aspekt eines generischen Ladesystems ist die Verwaltung und Regulierung der Stromversorgung. Es ist gemeinhin bekannt, dass eine Batterie eine sorgfältige Aufladung erfordert. Eine Lithiumbatterie, die gegenwärtig am häufigsten zum Einsatz kommt, erfordert eine anfängliche Ladephase mit konstantem Strom sowie eine abschließende Ladephase mit konstanter Spannung. Des Weiteren ist eine Anpassung der an die Batterie übertragenen Leistung an Variationen geometrischer Bedingungen erforderlich, beispielsweise im Falle einer Fehlausrichtung der Spulen. Um eine präzise Kontrolle der Ausgangsleistung zu gewährleisten, ist die Implementierung eines Steuersystems unerlässlich, welches eine exakte Regulierung der Systemparameter ermöglicht. Für die Erstellung eines Leistungsregelungssystems können drei Konfigurationen berücksichtigt werden.

- Regelungseinheit auf der Primärseite,
- Regelungseinheit auf der Sekundärseite,
- Regelungseinheit auf der Primär- und Sekundärseite.

Das Hauptkonzept der Regelung auf der Sendeseite besteht in der Anpassung der Eingangsleistung des WPT-Senders, um die Ausgangsleistung zu regulieren (siehe Abbildung 2.11) [34]. Die Leistungsregelung basiert auf einer Rückmeldung von der Sekundärseite (u. a. Bluetooth) oder auf einer Schätzung der gelieferten Ausgangsleistung anhand der Parameter auf der Primärseite. Die Informationen über die Ausgangsleistung, Spannung und Stromstärke werden verwendet, um die Eingangsparameter des Systems zu regulieren, sodass die Ziel-Ausgangsleistung erreicht wird. Die Regelung kann durch die Anpassung der Betriebsfrequenz oder durch die Anpassung der Eingangsspannung vorgenommen werden.

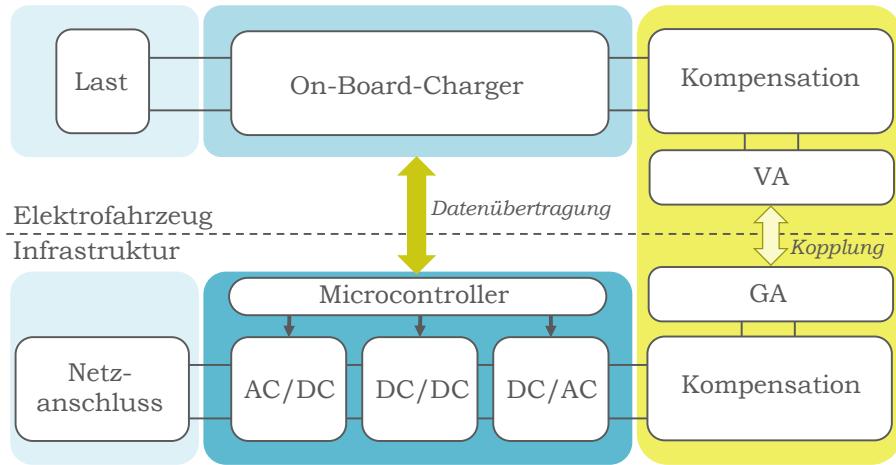


Abbildung 2.11: Leistungsregelung auf der Primärseite.

Die Realisierung eines Steueralgorithmus, welcher den Tastgrad des Wandlers oder die Frequenz des Wechselrichters variiert, erfolgt mittels eines Mikrocontrollers. Dadurch wird die gewünschte Ausgangsleistung bzw. Spannung erreicht. Die Leistungsregelung auf der Sekundärseite basiert auf der Anwendung einer Spannungsregelungseinheit (DC/DC). Der Wandler wird zwischen dem Hochfrequenzgleichrichter und der Last platziert. Der wesentliche Vorteil dieser Architektur besteht in der Einfachheit des Systems, da keine Kommunikation zwischen der Primär- und Sekundärseite erforderlich ist. Allerdings führt eine Spannungsänderung auf der Ausgangsseite zu einer Änderung des vom Sender wahrgenommenen Eingangswiderstands [29]. Die simultane Anwendung beider Regler erlaubt die vollständige Kontrolle des Systems. Allerdings sind aufgrund der Präsenz zweier Wandler Verluste unvermeidlich.

2.2.4 Designparameter

Der Designprozess für ein WPT-System nimmt seinen Anfang mit der Definition der Spezifikationen, welche in zwei Kategorien unterteilt werden: elektrisch und geometrisch. Die wesentlichen elektrischen Spezifikationen umfassen die Leistungsstufe, die Effizienz sowie die Reichweite, definiert als die Distanz, die über einen Luftspalt hinweg überbrückt werden kann. Weitere wesentliche elektrische Spezifikationen betreffen die Spannungs- und Strompegel an den Primär- und Sekundärspulen sowie an den Anschlüssen. Die maßgeblichen nicht-elektrischen Spezifikationen umfassen die Größe und das Gewicht des Systems sowie dessen mechanische Robustheit. Neben den zuvor genannten elektrischen und geometrischen Spezifikationen ist zudem der Kostenaspekt des Systems von wesentlicher Bedeutung.

Betriebsfrequenz

Die Betriebsfrequenz ω_0 ist ein entscheidender Aspekt bei der Auslegung eines induktiven Ladesystems, da die Betriebsfrequenz ω_0 in Q_p und Q_s (Gleichung 2.13) und der Gütezahl, definiert als *FOM* (Gleichung 2.39), erscheint. Im Idealfall sollte die Frequenz erhöht werden, um die Gütezahl zu erhöhen. Eine Frequenzerhöhung führt jedoch aufgrund parasitärer Elemente und des Skin-Effekts zu einem Anstieg der Leitungs- und Schaltverluste in den elektronischen Schaltungen von der Primär- und Sekundärseite sowie in den gekoppelten Induktivitäten und Kompen-sationsschaltungen. Daher hängt die Wahl des geeigneten Frequenzbereichs für WPT-Systeme vom Kosten-Nutzen-Verhältnis ab.

Die Nutzung des Frequenzspektrums ist durch nationale und internationale Vorschriften geregelt. Während die Standardisierung von WPT-Systemen im Automobilbereich noch im Gange ist, sind derzeit nur Frequenzen im Niedrigfrequenzbereich oder in den ISM-Bändern (Industrial, Scientific, Medical) erlaubt. Die in der SAE definierte Frequenzbereich für WPT-Systeme bei leichten Nutzfahrzeugen liegt bei 79 kHz bis 90 kHz [35].

Spulendesign

Die induktive Übertragung elektrischer Energie erfordert mindestens einen magnetischen Koppler. Eine hohe Leistung erfordert einen hohen Kopplungskoeffizienten k und einen hohen Gütefaktor Q , was die Entwicklung von Spulen mit hohen k - und Q -Werten bei gleichzeitig niedrigen Kosten, kompakten Abmessungen und geringem Gewicht zu einer Herausforderung macht [36]. Auch wenn Spulen unterschiedliche Formen und Größen haben können, sind planare Spulen im Allgemeinen die erste Wahl für stationäre induktive Ladeapplikationen im Automobilbereich mit geringem Luftspalt. Die beliebtesten Geometrien sind kreisförmig, rechteckig, DD, DDQ und bipolare DD [37]. Jede dieser Geometrien hat Vor- und Nachteile.

Die Spulen bestehen in der Regel aus Kupferdrähten. Diese bestehen in der Regel

aus Litzenleitern, die aus vielen dünnen, einzeln isolierten und verdrillten Leitungsdrähten bestehen, um Wechselstromverluste (z. B. Skin- und Proximity-Effekte) zu begrenzen [38].

Die Leistungsfähigkeit von WPT-Systemen kann durch eine Optimierung der Faktoren k und Q gesteigert werden. Dies lässt sich in der Regel durch eine Erhöhung der Induktivität und eine Reduzierung der Verluste erreichen. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, den magnetischen Streufluss sowie die Leistungsverluste in leitenden Materialien auf ein Minimum zu reduzieren. Der Einsatz magnetischer Materialien, wie bspw. Ferrit, wird empfohlen [39]. Aufgrund der hohen Permeabilität und geringen Verluste bei den für die WPT-Systeme in Fahrzeugen relevanten Frequenzen stellt Ferrit eine bevorzugte Wahl dar. Allerdings ist Ferrit teuer, zerbrechlich und schwer, was die optimale Konfiguration zu einer Herausforderung für das Spulendesign macht [40]. Eine durchdachte Anordnung des Ferrits ermöglicht die gezielte Lenkung des Magnetflusses sowie die Vermeidung von Wirbelströmen in metallischen Bereichen, wie etwa der Fahrzeugkarosserie.

Des Weiteren ist sicherzustellen, dass das durch die Ströme in den Spulen erzeugte Magnetfeld keine Wirbelströme in der Fahrzeugkarosserie verursacht und keine Beeinträchtigung der elektrischen und elektronischen Systeme im Fahrzeug sowie auf der Straße bewirkt [41, 42]. Um unerwünschte Effekte des Magnetfelds in der Umgebung zu vermeiden, werden daher Abschirmungen aus hochleitfähigen Materialien wie Aluminium eingesetzt. Die Verwendung von Aluminiumabschirmungen erlaubt eine signifikante Reduktion der Magnetfeldeinwirkung auf Fahrgäste und Fußgänger [13].

EMV- und EMVU-Sicherheit

Die Wahl der Betriebsfrequenz hat einen signifikanten Einfluss auf die EMV sowie EMF [43–45]. Die EMV steht für die Fähigkeit von elektrischen Geräten und Systemen, in der elektromagnetischen Umgebung korrekt zu funktionieren. Sie ist nicht nur für die Funktionalität von Bedeutung, sondern auch für die Vermarktung von Systemen müssen die gesetzlichen Anforderungen erfüllt werden [46]. Die kritischen EMV-Probleme stehen in engem Zusammenhang mit den leitungsgebundenen und abgestrahlten Emissionen von leistungselektronischen Schaltungen und Spulen. Letztere werden nicht nur durch die Grundfrequenz, sondern auch durch Oberwellen hoher Ordnung in den Schaltungen erzeugt, welche wiederum leitungsgebundene und abgestrahlte Emissionen hervorrufen [47]. In der Regel nimmt die Relevanz dieser Problematik mit steigender Frequenz zu. Daher ist es in vielen Fällen erforderlich, die Frequenz zu begrenzen, obschon mit steigender Frequenz eine Zunahme der magnetischen Kopplung einhergeht [48].

Ein Aspekt des WPT-Systems, der einer kritischen Betrachtung unterzogen werden muss, ist die EMF-Sicherheit [49]. Ein wesentliches Problem bei der Anwendung von WPT-Systemen ist die starke Emission eines zeitlich veränderlichen Magnet-

felds in die Umgebung, insbesondere bei der Grundfrequenz. Es ist bekannt, dass hochintensive magnetische Wechselfelder in der Lage sind, biologische Wirkungen bei Lebewesen zu induzieren. Derzeit sind lediglich kurzfristige Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit bekannt, jedoch bestehen auch Bedenken hinsichtlich möglicher langfristiger Auswirkungen. Die Emission von Magnetfeldern unterliegt nationalen und internationalen Normen sowie Richtlinien, welche den Schutz des Menschen vor EMF gewährleisten sollen. Die wohl bekanntesten Vorschriften sind die IEEE C.95-Normen sowie die ICNIRP-Richtlinien, welche den Schutz vor kurzfristigen Auswirkungen zum Gegenstand haben [50–53]. Diese Normen und Richtlinien definieren Grenzwerte für die Exposition gegenüber magnetischen Feldern bei verschiedenen Frequenzen und unterliegen einer regelmäßigen Überarbeitung, wobei der aktuelle Stand der Technik berücksichtigt wird. Eine detaillierte Erörterung der EMV- und EMVU-Problematik findet sich in Kapitel 3.

2.3 Internationale Standards und Normen

Ein Standard ist ein technisches Dokument, welches allgemein anerkannte Produkte, Prozesse, Verfahren und Richtlinien definiert. Die Konformitätsbewertung stellt ein Verfahren dar, im Rahmen dessen ein Produkt, ein Prozess, eine Dienstleistung oder ein System hinsichtlich der Erfüllung vorgegebener Standards evaluiert wird. Die weltweite Anerkennung von Standards fördert die Interoperabilität sowie die kommerzielle Akzeptanz, wodurch auch ausländische Märkte erschlossen werden können. Sie schaffen tatsächlich eine Grundlage für ein gegenseitiges Verständnis zwischen Einzelpersonen, Unternehmen, öffentlichen Behörden und anderen Organisationen. Sie fördern die Kommunikation, den Handel, die Messung sowie die Herstellung. Ihr Ziel ist es, Unternehmen und Verbrauchern Vorteile zu verschaffen, indem sie Kosten senken, die Leistung verbessern und die Sicherheit, den Umweltschutz und die Gesundheit fördern. Des Weiteren wird durch die Verfahren die Kompatibilität diverser Komponenten, Produkte und Dienstleistungen gewährleistet.

Die internationalen Standards und Normen für WPT-Systeme für EVs verfolgen das Ziel, die Sicherheit, Effizienz und Interoperabilität dieser Systeme zu gewährleisten. Der Anwendungsbereich dieser Normen umfasst eine Vielzahl von Bereichen, darunter die Kommunikationsprotokolle, die EMV, die Sicherheitsanforderungen sowie die technische Leistungsfähigkeit. Ziel ist es, durch die Etablierung einheitlicher Standards die flächendeckende Nutzung der drahtlosen Ladeinfrastruktur zu fördern. Zu den relevanten Normungsorganisationen, die sich der Thematik der WPT-Systeme für EVs widmen, zählen:

- **International Electrotechnical Commission (IEC)**
Die IEC ist eine weltweit tätige Normungsorganisation, die internationale Standards für elektrische und elektronische Technologien entwickelt.
- **Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR)**
Die CISPR ein Teil der IEC, setzt Standards für elektromagnetische Verträglichkeit und die Begrenzung von Funkstörungen.
- **International Organization for Standardization (ISO)**
Die ISO ist eine unabhängige, internationale Organisation, die globale Standards für eine Vielzahl von Branchen und Technologien erarbeitet, darunter Qualität, Sicherheit, Umweltmanagement und technische Spezifikationen.
- **Society of Automotive Engineers (SAE)**
Die SAE ist eine in den USA ansässige Normungsorganisation, die sich auf Standards für die Automobil-, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie verwandte Bereiche spezialisiert hat.

Im Folgenden werden die allgemeinen Anforderungen an WPT-Systeme erörtert. Die maßgeblichen Normen sind den jeweiligen Komponenten des Ladesystems in der Abbildung 2.12 zugeordnet und in der im Anhang befindlichen Tabelle C.1 mit den entsprechenden Unterkapiteln aufgeführt.

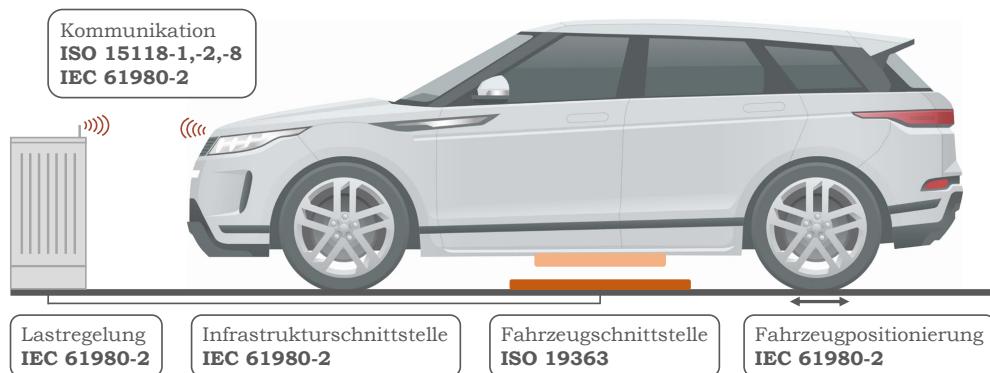


Abbildung 2.12: Induktives Laden für EVs mit den entsprechenden Normen nach Komponente (Datenquelle: [54]).

Für eine interoperable und effiziente Energieübertragung ist eine koordinierte Festlegung von Anforderungen an Kompensation und Resonanzbedingungen auf der Fahrzeug- und Infrastrukturseite unerlässlich. Des Weiteren sind Spezifikationen für

die Spulenposition auf Parkplätzen bereitzustellen, wobei differierende Montagemöglichkeiten der Spule an Fahrzeugen zu berücksichtigen sind. Die Norm ISO 19363 definiert die fahrzeugseitigen Anforderungen für das kabellose Laden, während die Norm IEC 61980-3 die infrastrukturseitigen Anforderungen festlegt [55,56].

Ein weiterer Aspekt von signifikanter Relevanz ist die Robustheit und Funktionalität des Ladesystems in einem öffentlich zugänglichen Raum. Dieser Aspekt ist von entscheidender Bedeutung, da das Ladesystem unter allen erwarteten Wetter- und Nutzungsbedingungen einwandfrei funktionieren muss. Die IEC 61980-1, -2, -3 berücksichtigt diesen Aspekt mit geeigneten Testverfahren [56].

Die Norm IEC 61980-2 definiert die Anforderungen an die präzise Ausrichtung des Fahrzeugs in Relation zur Primärspule [56]. Die zuvor beschriebene Feinpositionierung wird mittels eines zusätzlichen, vom Fahrzeug ausgesendeten magnetischen oder elektromagnetischen Signals erreicht, welches von der Infrastruktureinheit erkannt wird.

Die betrachteten Kommunikationsanwendungen sind in den Normen IEC 61980-2 und ISO 15118-1 beschrieben. Die entsprechende Ausführung zum Ladevorgang finden sich in der Norm IEC 61980-2 erläutert [56]. Das zugehörige Kommunikationsprotokoll sowie die entsprechenden Anforderungen sind in ISO 15118-2 spezifiziert [57]. Für die Datenübertragung wird die WLAN-Technologie gemäß IEEE 802.11n verwendet, wie in ISO 15118-8 definiert [57].

Die UN-Regulierung ECE R10 betrifft die EMV von Fahrzeugen, einschließlich solcher, die mit drahtlosen Ladesystemen ausgestattet sind. Die Regulierung gewährleistet, dass elektromagnetische Störungen, die durch das Fahrzeug selbst oder durch dessen Komponenten verursacht werden, keine Beeinträchtigung der Leistung anderer Geräte oder Systeme zur Folge haben [58]. Im Weiteren sind die technischen Grenzwerte der elektromagnetischen Verträglichkeit für das induktive Laden gemäß CISPR 11 zu berücksichtigen [59]. Die Grenzwerte sind in IEC 62764-1 definiert und gelten für elektromagnetische Felder [60].

Der SAE J2954-Standard definiert Kriterien für die induktive Energieübertragung bei leichten Plug-in-Elektrofahrzeugen in Bezug auf Interoperabilität, EMV, Leistung, Sicherheit und Tests. Des Weiteren werden drei Ladelevel bis zu 11 kW spezifiziert, wobei zukünftige Erweiterungen auf 22 kW möglich sind. Zudem wird sowohl das private als auch das öffentliche induktive Laden unterstützt [35].

Der Standard behandelt derzeit lediglich das stationäre Laden (im Stillstand) sowie oberirdische Installationen. In künftigen Versionen werden jedoch auch bündig montierte Installationen sowie die bidirektionale Energieübertragung (V2G) Berücksichtigung finden. Die kommende Version des Standards wird zudem Anforderungen an die bidirektionale Übertragung von Energie vom Fahrzeug zum Netz definieren,

wodurch eine Interaktion mit intelligenten Stromnetzen (Smart Grids) ermöglicht wird. Bis zur Veröffentlichung der nächsten Version des Standards gelten bestimmte Abschnitte desselben als Grundlage für die Bewertung von bidirektionalen Systemen. Für die Entwicklung solcher Systeme sind zudem weitere Normen wie SAE J3072 und SAE J2836/3 von Relevanz [35].

Obgleich die SAE ihren Sitz in den USA hat, nutzen viele Unternehmen in Europa, Asien sowie weiteren Regionen diese Standards, um die Kompatibilität und Sicherheit von Fahrzeugen und Technologien zu gewährleisten. SAE-Standards werden in Kombination mit weiteren internationalen Normen wie der ISO und IEC eingesetzt, um eine globale Konsistenz und Interoperabilität zu gewährleisten.

2.4 Vorteile und Herausforderungen

Die Vorteile von WPT-Systemen sind vielfältig und machen sie zu einer attraktiven Technologie für verschiedene Anwendungen. Die induktive Aufladung bezeichnet ein Verfahren, bei dem Geräte ohne physische Verbindung durch ein Kabel aufgeladen werden können. Die Nutzer müssen lediglich ihr Gerät in die Nähe einer Ladematte oder einer Ladefläche legen, wodurch der Ladeprozess erheblich vereinfacht und komfortabler gestaltet wird. Für EVs bedeutet dies bspw., dass das Fahrzeug lediglich über einer Ladeplatte zu parken ist, sodass auf das Anschließen eines Ladekabels verzichtet werden kann. Da keine mechanische Verbindung zwischen der Ladesäule und dem zu ladenden EV erforderlich ist, werden die Anschlüsse und Steckverbindungen vor Verschleiß geschützt, was eine hohe Langlebigkeit gewährleistet. Dies resultiert in einer Reduktion der Abnutzung der physischen Schnittstellen und einer daraus resultierenden Verlängerung der Lebensdauer.

Im Vergleich zu konventionellen Ladesystemen weisen WPT-Systeme eine höhere Sicherheit auf, da keine freiliegenden elektrischen Kontakte vorhanden sind. Dadurch wird das Risiko von Funkenbildung, Kurzschlüssen oder elektrischen Schlägen minimiert. Dies ist insbesondere in feuchten oder gefährlichen Umgebungen von Vorteil, da herkömmliche Ladeanschlüsse ein Risiko darstellen könnten.

Da für die Verbindung keine mechanischen Teile erforderlich sind, ist der Wartungsaufwand für WPT-Systeme geringer. Infolgedessen werden weniger Komponenten benötigt, deren Reparatur oder Ersatz mit entsprechenden Kosten verbunden wäre. Dies führt zu einer Reduktion der Betriebskosten.

In industriellen Umgebungen, wie bspw. in der Robotik oder bei fahrerlosen Transportsystemen (Automated Guided Vehicle, AGV), ermöglicht die induktive Lade-technologie eine kontinuierliche und automatisierte Energieversorgung ohne menschliches Eingreifen. Dies resultiert in einer gesteigerten Effizienz sowie einer Reduktion von Ausfallzeiten, die durch manuelles Laden bedingt sind.

Im Gegensatz zu anderen Ladesystemen sind WPT-Systeme weniger anfällig für Umwelteinflüsse wie Regen, Schnee, Staub oder Verschmutzung, da sie in geschlossene Systeme integriert werden können, die keine exponierten Metallkontakte aufweisen. Dies resultiert in einer erhöhten Zuverlässigkeit und Einsatzfähigkeit unter verschiedenen Bedingungen.

Insgesamt bieten WPT-Systeme eine Vielzahl von Vorteilen, sodass sie für eine Vielzahl von Anwendungen in der modernen Elektromobilität und industriellen Automatisierung attraktiv sind. Die Kombination von Benutzerfreundlichkeit, Sicherheit, Flexibilität und geringeren Wartungskosten lässt eine vielversprechende Zukunftspрогнose für diese Technologie zu.

Der Einsatz von WPT-Systemen ist mit einer Reihe von Vorteilen verbunden, allerdings sind auch einige Herausforderungen zu bewältigen, die die breite Anwendung und Effizienz dieser Technologie beeinträchtigen.

Im Vergleich zu herkömmlichen, kabelgebundenen Ladesystemen weisen WPT-Systeme in der Regel eine geringere Effizienz auf. Ein Teil der Energie wird als Wärme verloren, insbesondere bei größeren Abständen zwischen den Spulen oder bei einer suboptimalen Ausrichtung. Dies kann zu höheren Energiekosten und längeren Ladezeiten führen, was die Attraktivität der Technologie schmälert.

Des Weiteren kann eine unerwünschte Wärmeentwicklung zu einer Überhitzung führen, was wiederum eine Beeinträchtigung der Lebensdauer der Komponenten zur Folge hat. Folglich ist die Installation zusätzlicher Kühlsysteme oder Maßnahmen zur Wärmeableitung erforderlich, was mit einer Steigerung der Komplexität und Kosten verbunden ist.

Die Energieübertragung ist in hohem Maße von dem Abstand und der Ausrichtung zwischen der Sender- und Empfängerspule abhängig. Mit zunehmender Distanz zwischen den Spulen nimmt die Effizienz des Systems erheblich ab. Infolgedessen sind die Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie auf kurze Distanzen beschränkt, was die Flexibilität der Anwendung einschränkt.

Eine optimale Energieübertragung erfordert die präzise Ausrichtung der Spulen. Beim Laden von EVs kann es schwierig sein, eine korrekte Ausrichtung sicherzustellen, insbesondere wenn der Benutzer das EV nicht exakt über der Ladeplatte parkt. Eine inadäquate Ausrichtung kann eine Reduktion der Effizienz zur Folge haben oder gar ein vollständigen Abbruch des Ladevorgangs bedingen.

Die Implementierung von WPT-Systemen, insbesondere für größere Anwendungen wie EVs, bedingt die Bereitstellung einer spezifischen Infrastruktur. Die Kosten für die Installation und Integration der notwendigen Spulen und Steuerelektronik in Straßen, Parkplätze oder andere Umgebungen können erheblich sein. Des Weiteren sind die Komponenten selbst – wie bspw. spezielle Spulen und Materialien – in der Regel mit höheren Kosten verbunden als herkömmliche Ladegeräte.

Die Technologie hinter WPT-Systemen ist hochgradig komplex und erfordert den

Einsatz fortschrittlicher Steuerelektronik, um eine optimale Resonanzfrequenz und Energieübertragung sicherzustellen. Die Abstimmung der Komponenten sowie die Erreichung einer stabilen und effizienten Übertragung erfordern präzise Technik und können insbesondere in dynamischen Umgebungen eine Herausforderung darstellen. WPT-Systeme erzeugen EMF, die andere elektronische Geräte stören könnten, insbesondere wenn sie nicht ordnungsgemäß abgeschirmt sind. Zudem gibt es Bedenken hinsichtlich der potenziellen Auswirkungen dieser Felder auf die menschliche Gesundheit, obwohl diese nach aktuellem Stand der Forschung bei ordnungsgemäßer Konstruktion minimal sind. Trotzdem müssen Systeme den EMV-Normen entsprechen und dürfen keine gesundheitlichen Risiken verursachen. Es existieren diverse Standards und Protokolle für WPT-Systeme (z. B SAE J2954 [35]). Allerdings sind nicht alle Systeme miteinander kompatibel. Dies kann zu Schwierigkeiten bei der Interoperabilität führen, insbesondere wenn Geräte oder Fahrzeuge von unterschiedlichen Herstellern stammen. Eine weitere Standardisierung ist erforderlich, um die Akzeptanz und Verbreitung der Technologie zu fördern.

Es ist von essentieller Bedeutung, dass WPT-Systeme in der Lage sind, Fremdkörper wie Metallgegenstände zu erkennen, die zwischen die Spulen gelangen könnten, um die Sicherheit der Nutzer zu gewährleisten. Die potenzielle Erhitzung dieser Fremdkörper kann ein Sicherheitsrisiko darstellen. Daher müssen Systeme über geeignete Sicherheitsmechanismen und Sensoren verfügen, was mit einem Anstieg der Kosten und Komplexität einhergeht.

Obgleich WPT-Systeme eine Vielzahl an Vorzügen aufweisen, gilt es, eine Reihe von Herausforderungen zu bewältigen, um ihre Effizienz, Sicherheit und Wirtschaftlichkeit zu optimieren. Die technologische Weiterentwicklung sowie die Standardisierung werden von entscheidender Bedeutung sein, um die WPT-Systeme für eine breite Anwendung zu optimieren und ihr volles Potenzial zu erschließen.

2.5 Stand der Technik

Michael Faraday war der erste Wissenschaftler, der in den 1830er Jahren bei seinen Experimenten, die zu seinem berühmten Gesetz der elektromagnetischen Induktion führten, die drahtlose Übertragung elektrischer Energie beobachtete. Diese Entdeckung erfolgte jedoch zufällig und war nicht das primäre Ziel seiner Forschungsarbeit. Nikola Tesla wird in der wissenschaftlichen Literatur häufig als Pionier der drahtlosen Energieübertragung anerkannt, da er im 19. Jahrhundert gezielt Experimente mit dieser Technik durchführte [61]. Ein bemerkenswertes Experiment Teslas war die Übertragung elektrischer Energie durch die Ionosphäre über eine Distanz von 48 km. Technische Einschränkungen und die geringe Effizienz verhinderten jedoch die Weiterentwicklung und kommerzielle Nutzung.

In den 1920er und 1930er Jahren wurde ein weiterer Durchbruch bei der drahtlosen Energieübertragung erzielt, als Magnetrons entwickelt wurden. Hierbei handelt es sich um Geräte, die für die Umwandlung von Elektrizität in Mikrowellen benötigt werden. Allerdings war zu diesem Zeitpunkt noch keine Möglichkeit zur Rückumwandlung von Mikrowellen in elektrische Energie gegeben. Erst im Jahre 1964 gelang es, mit Hilfe einer Rectenna eine Fernübertragung von Energie über Mikrowellen erfolgreich durchzuführen [62].

Im 21. Jahrhundert hat das Interesse an der WPT-Systemen wieder zugenommen. Dies ist insbesondere auf die Entwicklung und Verbreitung moderner Stromrichter zurückzuführen, welche die Nutzung von Frequenzen im Bereich von einigen zehn Kilohertz bis hin zu mehreren Kilowatt ermöglichen [63, 64].

Die Technologie des dynamischen drahtlosen Ladens wurde erstmals im Jahr 1976 eingeführt, als das Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) die Machbarkeit des Systems untersuchte [9]. Im Jahr 2007 präsentierten Forscher des Massachusetts Institute of Technology (MIT) einen Vorschlag zur Verwendung magnetischer Resonanz für den WPT [10]. Im Jahr 2009 entwickelte das Korean Advanced Research Institute (KAIST) den ersten Prototyp eines „On-Line Electric Vehicle (OLEV)“ genannten Projekts [65, 66]. Eine detaillierte Analyse und Bewertung des WPT für elektrische Busse findet sich in den Arbeiten [67] sowie [68].

Im Jahr 1996 präsentierte General Motors (GM) mit dem MagneCharge ein WPT-System, welches erstmals im GM EV1 zum Einsatz kam und als Wegbereiter für moderne EVs gilt [69].

Im Jahr 2013 erfolgte durch das kanadische Startup Elix Wireless, welches als Ausgründung der University of British Columbia (UBC) entstand, die Anmeldung eines Patents auf die Technologie der magnetodynamischen Kopplung. Gleichzeitig wurde das E10K Wireless Charging System (WCS) präsentiert, welches eine Ladeleistung von 10 kW bietet [70, 71]. Im Jahr 2013 wurde von der Firma Conductix-Wampfler ein stationäres Ladesystem für Elektrobusse in Turin, Italien, eingeführt. Dieses basiert auf der Abstimmung der Resonanzfrequenz jedes Systems und erreicht eine Effizienz von 90 % bei einem Abstand von 40 mm und einer Leistung von 60 kW [72]. Im Jahr 2015 erfolgte die erfolgreiche Implementierung des WPT-Systems Halo 7,2 kW im Sicherheitsfahrzeug BMW i8 durch Qualcomm [73, 74]. Das in Kooperation mit der University of Auckland entwickelte System basiert auf einer neuartigen Konfiguration namens DD-Spule (Double D), welche eine höhere Effizienz sowie eine größere Toleranz gegenüber Fehlstellungen aufweisen als herkömmliche kreisförmige und rechteckige Spulen [20].

Im Jahr 2016 präsentierte Bombardier das Hochleistungs-WPT-System PRIMOVE, welches eine Leistungskapazität von bis zu 400 kW aufweist [75, 76]. Im Jahr 2017 verkündete Nissan in Kooperation mit WiTricity, dass die nächste Generation des Familienautos (LEAF) mit einer Schnellladetechnologie ausgestattet werden wird [77]. Im Jahr 2019 erwarb das als Spin-off des MIT gegründete und zu den führenden An-

biatern von WPT-Systemen zählende Unternehmen WiTricity die Halo-Technologie von Qualcomm [78].

Im Jahr 2022 präsentierte Momentum Dynamics ein neu entwickeltes Ladesystem mit „Dual-Power“-Modus, welches eine automatische induktive Ladung sowohl mit hoher (50 kW bis 75 kW) als auch mit niedriger (7 kW bis 22 kW) Leistung für Automobile und leichte Nutzfahrzeuge ermöglicht. Das System ermöglicht die Aufladung jeder Fahrzeugbatterie durch eine intelligente Erkennung und Nutzung eines gemeinsamen induktiven Elements [79].

Im Jahr 2023 wurde seitens des Unternehmens Tesla die bevorstehende Markteinführung eines WPT-Systems angekündigt. Im selben Jahr erfolgte die Übernahme des Unternehmens WiFerion durch Tesla [80].

Die Entwicklung stationärer WPT-Systeme für EVs ist bereits weit vorangeschritten und befindet sich gegenwärtig in einer Phase, in der die kommerzielle Verfügbarkeit und die Anwendungsbreite weiter vorangetrieben werden können. Die Technologie des stationären induktiven Ladens hat sich zu einem ausgereiften Verfahren entwickelt, welches in Pilotprojekten sowie Testphasen bereits implementiert wird [81–85]. Diese Systeme umfassen eine Primärspule in der Ladeinfrastruktur (auf bzw. in dem Boden eines Parkplatzes) und eine Sekundärspule im EV. Sie arbeiten mit standardisierten Frequenzen (typischerweise 85 kHz gemäß SAE J2954 [35]) und erreichen eine Effizienz von etwa 88 % bis 93 % [86].

Die Forschung zu quasi-dynamischen und dynamischen Ladesystemen befindet sich noch in der experimentellen Phase. Beim dynamischen Laden erfolgt die Ladung des EV während der Fahrt auf elektrifizierten Straßen, wobei mehrere Primärspulen entlang der Fahrbahn installiert werden. Diese Methode erweist sich insbesondere für Lkw und schwere Nutzfahrzeuge als vorteilhaft, da sie eine Senkung der Batteriekosten sowie eine Reduzierung der sogenannten Reichweitenangst ermöglicht [87]. Die Anwendung des quasi-dynamischen Ladens konzentriert sich in erster Linie auf den städtischen Verkehr, bspw. an Bushaltestellen oder Ampeln. Die größten Herausforderungen liegen in der hohen erforderlichen Infrastrukturinvestition, der EMV sowie der Systemeffizienz. Die Realisierbarkeit und Effektivität solcher Systeme ist Gegenstand von Forschungsprojekten wie [88–90].

Die aktuelle Forschung zu WPT-Systemen für EVs fokussiert sich auf mehrere zentrale Schwerpunkte. Ein wesentlicher Bereich ist die **Effizienzsteigerung und Leistungserhöhung**. Diesbezüglich stehen die Verbesserung der Übertragungseffizienz und die Erhöhung der Ladeleistung im Fokus. Dies umfasst die Optimierung der Spulengeometrie, den Einsatz magnetischer Resonanztechniken sowie die Entwicklung neuer Materialien mit höherer magnetischer Permeabilität.

Die Wahl der Spulengeometrie hängt von den spezifischen Systemanforderungen ab. Planare, unipolare Spulen (z. B. runde, rechteckige, quadratische Form) sind einfach und kostengünstig, aber empfindlich gegenüber Fehlausrichtungen. Planare, bipola-

re Topologien, wie bspw. die DD-Spulen, bieten eine größere Toleranz gegenüber Fehlausrichtungen und einen höheren Wirkungsgrad, sind jedoch teurer und komplexer. Solenoidspulen haben eine hohe Feldstärke und eine gute Abschirmung, sind aber schwer und für kompakte Anwendungen weniger geeignet. Die Entscheidung für einen bestimmten Spulentyp hängt daher von einer sorgfältigen Abwägung zwischen Wirkungsgrad, Kosten, Größe und Toleranz gegenüber Fehlausrichtungen ab [91].

Ein weiterer, wesentlicher Forschungsschwerpunkt ist die **Untersuchung der Sicherheit sowie der EMV**. Der Fokus liegt dabei auf der Minimierung elektromagnetischer Störungen (EMI) sowie der Gewährleistung der Sicherheit von Menschen und Tieren in der Nähe von Ladesystemen. Dies impliziert die Analyse der Auswirkungen von EMF sowie die Konzeption von Abschirmtechniken zur Reduktion potenzieller Gefährdungen. Um die störende Quelle zu kompensieren, können drei verschiedene Maßnahmen ergriffen werden: (1) das Feld zu dämpfen, (2) das Feld umzulenken oder (3) ein entgegengesetztes Feld zu erzeugen. In der wissenschaftlichen Literatur werden verschiedene Arten von Abschirmungen beschrieben. Dazu zählen passive Abschirmungen, die entweder magnetisch, leitfähig oder beides sein können, aktive Abschirmungen sowie reaktive Abschirmungen.

Die passive Abschirmung basiert auf dem Hinzufügen geeigneter leitender oder magnetischer Materialien, wodurch die Intensität von EMF reduziert wird. Eine magnetische Abschirmung wird durch magnetische Kerne, bspw. Ferrite im Ladepad, erzielt, die als Platte, mehrere Stäbe oder Kacheln ausgeführt sein können. Die Verwendung magnetischer Abschirmungen bewirkt eine Lenkung magnetischer Flusslinien durch nichtleitende, hochpermeable Materialien. Dies führt zu einer Verbesserung der Systemleistung sowie einer Verringerung des Streuflusses, jedoch auch zu einer Zunahme des Gewichts und der Kosten [39, 92]. Im Falle einer leitenden Abschirmung, bspw. in Form von Kupfer oder Aluminium, erfolgt deren Installation unterhalb des Magnetkerns des Senders bzw. oberhalb des Magnetkerns des Empfängers. Eine weitere Möglichkeit besteht in der direkten Anbringung an der Spule. Die Generierung von Wirbelströmen führt zu einer teilweisen Kompensation der Felder, allerdings zu Lasten der Effizienz [93, 94].

Moderne IPT-Systeme kombinieren magnetische Materialien mit leitenden oder aktiven Abschirmungen, um die EMFs innerhalb sicherer Grenzen zu halten [95–97]. In verschiedenen Studien wird die optimale Kombination von Materialien, Abmessungen und Positionen untersucht, wobei auch die Fahrzeugkarosserie als zusätzliche Abschirmung berücksichtigt wird. Ziel ist es, den negativen Einfluss auf die Effizienz zu minimieren. Für Hochleistungs-IPT-Systeme ($> 100 \text{ kW}$) ist es schwierig, die Streufelder (EMFs) mit herkömmlichen passiven Abschirmungen sicher zu halten [92]. Daher wurde aktive Abschirmung untersucht, bei der zusätzliche Spulenwin-

dungen mit entgegengesetzten Polaritäten hinzugefügt werden, um die Streufelder zu kompensieren [98, 99]. Diese Methode reduziert die EMFs effektiver, kann jedoch die Systemleistung negativ beeinflussen und die Kosten, das Gewicht und die Verluste erhöhen. Beide Abschirmmethoden, passive und aktive, werden oft mit magnetischen Abschirmungen kombiniert [96]. Um die negativen Effekte der aktiven Abschirmung zu reduzieren, wurde eine resonante reaktive Abschirmung vorgeschlagen, die eine passive Kompensationsspule mit einer Resonanzkapazität nutzt [41, 96, 100]. Sie erzeugt ein entgegengesetztes Magnetfeld, das die EMFs ausgleicht, ohne Stromversorgung, und verbessert die Effizienz im Vergleich zur aktiven Abschirmung [41]. Passive Abschirmungen eignen sich für IPT-Systeme mit geringer bis mittlerer Leistung ($< 100 \text{ kW}$), da sie kostengünstiger, einfacher zu implementieren und robuster sind. Für Hochleistungs-IPT-Systeme sind aktive und reaktive Abschirmungen besser geeignet, um die EMF-Standards einzuhalten [95, 96].

Thermische Untersuchungen sind bei WPT-Systemen essenziell, da die Effizienz und Sicherheit stark von der Temperaturentwicklung während des Ladevorgangs abhängen. WPT-Systeme erzeugen während des Betriebs Wärme aufgrund von Energieverlusten, die in den Spulen, Leistungselektronik und magnetischen Materialien auftreten. Übermäßige Erwärmung kann die Komponenten des Systems, wie Spulen, Ferritkerne, elektronische Bauteile und Abschirmungsmaterialien beschädigen oder deren Lebensdauer verkürzen. Thermische Untersuchungen helfen, die Temperaturreteilung innerhalb des Systems zu analysieren und sicherzustellen, dass die Temperaturen innerhalb sicherer Betriebsgrenzen bleiben [101–103].

Die **Regelung von WPT-Systemen** fokussiert sich auf die Steigerung der Energieeffizienz, die Einhaltung von Sicherheitsstandards sowie die Optimierung der Flexibilität und Kompatibilität zwischen verschiedenen Fahrzeugen und Ladesystemen. Zu diesem Zweck werden fortschrittliche Leistungselektronik, intelligente Steuerungen und Kommunikationsprotokolle eingesetzt, um eine optimierte Energieübertragung und ein sicheres Laden zu gewährleisten.

Der Stand der Technik umfasst die adaptive Anpassung der Resonanzfrequenz an Änderungen der Lastbedingungen (z. B. unterschiedliche Ladezustände der Batterie oder variable Entfernung zwischen Sender- und Empfängerspulen) [104].

Durch die Regelung der Phasenverschiebung zwischen der Stromversorgung des Senders und des Empfängers können Verluste minimiert und die Effizienz der Energieübertragung erhöht werden [105]. Diese Methoden verwenden leistungsstarke Mikrocontroller und digitale Signalprozessoren, um die Phasenlage und die Leistung in Echtzeit zu überwachen und anzupassen.

Des Weiteren fokussiert sich die Forschung zunehmend auf die **bidirektionale Energieübertragung (Vehicle-to-Grid, V2G)**. Das Ziel besteht in der Entwicklung von WPT-Systemen, welche die Energieübertragung sowohl vom Netz zum

Fahrzeug als auch in umgekehrter Richtung ermöglichen [106, 107]. Die Förderung der Integration von EVs in Smart Grids sowie die Stabilisierung des Netzes stellen wesentliche Ziele solcher Systeme dar.

2.6 Ladekonzept und Anwendungsbereiche

Die Einsatzmöglichkeiten von WPT-Systemen in der Elektromobilität sind mannigfaltig. Ihr Ziel ist es, den Komfort, die Benutzerfreundlichkeit und die Effizienz der Ladeprozesse zu optimieren. Die flexible Integration in verschiedene Umgebungen und Infrastrukturen ermöglicht die Verbreitung und Akzeptanz von EVs. Gleichzeitig eröffnen sich dadurch neue Möglichkeiten für eine nachhaltigere städtische Mobilität und Logistik. In diesem Kontext haben sich drei Ansätze etabliert: statisches, dynamisches und quasi-dynamisches Laden.

Stationäres Laden

Die Installation von Ladestationen für EVs kann sowohl in privaten Garagen, Einfahrten als auch in öffentlichen Bereichen wie Parkhäusern, Einkaufszentren und öffentlichen Parkplätzen erfolgen. Die Aufladung des EV kann somit Zuhause oder während des Aufenthalts bei der Arbeit oder beim Einkaufen, stattfinden.

Dynamisches Laden

Die Integration von WPT-Systemen in die Fahrbahn ermöglicht das dynamische Laden, bei dem EVs während der Fahrt aufgeladen werden. Dies könnte auf stark frequentierten Straßen, Autobahnen oder speziellen Spuren für Elektrobusse und Lieferfahrzeuge zum Einsatz kommen. Dynamische Ladesysteme reduzieren die Abhängigkeit von stationären Ladestationen und gewährleistet eine kontinuierliche Energieversorgung, was zu einer signifikanten Erhöhung der Reichweite führt.

Quasi-dynamisches Laden

Die als quasi-dynamisches Laden bezeichnete Methode verbindet die jeweiligen Vorteile der beiden zuvor genannten Ansätze. Das Konzept des quasi-dynamischen Ladens erlaubt die Durchführung des Ladevorgangs während kurzer Stopps oder langsamer Fahrten an strategisch ausgewählten Punkten (z. B. Kreuzungen, Bushaltestellen oder Ampeln). Diese Methode erfordert jedoch weniger Infrastrukturinvestitionen als das voll dynamische Laden und verbessert gleichzeitig die Energieverfügbarkeit und Effizienz in städtischen Gebieten.

Die Auswahl eines geeigneten Ladekonzepts ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Dabei spielen die spezifischen Anforderungen der Nutzer, die Verfügbarkeit der Infrastruktur sowie die städtischen Gegebenheiten eine entscheidende Rolle. Jedes

dieser Ladekonzepte bringt spezifische Vorteile und Herausforderungen mit sich. Im Folgenden werden einige wesentliche Anwendungsbereiche vorgestellt:

Flottenmanagement und öffentliche Verkehrsmittel

In urbanen Räumen werden WPT-Systemen zunehmend für elektrische Busse eingesetzt. Die Installation der Ladeplatten ist an Bus- und Endhaltestellen möglich, sodass die Busse während der regulären Stopps ohne Betriebsunterbrechung aufgeladen werden können [82, 108–110]. Auch an Taxiständen oder an Standorten für Carsharing-Fahrzeuge erleichtern WPT-Systeme das Aufladen und stellt sicher, dass die EVs jederzeit einsatzbereit sind [81, 111, 112].

Kommerzielle und industrielle Anwendungen

In großen Lagerhäusern oder Produktionsstätten werden AGVs eingesetzt, um Materialien und Waren autonom zu transportieren. Mittels WPT-Systeme ist es möglich, die EVs kontinuierlich aufzuladen, ohne dass ein menschliches Eingreifen erforderlich ist [113, 114]. Dazu genügt es, dass die EVs an bestimmten Ladestationen stoppen. Die Installation an strategischen Orten kann für elektrische Lieferfahrzeuge, die in urbanen Gebieten zum Einsatz kommen, eine Erleichterung des Ladevorgangs sowie eine Steigerung der betrieblichen Effizienz bewirken.

Mikromobilität

Der Einsatz von WPT-Systemen ist insbesondere für kleinere elektrische Fahrzeuge wie E-Bikes und E-Roller von Vorteil [115, 116]. Ladestationen an frequentierten Orten (z. B. Haltestellen, Bahnhöfen oder Parkplätzen) bieten den Nutzern die komfortable Möglichkeit, ihre Fahrzeuge zwischen den Fahrten aufzuladen.

Autonome Elektrofahrzeuge

Für autonome EVs kann das induktive Laden eine wesentliche Technologie darstellen, um sicherzustellen, dass diese EVs ohne die Anwesenheit eines Fahrers im Einsatz verbleiben können, ohne dass eine Verbindung zu einer externen Stromquelle erforderlich ist [82, 117].

Maritime und luftfahrttechnische Anwendungen

Die Installation von WPT-Systemen in Hafenanlagen ermöglicht die Aufladung elektrischer Fähren oder kleiner Schiffe während des Andockens [118]. Der Bedarf an WPT-Systemen für Meeressysteme, welche einen übermäßigen Energieverbrauch aufweisen, wie bspw. autonome Unterwasserfahrzeuge (AUV), Unterwasser-Sensorknoten oder Meeresüberwachungsgeräte, ist evident [8]. Im Rahmen der Forschung im Bereich der Luftfahrt wird die Möglichkeit des induktiven Ladens untersucht, um Drohnen [119, 120] oder kleine Elektroflugzeuge aufzuladen, wenn sie auf speziellen Ladeplattformen landen.

3 Grundlagen und Auswirkungen: Elektromagnetische Felder

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine detaillierte Untersuchung der Bedeutung von EMF im Kontext induktiver Ladesysteme sowie deren potenzielle Umweltauswirkungen. Zunächst wird dargelegt, auf welche Weise EMF generiert werden. Grundsätzlich führen elektrische Spannungen und Ströme zu elektromagnetischen Wellen, welche mehr oder weniger abgestrahlt werden und sich im freien Raum ausbreiten. In Bezug auf die Strahlungsart erfolgt eine Differenzierung zwischen elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern. Neben den natürlich vorkommenden Feldern, wie bspw. dem Magnetfeld der Erde und dem elektrischen Feld der Atmosphäre, entstehen elektrische Felder überall dort, wo elektrische Spannungen bestehen. Magnetische Felder entstehen dort, wo elektrische Ströme fließen. Die Einflüsse dieser Felder auf biologische Systeme, wie den Menschen und Tiere, werden unter dem Begriff „Elektromagnetische Umweltverträglichkeit“ (EMVU) zusammengefasst und anschließend näher thematisiert. Die Felder treten gleichzeitig mit elektrischen und magnetischen Komponenten auf und können sowohl thermische als auch nicht thermische Effekte hervorrufen. Darüber hinaus können sie direkt Nerven stimulieren oder zu Veränderungen in den Zellen führen. Zum Schutz der Menschen werden in Richtlinien und Normen Expositionsgrenzwerte definiert, welche weder in der allgemeinen Öffentlichkeit noch am Arbeitsplatz überschritten werden dürfen. Abschließend werden die internationalen und nationalen Regelungen detailliert ausgeführt sowie auf die definierten Grenzwerte eingegangen.

Die in diesem Kapitel dargelegten Inhalte basieren zu einem Teil auf [121–123].

3.1 Einführung in elektromagnetische Felder

Elektromagnetische Felder sind ein Bestandteil des elektromagnetischen Spektrums. Das elektromagnetische Spektrum erstreckt sich über den gesamten Bereich von den statischen elektrischen und magnetischen Feldern über die optische Strahlung bis zur sehr energiereichen Gammastrahlung. Der Bereich des elektromagnetischen Spektrums, der sich zwischen den statischen elektrischen und magnetischen Feldern und

der Infrarot-Strahlung befindet, wird üblicherweise als „elektromagnetische Felder (EMF)“ bezeichnet. Die Einteilung der EMF sowie des gesamten elektromagnetischen Spektrums erfolgt anhand der physikalischen Eigenschaften in unterschiedliche Bereiche. Dies erfolgt entweder auf Basis der Frequenz (in Hz) oder der Wellenlänge (in m). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist ein entscheidender Faktor bei der Verbindung von Frequenz und Wellenlänge. Mit steigender Frequenz werden die Wellenlängen kürzer, während bei niedrigen Frequenzen entsprechend große Wellenlängen auftreten. In der Abbildung 3.1 wird das gesamte elektromagnetische Spektrum mit beispielhaften Anwendungsbereichen aufgezeigt.

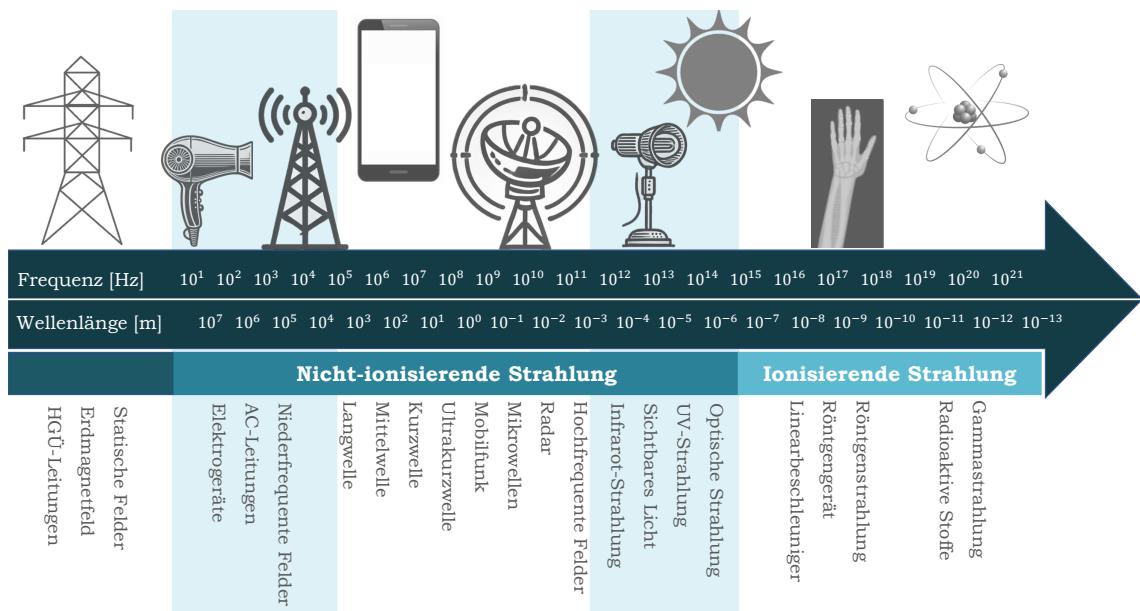


Abbildung 3.1: Das elektromagnetische Spektrum (Datenquelle: [124]).

In diesem Kontext ist eine Differenzierung des elektromagnetischen Spektrums in nicht-ionisierende und ionisierende Strahlung erforderlich (siehe Abbildung 3.1). Nicht-ionisierende Strahlung bezeichnet eine Form elektromagnetischer Strahlung, die nicht über die notwendige Energie verfügt, um Atome oder Moleküle zu ionisieren, d. h. Elektronen aus Atomen oder Molekülen herauszulösen. Das Spektrum dieser Art von Strahlung umfasst ein breites Spektrum elektromagnetischer Wellen, welches in zahlreichen Bereichen des täglichen Lebens Anwendung findet. Statische Magnetfelder haben ihren natürlichen Ursprung im Erdmagnetfeld. Permanente elektrische Felder finden sich in der Atmosphäre zwischen der Erde und der Ionsphäre und treten bspw. als Schönwetterfeld auf. Niederfrequente elektrische Felder entstehen an elektrischen Leitungen und Elektrogeräten, an denen eine Spannung anliegt. Niederfrequente magnetische Felder sind typisch für alle elektrischen Geräte und Leitungen, die mit Wechselstrom betrieben werden. Schließlich sind hochfre-

quente EMF in Anwendungen wie Mobilfunk, WLAN oder schnurlosen Telefonen zu finden.

Neben der nicht-ionisierenden Strahlung existiert die ionisierende Strahlung. Auch sie ist eine Form von elektromagnetischer Strahlung und weist eine hinlängliche Energie auf, um Atome oder Moleküle zu ionisieren, d. h. Elektronen aus ihren Atomhüllen zu entfernen. Dies kann sogar zu chemischen Veränderungen und Schäden in Materialien und biologischen Geweben führen. Zu dieser Gruppe zählt u. a. die Röntgen- und Gammastrahlung. Röntgenstrahlung wird in der medizinischen Diagnostik und in der Industrie zur Materialprüfung eingesetzt, da sie zur Erzeugung von Bildern und zur Untersuchung innerer Strukturen genutzt werden kann. Gammastrahlung hingegen entsteht hauptsächlich bei radioaktiven Zerfällen und in bestimmten astrophysikalischen Prozessen. Sie weist noch höhere Energien als Röntgenstrahlen auf und besitzt eine große Durchdringungstiefe in Materie, was sie besonders energiereich und schädlich macht.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wird ausschließlich die nicht-ionisierende Strahlung berücksichtigt, weshalb eine vertiefende Auseinandersetzung im Kontext mit induktiven Ladesystemen mit diesem Thema erfolgt.

Um das Verständnis von EMF zu vertiefen, ist es notwendig, die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten des elektrischen und magnetischen Feldverhaltens zu betrachten. Diese sind in den Maxwell'schen Gleichungen zusammengefasst, welche das theoretische Fundament der Elektrodynamik bilden. Sie bieten einen präzisen Rahmen zur Beschreibung elektrischer Felder durch Ladungen und Ströme, des Verhaltens magnetischer Felder sowie der Wechselwirkung beider Felder in Form elektromagnetischer Wellen.

3.2 Maxwell'sche Gleichungen

Die Theorie des Magnetismus erhielt erst im Jahr 1873 durch James Clerk Maxwell eine vollständige mathematische Grundlage [125]. Die von ihm formulierten vier Maxwell'schen Gleichungen bilden bis heute das Fundament der Elektrodynamik (siehe Abbildung 3.2). Sie beschreiben den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern sowie deren Abhängigkeit von Ladungs- und Stromverteilungen. Diese Beobachtung legt nahe, dass elektrische und magnetische Phänomene eine untrennbare Verbindung aufweisen.

Die Gleichungen können in integraler oder differentieller Form angegeben werden [126]. Die Integralform ermöglicht die Ableitung globaler Aussagen über Wirbel-

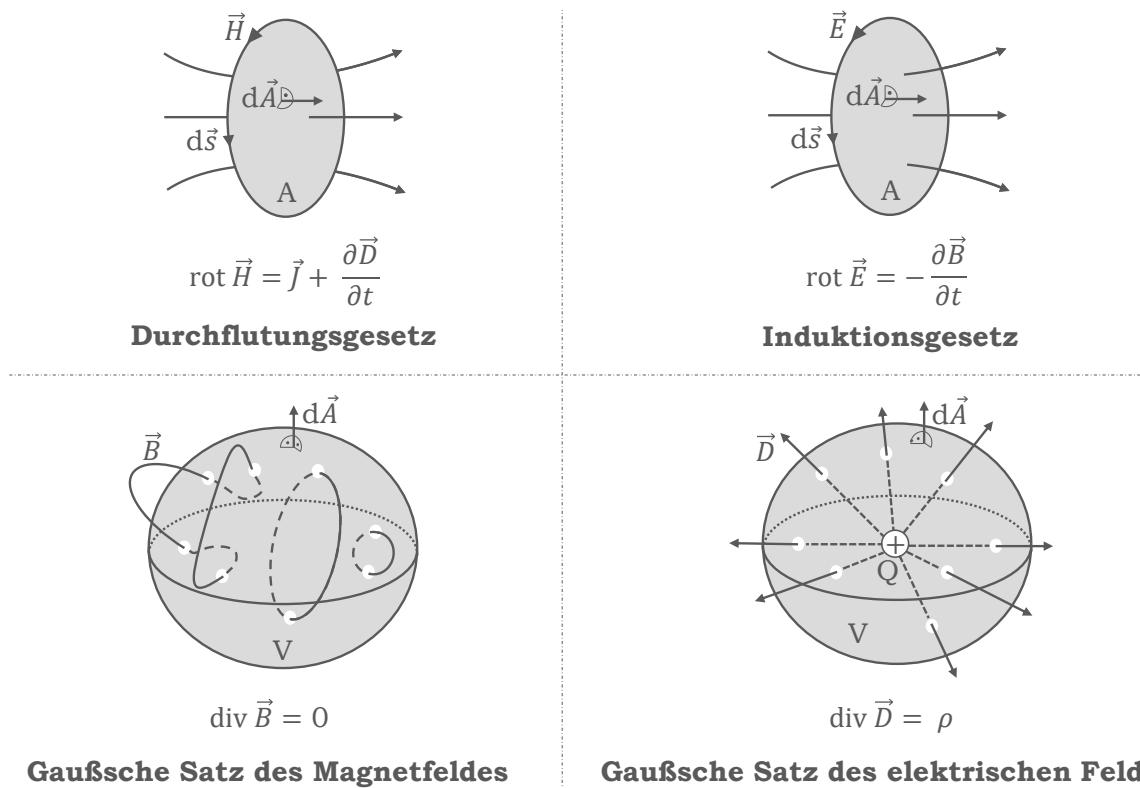


Abbildung 3.2: Übersicht der Maxwell'schen Gleichungen in Differentialform und ihrer physikalischen Bedeutung (Datenquelle: [126]).

und Quellenstärken in einem Integrationsgebiet, wohingegen die Differentialform die entsprechenden lokalen Feldgrößen beschreibt [127].

Die Materialeigenschaften werden über die sogenannten konstitutiven Beziehungen berücksichtigt. So beschreibt

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E}, \quad \vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad \text{und} \quad \vec{J} = \sigma \cdot \vec{E}. \quad (3.1)$$

den Zusammenhang zwischen elektrischer Flussdichte \vec{D} und elektrischer Feldstärke \vec{E} über die Permittivität ϵ , zwischen magnetischer Flussdichte \vec{B} und magnetischer Feldstärke \vec{H} über die Permeabilität μ sowie zwischen Stromdichte \vec{J} und elektrischer Feldstärke über die elektrische Leitfähigkeit σ .

Die Maxwell'schen Gleichungen selbst sind materialunabhängig und besitzen allgemeine Gültigkeit. Die Erweiterung des bestehenden Gesetzes um drei weitere Gesetze – zur elektrischen Polarisation und Magnetisierung – ermöglicht eine umfassende Beschreibung der Ausbreitung elektromagnetischer Felder in Materie. Die daraus

resultierende Gesamtheit bildet ein geschlossenes System, welches sämtliche elektromagnetischen Phänomene erfasst und folglich als zentrales Werkzeug zur Lösung elektromagnetischer Feldprobleme dient.

Die in dieser Arbeit präsentierte Form fungiert als theoretische Grundlage für die weitere Untersuchung. Für die praktische Betrachtung induktiver Ladesysteme werden jedoch meist vereinfachte Formen oder numerische Lösungen herangezogen. Eine ausführliche Herleitung sowie die Integralform der Gleichungen befinden sich im Anhang A.

3.3 Elektromagnetische Verträglichkeit

Der Begriff der EMV bezeichnet die Fähigkeit von elektrischen Geräten und Systemen, in ihrer elektromagnetischen Umgebung ohne Störungen zu arbeiten. Die Zielsetzung der EMV besteht in der Vermeidung ungewollter elektromagnetischer Interferenzen (EMI), welche eine Beeinträchtigung oder gar Beschädigung anderer Geräte zur Folge haben können. Die Problematik der EMI manifestierte sich mit der Einführung der Funkübertragung zu Beginn des 20. Jahrhunderts und gewann in den darauffolgenden Jahrzehnten zunehmend an Relevanz, insbesondere im Kontext der Entwicklung von Transistoren, integrierten Schaltungen und Mikroprozessoren. Mit der Einführung digitaler Systeme und höherer Frequenzen verschärften sich die Interferenzprobleme. Ein System gilt als elektromagnetisch verträglich, wenn es keine Störungen verursacht, unempfindlich gegenüber Störungen von außen ist und sich selbst nicht stört. Das EMV-gerechte Design ist entscheidend für die Funktionsfähigkeit und die Einhaltung gesetzlicher Vorschriften.

Die EMV befasst sich mit der Entstehung, Übertragung und dem Empfang elektromagnetischer Energie, wenn ein einzelner Sender (Quelle) und ein Empfänger (Senke) betrachtet werden. EMI manifestieren sich, wenn die empfangene Energie den Empfänger in einer unerwünschten Weise beeinflusst. Der Energietransfer erfolgt über einen Kopplungsweg zwischen Quelle und Empfänger, wobei dieser häufig auf unbeabsichtigte Weise initiiert wird. In der Abbildung 3.3 ist das EMV-Modell skizziert. In der EMV werden vier grundlegende Mechanismen der Kopplung unterschieden: leitend, kapazitiv, induktiv und strahlend. In vielen Fällen sind Kopplungswege eine Kombination aus mehreren dieser Mechanismen, was die Identifizierung selbst bei bekannter Quelle und bekannter Senke erschwert.

Die Etablierung internationaler Standards stellt einen wesentlichen Aspekt bei der Bewältigung elektromagnetischer Störungen dar. Für induktive Ladesysteme sind insbesondere die Vorschriften der **UN/ECE-R10**, die Grenzwerte und Messverfahren

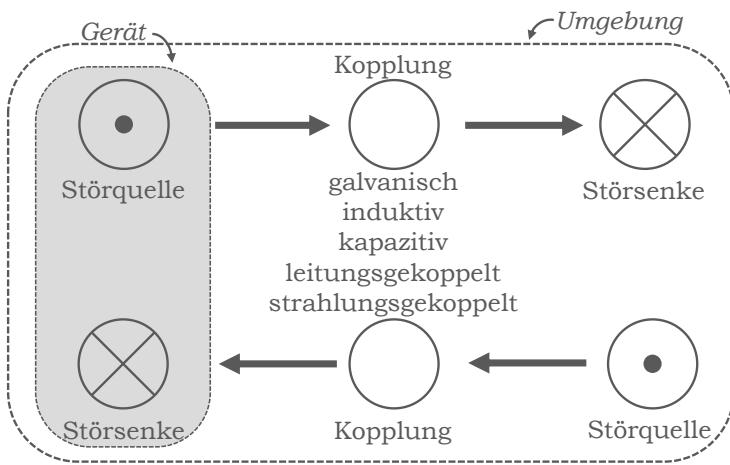


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung des EMV-Modells.

nach **CISPR 11**, die Normenreihe **IEC 61980** sowie die **SAE J2954** von Relevanz. Die vorliegenden Regelwerke definieren spezifische Grenzwerte und Prüfverfahren, deren Ziel die Sicherstellung eines reibungslosen Betriebs von Ladesystemen ist. Dies gewährleistet, dass die Systeme keine unzulässigen Störungen verursachen. Ein besonderer Fokus liegt dabei auf der Festlegung geeigneter Frequenzbereiche. Für induktive Ladesysteme im Fahrzeughbereich ist insbesondere der Bereich um 85 kHz von Relevanz, da er einerseits eine effiziente magnetische Kopplung bei praktikablen Spulengrößen ermöglicht und andererseits Interferenzen mit bestehenden Funkdiensten vermeidet (siehe Abbildung 3.4). Im Automobilkontext spielen andere Standards, wie AirFuel oder Qi, die in deutlich höheren Frequenzbereichen arbeiten, hingegen keine Rolle. Die Wahl des Frequenzbandes beeinflusst die EMV-Betrachtung unmittelbar, da sich die Ausbreitung und Kopplung elektromagnetischer Felder stark frequenzabhängig verhält.

WPT-Systeme operieren mit hohen Strömen und Schaltfrequenzen, wodurch zeitlich veränderliche Magnetfelder entstehen. Diese ermöglichen einerseits die Energieübertragung, wirken andererseits jedoch auch als Störquelle. Zur Sicherstellung der Einhaltung der EMV-Anforderungen werden unterschiedliche Maßnahmen ergriffen. An der Quelle lassen sich Emissionen durch den Einsatz von Filtern, optimierten Schaltungstopologien oder sanften Schaltflanken reduzieren. Es konnte festgestellt werden, dass auf dem Kopplungsweg räumliche Trennung, Symmetrierung oder Abschirmungen eine signifikante Wirksamkeit aufweisen. Schließlich tragen robuste Designs der Fahrzeug-Elektronik zur Erhöhung der Störfestigkeit der Senke bei. Diese Strategien sind von essenzieller Bedeutung, um die Einhaltung der normativen Grenzwerte zu gewährleisten und eine sichere Integration von WPT-Systemen in Fahrzeuge und den öffentlichen Raum zu ermöglichen.

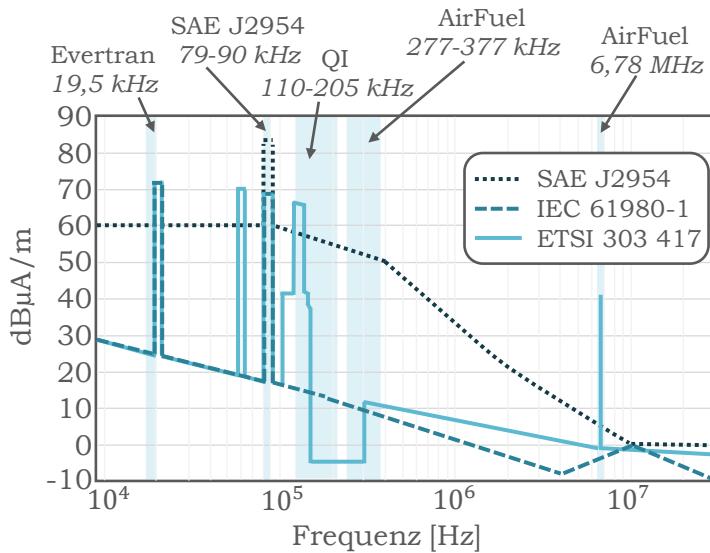


Abbildung 3.4: Grenzwerte für die Störaussendung nach verschiedenen Normen (Datenquelle: [29]).

In der vorliegenden Arbeit wird die EMV daher insbesondere unter dem Aspekt untersucht, dass WPT-Systeme trotz hoher Leistungen und Schaltfrequenzen die bestehenden gesetzlichen Grenzwerte einhalten müssen. Weiterführende Details zu Prüfaufbauten und Messungen befinden sich im Anhang B.

Die EMV zielt auf das störungsfreie Zusammenwirken technischer Systeme ab, wohingegen sich die EMVU mit dem Schutz von Menschen und Umwelt vor den Auswirkungen elektromagnetischer Felder befasst. WPT-Systeme erzeugen im Betrieb zeitlich veränderliche Magnetfelder, die im Nahbereich zu einer Exposition führen können. In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf die Bewertung der magnetischen Felder gelegt, welche als Grundlage zur Bestimmung der Exposition dienen. Die Bewertung dieser Felder erfolgt anhand international anerkannter Grenzwerte, deren Ziel die Sicherstellung ist, dass keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen auftreten.

3.4 Elektromagnetische Umweltverträglichkeit

EMF aller Frequenzen gehören zu den am schnellsten wachsenden Umweltbelastungen, die häufig Anlass zu Besorgnis und Spekulationen geben. Die zunehmende Exposition der Bevölkerung gegenüber EMFs ist ein Phänomen, das alle Bevölkerungsgruppen betrifft und durch den technologischen Fortschritt weiter zunehmen

wird [138]. Es ist bekannt, dass EMF biologische Effekte auslösen können, wobei nicht alle als gesundheitsschädlich einzustufen sind. Ein biologischer Effekt bezeichnet jede messbare Veränderung in einem biologischen System, die durch äußere Einflüsse bedingt ist. Ein gesundheitlicher Effekt hingegen bezeichnet eine messbare Beeinträchtigung der Gesundheit. Ein biologischer Effekt muss nicht zwangsläufig zu einem gesundheitlichen Schaden führen.

EMFs werden der Gruppe der nicht-ionisierenden Strahlung (NIR) zugeordnet. Der Begriff „NIR“ umfasst elektromagnetische Wellen, die nicht ausreichend Energie besitzen, um Atome oder Moleküle zu ionisieren. In diesem Kontext sind zudem mechanische Wellen wie Infraschall und Ultraschall zu nennen. Im Gegensatz zur ionisierenden Strahlung ionisiert NIR-Strahlung keine Moleküle, da sie nicht über ausreichend hohe Energieniveaus verfügt. In der Regel wird eine Photonenenergie von etwa $1,987 \times 10^{-18} \text{ J}$ (12,4 eV) benötigt. Obschon sich NIR auf Strahlungsenergie bezieht, die anstelle der Erzeugung geladener Ionen beim Durchgang durch Materie nur ausreichend Energie zur Anregung besitzt, ist in der wissenschaftlichen Literatur belegt, dass sie biologische Effekte verursachen kann [51].

Das NIR-Spektrum lässt sich in zwei Hauptbereiche untergliedern, nämlich den der optischen Strahlung und den der elektromagnetischen Felder. Eine weitere Unterteilung des optischen Bereichs erfolgt in die Spektralbereiche Ultraviolett, Sichtbar und Infrarot. Das elektromagnetische Spektrum wird in der Regel in Niederfrequenz (LF) und Hochfrequenz (HF) unterteilt.

3.4.1 Kopplungsmechanismen

Der Mensch ist in seinem täglichen Leben einer Vielzahl von EMF ausgesetzt. In der Natur treten EMF bspw. in Form von Tageslicht oder Blitzen bei Gewittern auf. Im Gegensatz dazu werden technische Geräte sowie Anlagen als Quellen für die Erzeugung von EMF genutzt. Denn jeder elektrische Leiter ist von einem elektrischen und einem magnetischen Feld umgeben. Die Existenz eines magnetischen Feldes ist ausschließlich an den Fluss eines elektrischen Stroms durch den Leiter geknüpft. Demgegenüber ist das elektrische Feld in jedem Bereich vorhanden, in dem eine elektrische Spannung anliegt. Aufgrund der Wechselstromversorgung mit einer Frequenz von 50 Hz treten im Alltag hauptsächlich elektrische und magnetische Wechselfelder auf. Statische elektrische und magnetische Felder hingegen manifestieren sich bspw. in Gleichstromanlagen.

Die Art und Weise, wie EMF mit dem menschlichen Körper interagieren, ist von der Art des Feldes sowie von der Frequenz abhängig. Bei niedriger Frequenz ($f < 10 \text{ MHz}$) induzieren zeitlich veränderliche elektrische und magnetische Felder innerhalb des Körpers elektrische Felder und Ströme, welche die Stimulation elektrisch

erregbarer Gewebe wie Nerven und Muskeln verursachen. Die adäquaten dosimetrischen Größen zur Erfassung dieser Phänomene sind die induzierte Stromdichte sowie das interne elektrische Feld. In der Vergangenheit basierten die von internationalen Schutzorganisationen empfohlenen Grundbeschränkungen auf der induzierten Stromdichte. Aktuell wird jedoch das interne (in situ) elektrische Feld als Hauptursache für gesundheitsschädliche Effekte angenommen, weshalb dieses als Grundlage für die empfohlenen Beschränkungen dient.

Es sei zunächst festgehalten, dass der Niederfrequenz-Kopplungsmechanismus für einfallende Magnetfelder und elektrische Felder unterschiedlich ist. Im Gegensatz zu technischen Materialien besitzen lebende Körper keine signifikanten ferromagnetischen Eigenschaften. Dadurch wird bei ihrer Anwesenheit das Gleichstrom- oder Niederfrequenz-Magnetfeld nicht verzerrt. Folglich können Magnetfelder den lebenden Körper vollständig durchdringen, wobei dieser gegenüber der Wirkung des Magnetfeldes nahezu transparent ist. Niederfrequente Magnetfelder interagieren in geringem Maße mit lebenden Organismen, wobei ein geringer interner Strom induziert wird, der durch den folgenden Mechanismus erklärt werden kann. Gemäß Faradays Gesetz der Induktion induziert ein zeitlich veränderliches Magnetfeld zeitlich veränderliche elektrische Felder im menschlichen Körper, da biologische Gewebe leitfähig sind. Diese erzeugen wiederum interne Ströme. Daher lassen sich induzierte Ströme ähnlich wie Wirbelströme beschreiben, bei denen der Stromfluss ebenfalls geschlossene Schleifen bildet (vgl. Abbildung 3.5 b)).

Die Stärke dieser Ströme ist abhängig von verschiedenen Faktoren, darunter das einfallende Feld, die Körperleitfähigkeit sowie die Frequenz. Die induzierte Stromdichte ist im Allgemeinen von geringer Intensität, während das interne elektrische Feld proportional zur induzierten Stromdichte durch die Gewebeleitfähigkeit ist. Dennoch können bereits relativ geringe Werte des internen elektrischen Feldes für einige gesundheitsschädliche Effekte wie die Elektrostimulation im zentralen und peripheren Nervensystem (ZNS und PNS) verantwortlich sein.

Auch zeitlich veränderliche elektrische Felder induzieren Ströme innerhalb des menschlichen Körpers (siehe Abbildung 3.5 c)). Ein niederfrequentes einfallendes elektrisches Feld kann den menschlichen Körper durchdringen, der aus biologischen Geweben besteht, welche disperse dielektrische Medien sind. Für ein vertikal einfallendes Feld ist eine Stromflussrichtung vom Kopf zum Boden zu beobachten. Die Werte dieser Ströme sind jedoch äußerst gering und lediglich ein außerordentlich intensives elektrisches Feld ist imstande, gesundheitsschädliche Effekte zu induzieren. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Anwesenheit des menschlichen Körpers eine signifikante Veränderung der Feldverteilung zur Folge hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der menschliche Körper einen elektrischen Leiter darstellt und die Feldlinien des äußeren elektrischen Feldes nahezu senkrecht zur Körperoberfläche

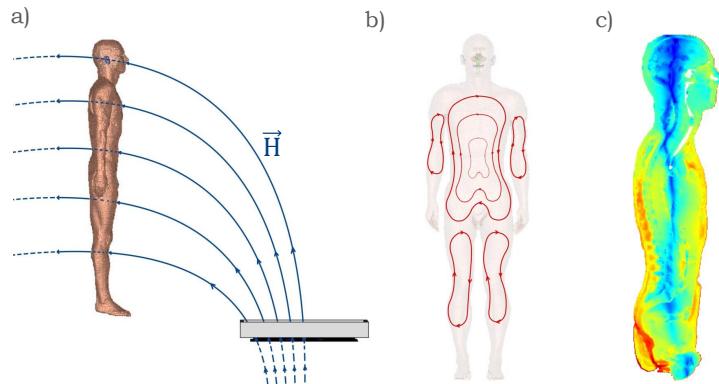


Abbildung 3.5: a) Exposition eines menschlichen Körpers durch niederfrequente magnetische Felder eines WPT-Systems, b) die im Körper induzierten Wirbelströme, c) die im Körper induzierten elektrischen Felder [122].

verlaufen. Zudem ist das interne elektrische Feld deutlich kleiner als das einfallende elektrische Feld.

Bei Frequenzen über 10 MHz gewinnt die Absorption und Dissipation elektromagnetischer Energie in Geweben an Bedeutung [139]. Die Absorption führt zu einer Erhöhung der Körpertemperatur. Diese biologischen Wirkungen werden als thermische Effekte bezeichnet. Die biologisch wirksame Größe ist die spezifische Absorptionsrate (SAR), welche die Exposition gegenüber periodischen Feldern in Watt pro Kilogramm (W kg^{-1}) angibt. Die Absorption ist frequenzabhängig, wobei sich ein Effekt auf der Haut einstellt. Bei Frequenzen über 10 GHz ist die Energieabsorption auf oberflächliche Körpergewebe beschränkt, sodass die Wechselwirkung besser durch die Leistungsdichte der auf den Körper auftreffenden elektromagnetischen Welle, gemessen in Watt pro Quadratmeter (W m^{-2}), dargestellt werden kann. Im Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 10 MHz koexistieren Stimulationseffekte und thermische Effekte, wobei sich mit zunehmender Frequenz eine Verschiebung der relativen Bedeutung vom ersten zum zweiten Effekt beobachten lässt. Im HF-Bereich zeigt sich eine frequenzabhängige Variation der Kopplung zwischen EMF und dem menschlichen Körper, was sich in einer Variation der spezifischen Absorptionsrate äußert. Dieses Verhalten ist durch ein typisches Resonanzverhalten gekennzeichnet. Die Resonanzfrequenz, bei der die Absorptionsrate ihr Maximum erreicht, ist in erster Linie von Körpergröße und -haltung abhängig.

3.4.2 Biologische Effekte

Die biologischen Effekte werden in der Regel in kurzfristige und langfristige Effekte kategorisiert. Kurzfristige Effekte manifestieren sich unmittelbar nach der Exposition gegenüber hohen Feldstärken und können die Gesundheit beeinträchtigen. Im Gegensatz dazu können langfristige Effekte auch mehrere Jahre nach der Exposition auftreten, selbst bei relativ niedrigen Feldstärken.

In Anbetracht automobiler WPT-Systeme ist es erforderlich, sich primär auf die Exposition gegenüber Magnetfeldern im relevanten Frequenzbereich zu fokussieren, welcher einige zehn Kilohertz bis zu einigen zehn Megahertz umfasst. Dies impliziert, dass die Exposition gegenüber statischen Feldern, elektrischen Feldern und Hochfrequenzfeldern in diesem Kapitel keine ausführliche Betrachtung erfährt. Es existieren etablierte biologische Effekte, die sich aus akuten Expositionen bei hohen Feldstärken (von über 100 mT für Magnetfelder) ergeben und durch bekannte biophysikalische Mechanismen erklärt werden können. Externe niederfrequente Magnetfelder induzieren elektrische Felder und elektrische Ströme im menschlichen Körper, wobei hochintensive Felder eine Stimulation von Nerven und Muskeln sowie Variationen in der Erregung der Zellen des ZNS verursachen [139]. Es besteht derzeit Konsens darüber, dass eine Exposition gegenüber niederfrequenten elektrischen Feldern gut definierte kurzfristige biologische Reaktionen hervorrufen kann, die von Wahrnehmung bis zu Belästigung durch Oberflächenladungseffekte reichen. Des Weiteren sind lediglich die Stimulation des ZNS und des PNS sowie die Induktion von Phosphen in der Netzhaut, einer Wahrnehmung von schwachem, flimmern- dem Licht im Randbereich des Gesichtsfeldes, als gut etablierte kurzfristige Effekte bei niederfrequenten Magnetfeldern zu nennen. Die Netzhaut stellt einen integralen Bestandteil des ZNS dar und wird als ein geeignetes, wenngleich konservatives Modell für die Untersuchung von durch induzierte elektrische Felder bedingten Effekten auf die neuronalen Schaltkreise des ZNS im Allgemeinen angesehen [52]. Die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern kann im menschlichen Körper elektrische Felder induzieren, deren Frequenz bis zu 10 MHz beträgt. Nerven können durch EMFs stimuliert werden [140]. Die Ausprägung dieser Stimulation variiert in Abhängigkeit von der Frequenz, wobei sie typischerweise als „Kribbeln“ bei Frequenzen um 100 kHz beschrieben wird. Mit zunehmender Frequenz überwiegen Heizwirkungen, während die Wahrscheinlichkeit einer Nervenstimulation abnimmt. Bei einer Frequenz von 10 MHz wird die Wirkung des elektrischen Feldes typischerweise als „Wärme“ beschrieben [53]. Dies impliziert, dass thermische Effekte ab einer Frequenz von etwa 100 kHz einsetzen und bei Frequenzen über 10 MHz vorherrschen. Die Zielsetzung von Richtlinien zur Hochfrequenz-Exposition (HF) besteht in der Kontrolle des durch HF-Strahlung verursachten Temperaturanstiegs, um gesundheitliche Schäden zu vermeiden. Allerdings beschränken sich die Maßnahmen auf

den Temperaturanstieg, nicht auf die absolute Temperatur, da diese von einer Vielzahl externer Faktoren wie der Umgebungstemperatur, der Kleidung und der Arbeitsumgebung beeinflusst wird. Das Ziel besteht in der Verhinderung signifikanter Temperaturerhöhungen, während normale physiologische Schwankungen unberührt bleiben. Eine leichte Erwärmung kann für Personen mit niedriger Körpertemperatur angenehm sein, während eine solche Erwärmung für Personen mit hoher Körpertemperatur als unangenehm empfunden wird [52].

Es gibt wissenschaftliche Belege für akute Kurzzeiteffekte EMF, aber die Möglichkeit langfristiger negativer Effekte durch chronische Exposition unterhalb der akuten Schwellenwerte kann nicht ausgeschlossen werden [139]. Langzeiteffekte wurden vor allem für Stromleitungen und schnurlose Telefone untersucht, da die Öffentlichkeit diesen EMF-Quellen häufig ausgesetzt ist. Besondere Aufmerksamkeit gilt dem möglichen Zusammenhang zwischen extrem niederfrequenten Magnetfeldern (ELF) und Leukämie bei Kindern. Die Internationale Agentur für Krebsforschung (IARC) stufte im Jahr 2001 ELF-Magnetfelder als „möglicherweise krebserregend für den Menschen“ (Gruppe 2B) ein [141], basierend auf Studien [142, 143], die eine Verdopplung der Fälle von Leukämie bei Kindern bei einer Exposition über 0,3 mT bis 0,4 mT durch Stromleitungen ($f = 50 \text{ Hz}/60 \text{ Hz}$) zeigten.

Im Jahr 2012 nahm die IARC eine Bewertung hochfrequenter elektromagnetischer Felder (HF-EMF) vor, wobei sich Hinweise auf eine karzinogene Wirkung beim Menschen ergaben [144]. Studien belegen eine Korrelation zwischen der Nutzung drahtloser Telefone und einem erhöhten Risiko für Gliome (40 % höheres Risiko bei über 30 min täglicher Nutzung über 10 Jahre) sowie Akustikusneurinome. Auch bei Tieren konnten begrenzte Hinweise auf eine karzinogene Wirkung festgestellt werden. In der Konsequenz wurden hochfrequente elektromagnetische Felder im Jahr 2011 in Gruppe 2B („möglicherweise krebserregend für den Menschen“) eingestuft.

Die Langzeitwirkungen von Nieder- und Hochfrequenzfeldern wurden bereits Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen. Allerdings besteht weiterhin Forschungsbedarf hinsichtlich der Zwischenfrequenz (IF)-Anwendungen, zu denen bspw. WPT-Systeme in Fahrzeugen zählen. Die IF-Felder befinden sich in einem Spektrum zwischen den ELF- und HF-Feldern und werden durch Quellen wie Induktionskochfeldern, Bildschirmen und Radiosendern erzeugt. Obschon die Exposition in der Regel als gering zu erachten ist, besteht bei Radiosendern und Schweißarbeiten die Möglichkeit einer Überschreitung der Grenzwerte, sodass entsprechende Vorsichtsmaßnahmen zu treffen sind. Akute, kurzfristige Effekte von IF-Feldern sind bereits Gegenstand wissenschaftlicher Untersuchungen gewesen, jedoch liegen bislang keine Erkenntnisse zu den langfristigen Risiken vor.

Für zukünftige Technologien wie automobile WPT-Anwendungen steht derzeit kein fundiertes Wissen über potenzielle Gesundheitsrisiken für den Menschen zur Verfügung. Um potenzielle Langzeitrisiken – auch wenn sie nur hypothetischer Natur

sind – zu verhindern bzw. zu minimieren, haben einige nationale Regierungen sowie lokale Behörden Maßnahmen implementiert, welche wissenschaftlich fundierte Expositionsgrenzwerte ergänzen oder ersetzen [139]. Diese Maßnahmen basieren häufig auf dem Vorsorgeprinzip, einer Risikomanagementstrategie, die in Fällen großer wissenschaftlicher Unsicherheit zur Anwendung kommt. Sie reflektiert die Erfordernis, präventive Maßnahmen zu implementieren, ohne auf finale wissenschaftliche Belege zu warten [145]. In der Europäischen Union findet der Vorsorgeansatz seitens der Mitgliedsstaaten in Abhängigkeit von den jeweiligen Möglichkeiten in erster Linie zum Schutz der Umwelt Anwendung. Sofern ernsthafte oder irreversible Schäden drohen, darf die fehlende wissenschaftliche Sicherheit nicht als Vorwand dienen, kosteneffiziente Schutzmaßnahmen zu verzögern. Aufgrund der begrenzten Kenntnisse über kurz- und langfristige gesundheitliche Auswirkungen sowie der nur langsamem Fortschritte in diesem Bereich unterliegen Gesetze und technische Vorschriften einer stetigen Weiterentwicklung. Derzeit wenden die meisten Länder in ihren Gesetzen zur Exposition gegenüber EMF das Vorsorgeprinzip an [145].

Die Wirkung von Feldern auf den Menschen ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Dazu zählen die Stärke und die Frequenz der Felder, die Orientierung des Körpers in den Feldern sowie der Abstand des Menschen zur Feldquelle. Mit zunehmendem Abstand nimmt die Stärke der Felder ab. Bei elektrischen Feldern sind zudem die anatomischen Charakteristika des menschlichen Körpers, insbesondere die Querschnittsfläche, die Form und die Haltung in Relation zur Richtung des Feldes, sowie die Erdung des Körpers von Relevanz. Eine grafische Darstellung des elektromagnetischen Spektrums sowie der damit einhergehenden biologischen Effekte findet sich in Abbildung 3.6.

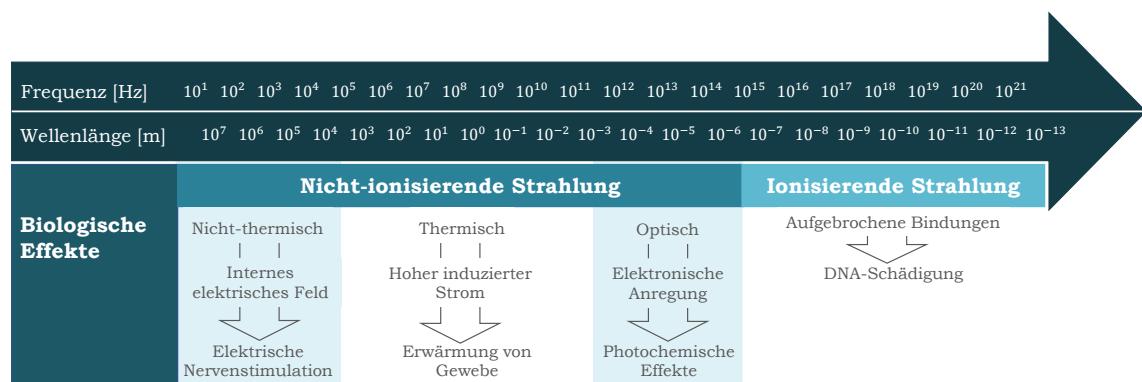


Abbildung 3.6: Elektromagnetisches Spektrum und die damit verbundenen biologischen Effekte.

3.4.3 Internationale Standards und Normen

Elektromagnetische Felder sind für die menschlichen Sinne nicht wahrnehmbar, sodass eine bewusste Wahrnehmung ihrer Einwirkung nicht möglich ist. Dies ist einer der wesentlichen Gründe, die für die Implementierung von Schutzmaßnahmen gegen die Exposition durch elektromagnetische Felder sprechen. Tatsächlich sind einige gesundheitliche Auswirkungen im Zusammenhang mit kurzfristiger Exposition gegenüber hochintensiven Feldern wissenschaftlich nachgewiesen worden und bilden die Grundlage für internationale Expositionsrichtlinien, um Arbeiter und die allgemeine Bevölkerung vor gesundheitlichen Auswirkungen durch elektromagnetische Felder zu schützen.

Die Expositionsgrenzwerte für Emissionen aus elektromagnetischen Systemen werden durch internationale und nationale Standards, Richtlinien und Vorschriften definiert. Die derzeit weitestgehend verbreiteten Empfehlungen basieren auf der Richtlinie der International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) und der Standards des Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Auch seitens der World Health Organization (WHO) werden sie als maßgeblich anerkannt. Kontinuierliche Verbesserungen in rechnerischen und experimentellen Methoden sind wesentlich, um eine wissenschaftliche Grundlage für Produktexpositionenstandards und Konformitätsbewertungsmethoden zu entwickeln. Mehrere Normungsorganisationen (u. a. IEEE, ICNIRP, ISO usw.) sind für die Sicherheit der menschlichen Exposition, die Produktkonformität und medizinische Geräte verantwortlich [146].

Die geltenden Vorschriften unterscheiden zwischen zwei Kategorien von exponierten Personen. Die Allgemeinbevölkerung sowie Personen, die der beruflichen Exposition ausgesetzt sind. Die Expositionsgrenzwerte für die Allgemeinbevölkerung sind restriktiver als die für berufsbedingt exponierten Personen. Dies ist darin begründet, dass die Allgemeinbevölkerung (unter Berücksichtigung von Kinder, ältere Menschen, Schwangere und Kranke) einer kontinuierlichen Exposition (24 Stunden am Tag über das ganze Jahr) ausgesetzt sein kann und die in vielen Fällen nicht über die Kenntnis verfügt, dass sie durch EMF exponiert wird. Im Gegensatz dazu ist die arbeitende Bevölkerung (erwachsene, gesunde Personen) bewusst, dass sie sich kurzzeitig einer EMF-Exposition aussetzt.

Wie im vorherigen Kapitel dargelegt, erfolgt eine Kategorisierung des elektromagnetischen Spektrums in verschiedene Frequenzbänder auf internationaler Ebene. In der Praxis erfolgt jedoch eine leicht abweichende Einteilung, die im Kontext der EMF-Sicherheit Anwendung findet [147].

- **Niederfrequenz:** bis etwa 100 kHz
 - *Netzfrequenz:* für elektrische Energieanwendungen (bsp. Europa: 50 Hz, Nordamerika: 60 Hz)
 - *Extrem niederfrequente Felder:* 300 Hz - 400 Hz
- **Zwischenfrequenz:** bis etwa 100 MHz
- **Hochfrequenz:** 300 MHz - 300 GHz

Die ICNIRP-Grenzwerte werden in Form von externen Feldern (Referenzwerte) und internen Größen (Basisgrenzwerte) angegeben. Wenn die Referenzwerte überschritten werden, muss eine dosimetrische Analyse durchgeführt werden, um die Einhaltung der Basisgrenzwerte zu bewerten [52, 53].

Die Basisgrenzwerte werden auf einige physikalische Größen im menschlichen Körper angewendet, die bei Überschreitung bestimmter Schwellenwerte für nachgewiesene gesundheitsschädliche Effekte verantwortlich gemacht werden. Die Basisgrenzwerte werden aus den Expositionsschwellenwerten abgeleitet, indem geeignete Reduktionsfaktoren aus Vorsichtsgründen angewendet werden.

Die Referenzwerte sind messbare physikalische Größen und werden definiert, um das Verfahren zur Einhaltung der Vorschriften zu vereinfachen, da es nicht möglich ist, die Basisgrenzwerte im menschlichen Körper einfach zu messen. Die Referenzwerte werden in Bezug auf elektrische Feldstärke, magnetische Feldstärke oder Leistungsdichte in der Luft ohne Berücksichtigung des menschlichen Körpers angegeben. Referenzwerte werden daher als praktische Methode zur Bewertung der Einhaltung von Richtlinien oder Standards verwendet und aus Basisgrenzwerten unter Verwendung mathematischer Modelle für einheitliche Expositionssbedingungen abgeleitet [146]. Die Einhaltung der Referenzwerte garantiert die Einhaltung der Basisgrenzwerte, während das Gegenteil nicht garantiert ist. Daher ist eine weitere Analyse erforderlich, um die Einhaltung der Basisgrenzwerte zu bewerten, wenn die Referenzwerte überschritten werden. Die Bewertung der Einhaltung von niederfrequenten Basisgrenzwerten ist jedoch durch Experimente nahezu unmöglich und durch Simulationen sehr teuer. Schließlich werden auch Referenzwerte für Berührungsströme bis zu 110 MHz bereitgestellt.

Im IEEE C95.1 2019-Standard sind die Grenzwerte sehr ähnlich zu den Basisgrenzwerten und Referenzwerten aus der ICNIRP. Sie werden jedoch anders benannt. Anstelle von Basisgrenzwerten werden dosimetrische Referenzgrenzwerte und anstelle von Referenzwerten werden Expositionswerte verwendet [50].

Die Grenzwerte internationaler Standards und Vorschriften sind nicht dafür vorgesehen, die Exposition von Patienten oder menschlichen Versuchspersonen unter der Obhut von medizinischem Fachpersonal zu regeln. Für diese Gruppe können

andere Risiken und Vorteile gelten, die bei der Festlegung von Grenzwerten zu berücksichtigen sind. Diese Expositionsgrenzwerte verhindern möglicherweise nicht die Interferenz mit medizinischen und anderen Geräten, die eine Anfälligkeit für EMI aufweisen könnten.

Die wichtigsten internationalen Standards und Vorschriften werden kurz beschrieben.

Das Hauptziel der **ICNIRP-Richtlinie 1998** war die Festlegung von Richtlinien zur Begrenzung der EMF-Exposition, die Schutz vor bekannten gesundheitsschädlichen Effekten bieten [51]. Diese Richtlinien wurden aufgehoben und durch neue ICNIRP-Richtlinien ersetzt. Sie gelten jedoch als Meilenstein in der EMF-Sicherheit, da sie die derzeit verwendete Terminologie und viele Definitionen eingeführt haben. In diesen Richtlinien waren die Haupt-Basisgrenzwerte die interne Stromdichte J für Frequenzen bis zu 10 MHz, die SAR für Frequenzen über 100 kHz und die Leistungsdichte für Frequenzen über 10 GHz.

Die **ICNIRP-Richtlinie 2010** gelten zum Schutz exponierter Menschen vor nicht-thermischen gesundheitsschädlichen Effekten bei Frequenzen bis zu 10 MHz (achten Sie, dass im Titel der Richtlinien die obere Frequenz 100 kHz beträgt) [52]. Die als Basisgrenzwert verwendete physikalische Größe ist das interne elektrische Feld E , das die in ICNIRP 1998 als Basisgrenzwert verwendete interne Stromdichte J ersetzt. Die Basisgrenzwerte und Referenzwerte sind in Tabelle 3.1 und 3.2 im Abschnitt 3.4.4 angegeben.

Die **ICNIRP-Richtlinie 2020** gelten für Frequenzen über 100 kHz, um exponierte Menschen vor thermischen gesundheitsschädlichen Effekten zu schützen. Der Hauptunterschied zu ICNIRP 1998 liegt im Gigahertz-Bereich [53].

Der **IEEE C95.1** Standard legt Expositionskriterien und -grenzwerte fest, um vor nachgewiesenen gesundheitsschädlichen Effekten beim Menschen zu schützen, die mit der Exposition gegenüber elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz verbunden sind [50]. Diese Grenzwerte, die Sicherheitsmargen enthalten, werden in Form von dosimetrischen Referenzwerten (DRL) und Expositionssreferenzwerten (ERL) ausgedrückt. DRLs werden in Bezug auf die in situ elektrische Feldstärke, SAR und epitheliale Leistungsdichte ausgedrückt. ERLs, die leichter zu bestimmen sind, sind Grenzwerte für externe elektrische und magnetische Felder, einfallende Leistungsdichte, induzierte und Berührungsströme sowie Berührungsspannungen, die sicherstellen sollen, dass die DRLs nicht überschritten werden. Die Grenzwerte, die vor gesundheitsschädlichen Effekten im Zusammenhang mit der Elektrostimulation von Gewebe sowie lokaler und ganzkörperlicher Erwärmung schützen, sollen auf die beschriebenen menschlichen Expositionssituationen angewendet werden.

Der Rat der EU gab 1999 eine **Empfehlung 1999/519/EG** zur Begrenzung der Exposition der Allgemeinbevölkerung gegenüber EMF ab, einschließlich statischer Felder, ELF-Felder und HF-Felder, Mikrowellen, die den Frequenzbereich von 0 Hz bis 300 GHz umfassen [148]. Für die Empfehlung sollten die EU-Mitgliedstaaten, um ein hohes Maß an Gesundheitsschutz vor elektromagnetischer Exposition zu gewährleisten:

1. einen Rahmen von Basisgrenzwerten (BRs) und Referenzwerten (RLs) als Grundlage annehmen;
2. Maßnahmen gemäß diesem Rahmen umsetzen, in Bezug auf Quellen oder Praktiken, die eine elektromagnetische Exposition der Allgemeinbevölkerung verursachen, wenn die Expositionszeit signifikant ist, mit Ausnahme der Exposition zu medizinischen Zwecken, bei denen die Risiken und Vorteile der Exposition über den BRs ordnungsgemäß abgewogen werden müssen;
3. darauf abzielen, die Einhaltung der Basisgrenzwerte für die öffentliche Exposition zu erreichen.

Die Grenzwerte der Empfehlung sind nahezu identisch mit denen, die in den aufgehobenen ICNIRP-Richtlinien von 1998 definiert sind, verwenden jedoch eine andere Terminologie. Basisgrenzwerte werden als Expositionsgrenzwerte (ELVs) und Referenzwerte als Aktionswerte (ALs) bezeichnet. Die Grenzwerte der Empfehlung 1999/519/EG stehen jedoch im Widerspruch zu denen der heute gültigen ICNIRP-Richtlinien von 2010. Dies stellt ein potenzielles Problem in einigen EU-Mitgliedstaaten dar, die auf restriktivere Empfehlungen verweisen. Bspw. sind bei 85 kHz die RLs in Bezug auf die magnetische Flussdichte in den ICNIRP 1998 6,28 μ T anstatt 27 μ T in den ICNIRP 2010. Der letzte Grenzwert wurde im SAE J2954-Standard berücksichtigt [35].

Die **Richtlinie 2013/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates** legt Mindestanforderungen zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen für ihre Gesundheit und Sicherheit fest, die durch die Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern (statische elektrische, statische magnetische und zeitlich veränderliche elektrische, magnetische und elektromagnetische Felder mit Frequenzen bis zu 300 GHz) während ihrer Arbeit entstehen oder voraussichtlich entstehen [149]. Die Richtlinie deckt alle bekannten direkten biophysikalischen Effekte und indirekten Effekte ab, die durch elektromagnetische Felder verursacht werden. Die in der Richtlinie festgelegten ELVs decken nur wissenschaftlich gut belegte Zusammenhänge zwischen kurzfristigen direkten biophysikalischen Effekten und der Exposition gegenüber elektromagnetischen Feldern ab, nicht jedoch die vermuteten langfristigen Effekte. Die Grenzwerte in Form von ELVs und ALs sind nahezu identisch mit denen der ICNIRP-Richtlinien, werden jedoch gemäß der EU-Empfehlung 1999/519/EG unterschiedlich benannt [148].

Die **26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (26. BImSchV)** definiert Grenzwerte, welche zum Schutz der Bevölkerung vor gesundheitlichen Gefahren durch elektrische und magnetische Felder von Gleichstrom- und Niederfrequenzanlagen festgelegt wurden [150]. Die Verordnung ist seit 1997 in Kraft und wurde im August 2013 novelliert. Sie basiert auf Empfehlungen der deutschen Strahlenschutzkommission (SSK) und der ICNIRP. Den Empfehlungen der genannten Kommissionen liegen die wissenschaftlich nachgewiesenen, gesundheitlich relevanten biologischen Wirkungen zugrunde, die durch die Einwirkung elektrischer und magnetischer Felder ausgelöst werden können. In Bereichen empfindlicher Nutzung (wie Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten oder ähnlichen Einrichtungen) werden strengere Bewertungskriterien herangezogen, als sie von der ICNIRP empfohlen werden.

Die **DGUV Vorschrift 15 (BGV B11)** wird angewendet, wenn Versicherte elektrischen, magnetischen oder elektromagnetischen Feldern im Frequenzbereich 0 Hz bis 300 GHz unmittelbar oder deren mittelbaren Wirkungen ausgesetzt sind [151].

In der Abbildung 3.7 ist die rechtliche Regelung für niederfrequente Felder im europäischen Vergleich abgebildet.

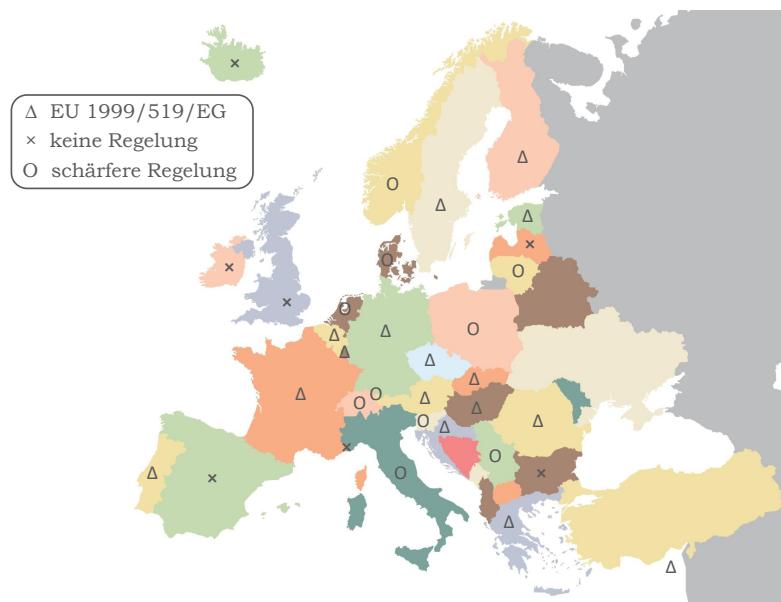


Abbildung 3.7: Rechtliche Regelung für niederfrequente Felder im europäischen Vergleich (Datenquelle: [124]).

3.4.4 Referenz- und Grenzwerte für die Feldexposition

Mit dem Ziel, potenziell gesundheitsschädliche Wechselwirkungen niederfrequenter magnetischer Felder von WPT-Systemen mit dem menschlichen Körper zu minimieren, hat die ICNIRP Basisgrenzwerte für die körperinternen elektrischen Felder für den öffentlichen Raum in Abhängigkeit verschiedener Frequenzbereiche eingeführt, welche in Tabelle 3.1 dargestellt sind [52].

Da eine messtechnische Bewertung der Feldexposition anhand der körperinternen elektrischen Felder nicht möglich ist, wurden aus den ICNIRP-Basisgrenzwerten entsprechende Referenzwerte abgeleitet. Diese bilden die Grundlage für eine Bewertung der Feldexposition anhand von Magnetfeldmessungen im freien Raum. Auf diese Weise kann die Einhaltung der ICNIRP-Basisgrenzwerte sichergestellt werden. In Tabelle 3.2 sind die von der ICNIRP für verschiedene Frequenzbereiche empfohlenen Referenzwerte aufgeführt [52].

Tabelle 3.1. Basisgrenzwerte für die körperinternen elektrischen Felder für die Feldexposition (Datenquelle: [52]).

Frequenz f [Hz]	Körperinternes elektrisches Feld [Vm ⁻¹]
1 Hz - 3 kHz	0,4
3 kHz - 10 MHz	$1,35 \cdot 10^{-4} f$ [Hz]

Tabelle 3.2. Referenzwerte (RMS) für die Feldexposition der allgemeinen Bevölkerung (Datenquelle: [52]).

Frequenz f [Hz]	Magnetische Feldstärke [Am ⁻¹]	Magnetische Flussdichte [T]
1 Hz - 8 Hz	$3,2 \cdot 10^4 / (f[\text{Hz}])^2$	$4 \cdot 10^{-2} / (f[\text{Hz}])^2$
8 Hz - 25 Hz	$4 \cdot 10^3 / f[\text{Hz}]$	$5 \cdot 10^{-3} / f[\text{Hz}]$
25 Hz - 50 Hz	$1,6 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{-4}$
50 Hz - 400 Hz	$1,6 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^{-4}$
400 Hz - 3 kHz	$6,4 \cdot 10^4 / f[\text{Hz}]$	$8 \cdot 10^{-2} / f[\text{Hz}]$
3 kHz - 10 MHz	21	$2,7 \cdot 10^{-5}$

Das in Abbildung 3.8 dargestellte Schema veranschaulicht das Verfahren zur Überprüfung der Einhaltung von EMF-Expositionsgrenzwerten. Zunächst ist es erforderlich, die Funktionsweise des untersuchten Systems zu verstehen, um die entsprechenden Normen oder Richtlinien, nach denen die Grenzwerte festgelegt werden, zu kennen. In der Regel erfolgt eine Entscheidung darüber, welche Standards gelten, anhand der Frequenz des Systems (LF, IF oder HF) und der geografischen Region.

Diesbezüglich sind insbesondere die Standards ICNIRP und IEEE zu nennen. Nach Festlegung der Grenzwerte kann eine Messung des externen Feldes erfolgen, welches anschließend mit den Referenzwerten (RLs) verglichen wird. Die Messung des externen Feldes, welches in der Regel als elektrisches oder magnetisches Feld angegeben wird, muss entweder durchgeführt werden, wenn das System bereits vorhanden ist, oder mittels Simulation, wenn sich das System noch in der Planungsphase befindet. Im Anschluss an die Evaluierung des externen Feldes ist zu verifizieren, ob die Referenzwerte eingehalten werden. Dies impliziert, dass das System konform ist. Im Falle einer Nichteinhaltung der RLs bestehen zwei Optionen: Reduzierung des Feldes durch eine Neugestaltung des Systems bzw. die Anwendung von Minderungsmaßnahmen oder die Bewertung der internen Größen, um die Einhaltung der Basisgrenzwerte (BRs) sicherzustellen.

Sofern die evaluierten Felder die RLs signifikant übersteigen, wird in der Regel eine Neugestaltung des Systems empfohlen, um eine Reduktion des Feldes zu erreichen. Sofern die Felder die RLs jedoch lediglich marginal überschreiten, besteht eine valide Möglichkeit, dass das System den Vorschriften ohne Modifikationen entspricht, insbesondere bei ungleichmäßiger Verteilung des externen Feldes, wie sie bei WPT-Systemen häufig zu beobachten ist. In Übereinstimmung mit den Sicherheitsstandards für EMF ist eine Überprüfung erforderlich, ob das Feld innerhalb des menschlichen Körpers (bspw. das interne elektrische Feld im LF-Bereich oder die SAR im HF-Bereich) den Basisgrenzwerten entspricht. Sofern dies gegeben ist, entspricht das System den Vorgaben. Andernfalls sind Maßnahmen zu ergreifen, um die Konformität herzustellen. Dies kann eine Neugestaltung des Systems oder die Anwendung von Minderungsmaßnahmen wie z. B. Abschirmungen umfassen.

Der Konformitätstest ist aufgrund der Notwendigkeit, das externe Feld mit präzisen und oft kostspieligen Messgeräten exakt zu bestimmen, ein sehr komplexer Prozess. Sofern das gemessene Feld die RLs überschreitet, ist eine Bewertung des internen Feldes durch Simulation erforderlich, wobei eine numerische Dosimetrieanalyse durchzuführen ist. Diese rechnerisch sehr aufwändige Aufgabe stellt insbesondere im LF- und IF-Bereich eine Herausforderung dar. Die Bewertung der externen und internen Felder durch Messungen und Simulationen wird im weiteren Verlauf näher beschrieben und erörtert.

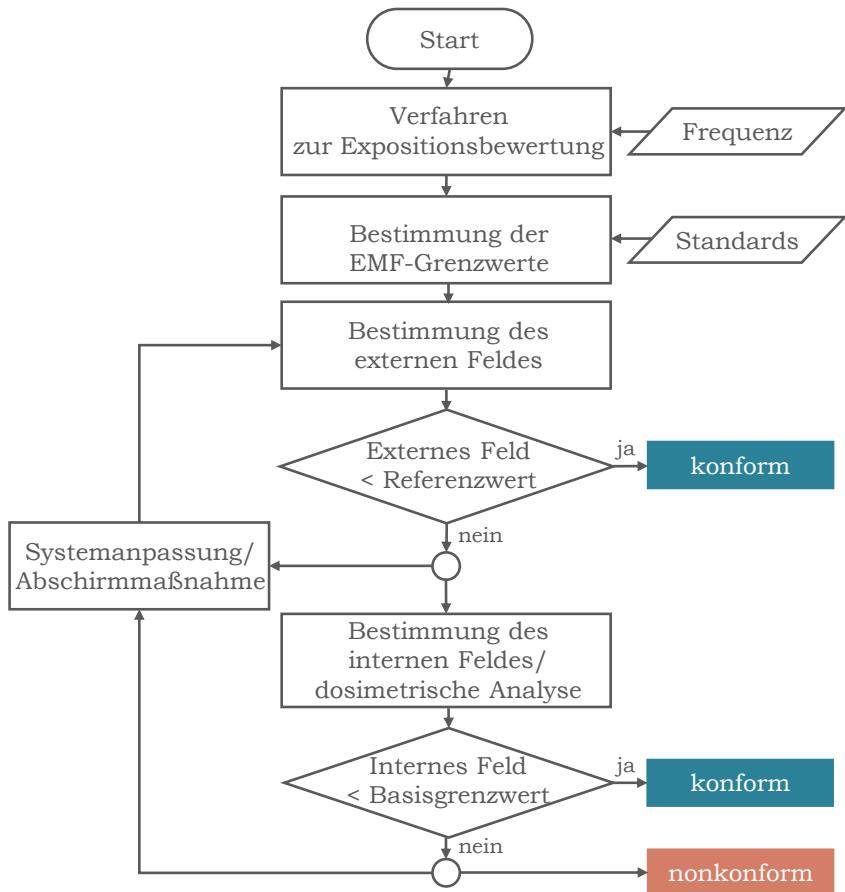


Abbildung 3.8: Bewertungsschema für die Einhaltung der menschlichen Exposition gegenüber EMF in einem zu prüfenden System (Datenquelle: [52]).

4 Evaluierung der Magnetfeldverteilung

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine detaillierte Untersuchung der Magnetfeldverteilung bei WPT-Systemen für EVs. Ein besonderes Augenmerk gilt dabei der Analyse der EMF, welche sowohl durch Simulationen als auch durch praktische Messungen ermittelt werden. Die Evaluierung ist von essenzieller Bedeutung, um die Effizienz des induktiven Ladens zu maximieren und gleichzeitig sicherzustellen, dass die elektromagnetische Strahlung innerhalb der zulässigen Grenzwerte bleibt. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird eine Test Case Study mit einem 22 kW-System analysiert. In diesem Szenario erfolgt die Nachbildung und Validierung der Magnetfeldverteilung unter realen Bedingungen mittels eines Methodenmixes aus Mess- und Simulationsverfahren. In einer weiteren simulationsbasierten Fallstudie wird ein leistungsstärkeres 50 kW-System untersucht.

Das Kapitel ist in mehrere Abschnitte unterteilt, die unterschiedliche Aspekte des Prozesses abdecken. Zuerst wird ein Simulationskonzept präsentiert, welches die Grundlage für die virtuelle Analyse der EMF bildet. Dies umfasst die Modellierung der WPT-Systeme sowie die Berücksichtigung der wesentlichen Materialeigenschaften und Fahrzeugmodelle.

Das Messkonzept definiert die für die praktische Datenerhebung erforderlichen Messgeräte sowie die methodische Vorgehensweise. Im Rahmen der nachfolgenden Fallstudien erfolgt eine Analyse eines 22 kW sowie eines 50 kW WPT-Systems. Dabei werden sowohl die mittels Simulation als auch die im Rahmen eines Experiments erfassten Daten zur Auswertung des Magnetfelds herangezogen.

Zum Abschluss wird ein Sicherheitskonzept gegen elektromagnetische Exposition vorgestellt, das darauf abzielt, die potenziellen gesundheitlichen Risiken für Menschen durch EMF bei WPT-Systemen im Alltag zu identifizieren und sie mithilfe von Maßnahmen zu minimieren.

Die in diesem Kapitel dargelegten Inhalte basieren zum Teil auf [122,152–155].

4.1 Simulationskonzept

In diesem Kapitel wird ein Simulationskonzept vorgestellt, welches genutzt wird, um ein bestimmtes Problem oder System unter definierten Bedingungen zu analysieren und zu verstehen. Im Rahmen dieser Arbeit dient es zur Untersuchung EMF bei WPT-Systemen für EVs. Zur Berechnung der EMF wird die Finite-Elemente-Methode (FEM) verwendet. Diese Methode ist besonders gut geeignet, um komplexe Geometrien und nichtlineare Materialeigenschaften zu analysieren, die in vielen elektromagnetischen Anwendungen wie Motoren, Transformatoren, Sensoren und WPT-Systemen vorkommen. Das Simulationskonzept beschreibt die Schritte und Ansätze, die zur Durchführung der Simulation notwendig sind, und legt fest, wie die Simulation modelliert, umgesetzt und ausgewertet werden soll.

1. Festlegung des Simulationsziels

- Bestimmen, was mit der Simulation erreicht werden soll (z. B. EMF-Analyse).
- Definieren der Schlüsselparameter (z. B. Übertragungsleistung, Spulengeometrie, Frequenzbereich usw.).

2. Modellierung des Systems

- Erstellen oder importieren der Geometrien der Primär- und Sekundärspulen sowie des Fahrzeugmodells bzw. -nachbildung.
- Zuordnen von Materialeigenschaften für alle Komponenten (z. B. Kupfer für die Spulen, ferromagnetische Materialien für Kerne, Luft oder andere nichtleitende Materialien für die Umgebung).

3. Festlegung der Randbedingungen

- Zuweisen einer Stromquelle oder Spannungsquelle zu den Primärspulen, um das System zu betreiben. In den meisten Fällen wird eine Wechselstromquelle mit idealem Sinus verwendet, da WPT-Systeme in der Regel auf einer hochfrequenten Wechselstrombasis arbeiten.
- Festlegung geeigneter Randbedingungen für den Simulationsbereich, wie z. B. magnetische oder elektrische Isolierungen, um das Austreten des EMF zu verhindern und somit die Integrität der numerischen Lösung zu gewährleisten.

4. Meshing

- Das Geometriemodell wird in kleinere Elemente (Finite Elemente) unterteilt, damit ANSYS Electronics Desktop die Maxwell-Gleichungen numerisch lösen kann. Eine feine Netzgröße ist besonders in den Bereichen notwendig, in denen starke EMF erwartet werden, wie z. B. in den Spulen.

- Die Netzgröße sollte ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand sein. Bei zu grobem Netz können die Ergebnisse ungenau sein, bei zu feinem Netz steigt die Rechenzeit erheblich.

5. Simulationseinstellungen

- ANSYS Electronics Desktop stellt eine Vielzahl an Solver bereit, die entsprechend der spezifischen Anforderungen der Simulation ausgewählt werden. Diese Auswahl hängt von mehreren Faktoren ab, wie der Art der Anwendung, der eingesetzten Erregungsmethode (Excitation), den Materialeigenschaften sowie der Art des zu simulierenden Magnetfeldes. Durch diese Flexibilität können unterschiedlichste elektromagnetische Phänomene, von stationären bis hin zu transienten Zuständen, effizient und präzise modelliert und analysiert werden.
- Die exakte Festlegung der Betriebsfrequenz ist für die Simulation von entscheidender Bedeutung. Da WPT-Systeme typischerweise bei einer Frequenz von 85 kHz betrieben werden, ist eine präzise Einstellung des Frequenzbereichs in der Simulation erforderlich, um realistische Ergebnisse zu gewährleisten.
- Bei zeitabhängigen Simulationen müssen der Zeitraum und die Schrittweite der Simulation definiert werden, um die transienten Effekte und die Kopplung zwischen den Spulen genau zu erfassen.

6. Durchführung der Simulation

7. Auswertung der Ergebnisse

Im Folgenden erfolgt eine detaillierte Betrachtung der WPT-Module, der Materialeigenschaften sowie des Fahrzeugmodells.

4.1.1 WPT-Module

In WPT-Systemen, deren Funktionsprinzip auf der Kopplung zweier Spulen basiert, finden planare Magnetkoppler breite Anwendung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sie aufgrund ihrer geringen Bauhöhe sowohl in die Straßendecke als auch unter das Fahrzeug integriert werden können (siehe Abbildung 4.1). Das primäre Ziel bei der Konzeption solcher Magnetkoppler besteht in der Realisierung hoher Kopplungsfaktoren k und Gütefaktoren Q bei gleichzeitiger Gewährleistung einer hohen Toleranz gegenüber möglichen Versetzungen der Spulen. Die in der Tabelle 4.1 aufgeführten Positionierungstoleranzen basieren auf der SAE J2954 [35]. Zudem ist eine Minimierung der magnetischen Streuflussverluste sowie der Emission von Magnetfeldern in die Umgebung erforderlich. Ein solches Modul besteht in der Regel aus drei wesentlichen Schichten: der Spule, dem magnetischen Kern und der

Abschirmung (siehe Abbildung 4.2). Die Spule selbst wird häufig aus Litzendraht gefertigt, um Wechselstromverluste zu reduzieren. Der Kern, sofern vorhanden, besteht aus einem magnetischen Material wie Ferrit, welches den magnetischen Fluss lenkt, indem es Streuverluste minimiert und den Fluss von leitfähigen Bereichen ablenkt, die potenziell Wirbelströme erzeugen könnten. Die passive Abschirmung, in der Regel aus Aluminium gefertigt, dient der Reduzierung der Emission von Magnetfeldern in die Umgebung. Die Konzeption aller Komponenten – Spule, Kern und Abschirmung – erfolgt mit dem Ziel, eine Optimierung von Größe, Gewicht und Kosten des Moduls zu erreichen, wobei gleichzeitig eine Toleranz gegenüber Fehlanpassungen in allen Richtungen sichergestellt und die Einhaltung der EMV- und EMF-Sicherheitsstandards gewährleistet wird. Der Kern übernimmt in vielen Fällen die Funktion einer Zwischenschicht zwischen der Spule und der Aluminiumabschirmung. Dadurch wird reduziert, dass der zeitlich veränderliche magnetischen Fluss die leitende Abschirmung erreicht und Wirbelstromverluste verursacht. Materialien wie Ferrit und Litzendraht tragen in erheblichem Maße zu den Gesamtkosten eines solchen Moduls bei.

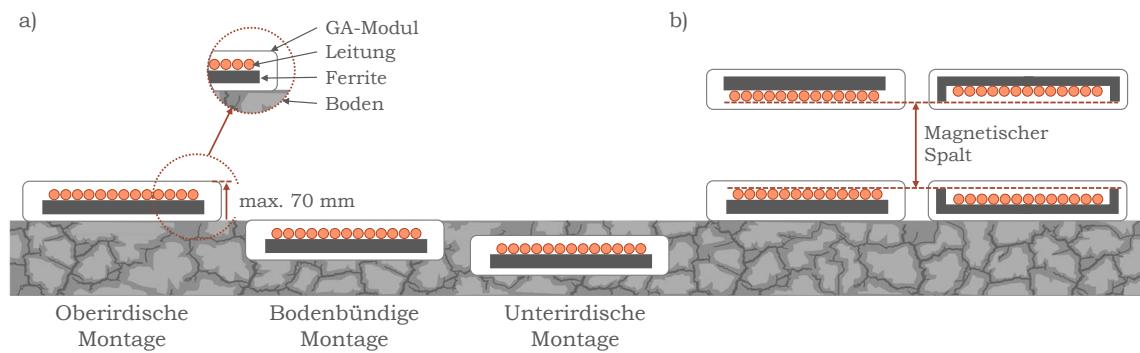


Abbildung 4.1: a) Installationsmöglichkeiten des GA-Moduls und b) Definition des magnetischen Spalts.

Tabelle 4.1. Positionierungstoleranz für das VA-Modul (Datenquelle: [35]).

Richtung	Versatz
ΔX	± 75 mm
ΔY	± 100 mm
ΔZ	$[Z_{\text{nom}} - \Delta_{\text{lower}}, Z_{\text{nom}} - \Delta_{\text{upper}}]^*$

* $\Delta_{\text{lower}}, \Delta_{\text{upper}}$ werden vom Hersteller definiert.

Der einfache Magnetkoppler verwendet planare Module, die entweder kreisförmig oder rechteckig sind. Die Module sind parallel zueinander und durch einen Luft-

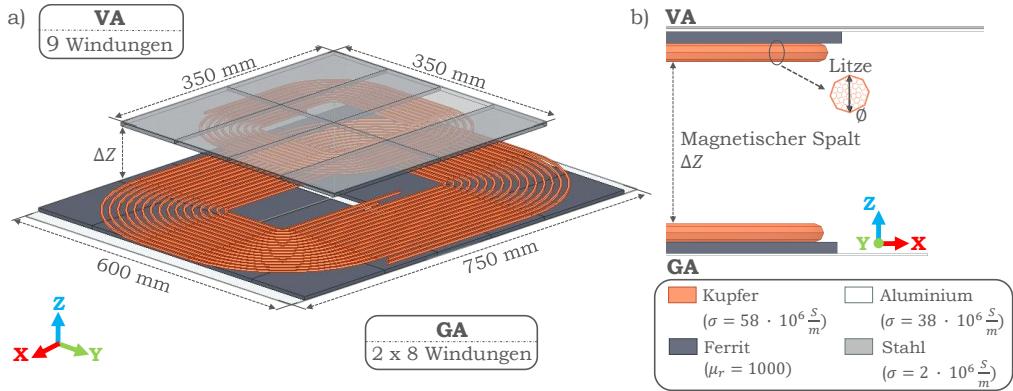


Abbildung 4.2: a) Anordnung und b) Aufbau der GA- und VA-Module.

Tabelle 4.2. Spezifikation der Z-Klassen (Datenquelle: [35]).

Z-Klasse	VA-Modul Bodenfreiheit
Z1	100 mm bis 150 mm
Z2	140 mm bis 210 mm
Z3	170 mm bis 250 mm

spalt voneinander getrennt, dessen Größe in etwa der Bodenfreiheit eines Fahrzeugs von der Straßenoberfläche entspricht. Ein Beispiel für kreisförmige und rechteckige Module ist in den Abbildung 4.3 a) und b) dargestellt. Diese Strukturen werden als einseitige bzw. unpolarisierte Module bezeichnet, da die Kopplung zwischen GA und VA hauptsächlich auf die vertikale Komponente des Magnetfelds zurückzuführen ist. Die kreisförmige Spule erfährt eine hohe Beliebtheit bei stationären WPT-Anwendungen, wobei sie zudem durch den SAE-Standard empfohlen wird [35]. Diese Bauform bietet eine gute WPT-Leistung sowie eine hohe Toleranz gegenüber Fehlanpassungen und geringen Variationen des Luftspaltabstands. Darüber hinaus sind die kreisförmigen Spulen symmetrisch und weisen in allen orthogonalen Richtungen zur Spulenachse identische Versetzungen auf.

Das rechteckige Modul zeichnet sich durch eine kosteneffiziente und kompakte Struktur aus, weshalb es häufig für dynamische WPT-Anwendungen zum Einsatz kommt (siehe Abbildung 4.3 b)). Dies umfasst bspw. Kurzstrecken-Konfigurationen für elektrifizierte Straßen oder die Sekundärspule, die am Fahrzeug montiert ist. Die WPT-Leistung rechteckiger Spulen weist eine ähnliche Charakteristik wie die kreisförmiger Spulen auf, allerdings ist ihre Struktur nicht symmetrisch. Dies bedingt, dass die seitliche Versetzung von der Richtung abhängt.

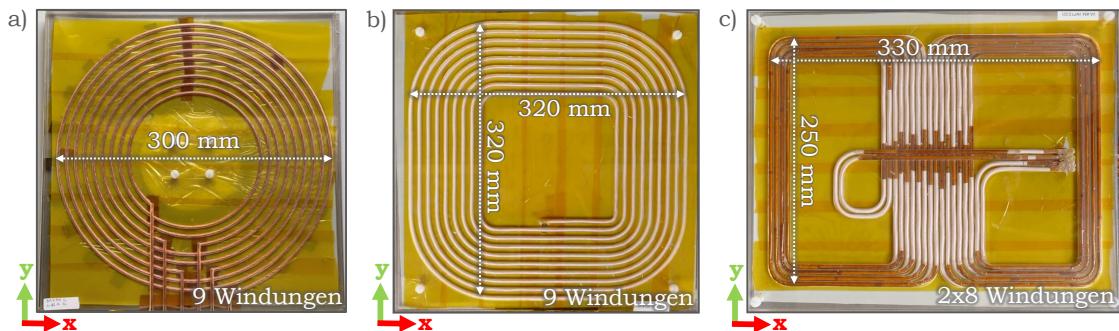


Abbildung 4.3: Topologien für die Sekundärseite: a) runde Spule, b) eckige Spule und c) DD-Spule.

Eine weitere, weit verbreitete Variante eines einseitigen Magnetkopplers ist die sogenannte Double-D (DD)-Spule, dessen Aufbau in Abbildung 4.3 c) veranschaulicht wird. Es setzt sich aus zwei rechteckigen, flachen Spulen zusammen, die nebeneinander platziert sind und zwei entgegengesetzte magnetische Pole bilden. Die Ansteuerung der Spulen erfolgt in Reihe durch einen Einphasen-Wechselrichter. Im Vergleich zu kreisförmigen Spulen bietet die DD-Topologie eine verbesserte Kopplung, da das Magnetfeld polarisiert ist und eine deutliche horizontale Komponente aufweist. Die Höhe des horizontalen Flusspfads entspricht in etwa der halben Länge des Moduls. Zur Steuerung des Magnetflusses werden Ferritschichten oder -stäbe unter der Kupferspule positioniert. Dies reduziert den Streufluss und verhindert die Entstehung von Wirbelströmen in nahegelegenen leitenden Materialien, wie bspw. einer darunterliegenden Aluminiumschicht.

Eine bipolare (BP) Struktur besteht im Wesentlichen aus zwei identischen rechteckigen, flachen Spulen, die sich teilweise überlappen, wie in Abbildung 4.4 b) dargestellt. Die Überlappung wird so gewählt, dass die gegenseitige Induktivität zwischen den Spulen idealerweise null ist. In der Regel erfolgt die Positionierung einer Ferritschicht unter den Spulen. Im Vergleich zu einer Konfiguration, bei der die Ströme in Phase betrieben werden, ist die maximale Leistungsübertragung der BP-Spule bei um 90° phasenverschobenen Strömen geringer. Der Vorteil dieser Struktur zeigt sich jedoch darin, dass bei seitlichen Fehlanpassungen die übertragene Leistung langsamer abnimmt, wodurch ein System mit höherer Toleranz gegenüber solchen Fehlanpassungen realisiert werden kann. Die BP-Struktur weist eine hohe Toleranz gegenüber Fehlanpassungen auf und zeigt, ähnlich wie das DDQ-Modul (siehe Abbildung 4.4 a)), einen hohen Kopplungsfaktor. Ein weiterer Vorteil der BP-Struktur liegt in der Reduktion des benötigten Kupfers um etwa 25 % bis 30 % im Vergleich zum DDQ-Modul. Das Tripolar-Modul hingegen besteht aus drei Spulen, die so angeordnet sind, dass sie entkoppelt voneinander arbeiten, wie in Ab-

bildung 4.4 dargestellt. Diese Anordnung ermöglicht eine hohe Toleranz gegenüber Drehfehlanpassungen bei unpolarisierten Modulen [156, 157]. Um den höchstmöglichen Kopplungsfaktor zu erreichen, erfolgt die Ansteuerung der drei entkoppelten Spulen unabhängig voneinander. Dazu ist entweder der Einsatz von drei synchronisierten Einphasen-Wechselrichtern oder eines Dreiphasen-Wechselrichters erforderlich. Das Tripolar-Modul stellt eine vielversprechende Lösung für WPT-Systeme mit hoher Leistung dar.

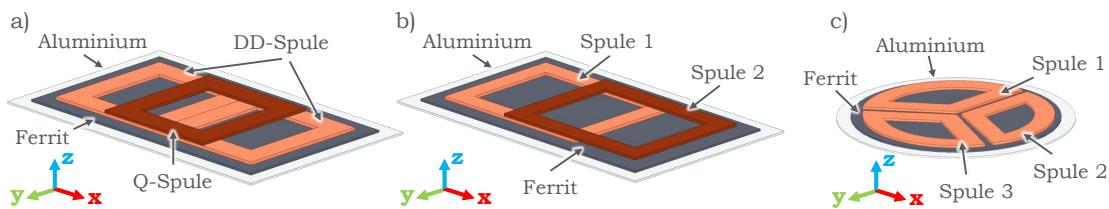


Abbildung 4.4: Topologien für die Primärseite: a) DDQ-, b) bipolare und c) tripolare Spule.

In den Simulationen in Kapitel 4.3 und 4.4 wurde ein unipolares, rechteckiges Spulendesign untersucht. Diese Topologie weist mehrere praxisrelevante Vorteile auf. Im Vergleich zur DD- und DDQ-Topologie zeichnet sie sich durch eine vereinfachte Herstellung und eine kompaktere Bauform aus, da die Anfertigung und Synchronansteuerung mehrteiliger Spulenanordnungen nicht erforderlich ist. Dies hat eine Reduktion sowohl des Materialeinsatzes als auch der Komplexität der Leistungs- und Steuerungselektronik zur Folge. Im Vergleich zur bipolaren Spule weist die rechteckige Spule eine höhere Positionstoleranz in allen Richtungen auf und erfordert keine phasenverschobene Ansteuerung, wodurch sich der Integrationsaufwand verringert. Im Vergleich zur tripolaren Spule weist sie eine reduzierte Baugröße und Masse auf und generiert geringere Material- und Systemkosten. Die rechteckige Spule weist spezifische Eigenschaften auf, die sie für bestimmte Anwendungen prädestinieren. Insbesondere bei Anwendungen, die einen begrenzten Bauraum erfordern und hohe Anforderungen an die Fehlertoleranz, die einfache Integration und die Kosteneffizienz stellen, erweist sich die rechteckige Spule als vorteilhaft.

4.1.2 Materialeigenschaften

Das Verhalten der Simulationen und Experimente wird maßgeblich durch die Materialeigenschaften der folgenden drei Komponenten beeinflusst:

Die ferromagnetischen Kerne

Die Verwendung magnetischer Materialien spielt eine entscheidende Rolle bei der

Konzeption von Magnetkopplern im Kontext von WPT-Anwendungen. Sie tragen dazu bei, den Verlust des magnetischen Flusses zu minimieren, indem sie die Eigen- und Gegeninduktivität erhöhen und als magnetische Abschirmung fungieren. Die Auswahl des adäquaten Materials stellt eine wesentliche Herausforderung dar und ist von der zu erbringenden Leistung, der Betriebsfrequenz, der Sättigungsflussdichte sowie der Permeabilität abhängig. Mangan-Zink- (MnZn-)Ferrit stellt derzeit das am häufigsten verwendete Material in WPT-Anwendungen dar und ist zudem unter der Bezeichnung Manifer bekannt. Dies ist auf dessen Kosteneffizienz, hohe Permeabilität sowie die Reduzierung von Wirbelströmen und Leistungsverlusten zurückzuführen.

Allerdings neigt MnZn-Ferrit in stoß- oder vibrationsintensiven Umgebungen, wie sie etwa in EVs vorherrschen, zur Sprödigkeit. Des Weiteren manifestieren sich bei hohen Magnetfeldstärken Sättigungsprobleme. Um die genannten Nachteile zu vermeiden, wird zunehmend auf weichmagnetische Materialien wie eisenbasierte nanokristalline Materialien zurückgegriffen, die eine höhere Flexibilität aufweisen, jedoch bei höheren Frequenzen zu einer Zunahme der Leistungsverluste führen. Gegenwärtig liegt der Fokus der Forschung auf der Verbesserung der Resistivität dieser Materialien sowie der Entwicklung von Lösungen zur Reduzierung von Wirbelströmen. Zudem befassen sich zahlreiche Studien mit der optimalen Ausgestaltung ferromagnetischer Strukturen (als Platten, Stäbe oder Blöcke), wobei in der Praxis jedoch häufig thermische und mechanische Einflussfaktoren sowie Fehler bei der Ausrichtung der Spulen vernachlässigt werden.

In den durchgeführten Simulationen wird für die Ferritstrukturen das Material Manifer 198 eingesetzt [158]. Manifer 198 eignet sich für den Einsatz in Anwendungen mit Frequenzen bis zu 100 kHz. Es weist eine hohe magnetische Sättigungsflussdichte auf. Ein weiterer Vorteil besteht in der geringen Höhe der Leistungsverluste bei höheren Arbeitsfrequenzen. Des Weiteren nehmen die Verluste mit steigender Temperatur ab, was eine Effizienzsteigerung des Materials zur Folge hat. Die Arbeitstemperatur dieser Ferrite liegt im Bereich von 50 °C bis 100 °C, wodurch sie für die Anwendung von WPT-Systemen geeignet sind.

Die Hochfrequenzlitze

Litzendraht findet in WPT-Systemen Verwendung, um bei Frequenzen von bis zu einigen Megahertz die durch den Skin- und Proximity-Effekt bedingten Wechselstromverluste zu minimieren. Der Draht besteht aus zahlreichen, dünnen Kupferlitzen, die jeweils separat isoliert sind. Um den Skin-Effekt zu reduzieren, muss der Durchmesser der Litzen kleiner sein als die Eindringtiefe bei der höchsten relevanten Frequenz. Litzendrähte werden üblicherweise mit Angaben zur Gesamtzahl der Litzen und dem Durchmesser jeder Litze beworben. Dabei sollte der Durchmesser mindestens das Dreifache der minimalen Eindringtiefe bei der maximalen Betriebsfrequenz betragen.

Tabelle 4.3. Eigenschaften der verwendeten Kupferleitung gemäß [154, 155, 159].

Parameter	Wert
Kupferquerschnitt	6,25 mm ²
Durchmesser eines Einzelstrangs	0,071 mm
40 AWG* Durchmesser	0,079 mm
Litzendurchmesser ohne Isolierung	4,18 mm
Abstand zwischen Windungen	7 mm
Doppelte Isolierung (min. - max.)	0,94 mm bis 1,24 mm
Einfache Isolierung (min. - max.)	0,97 mm bis 1,12 mm
Anzahl der Litzen	1.575

* American Wire Gauge

Die Anordnung der Litzen innerhalb des Querschnitts des Drahtes ist von entscheidender Bedeutung. Eine gleichmäßige Anordnung von parallelen Litzen resultiert in einem geringeren Widerstand der äußeren Litzen im Vergleich zu den inneren Litzen, da der Skin- und Proximity-Effekt hier stärker ausgeprägt ist. Eine Beibehaltung der Position der Litzen entlang der Leitung würde eine Ausgleichung der genannten Effekte verhindern. Um eine Kompensation der genannten Effekte zu erreichen, werden die Litzen gezielt verdrillt oder gebündelt, sodass jede Litze einen nahezu identischen Weg im Draht zurücklegt. Dies resultiert in einem vergleichbaren Widerstand aller Litzen und einer gleichmäßigen Stromverteilung, wodurch die negativen Effekte reduziert werden. Die Konstruktion eines Litzendrahts erweist sich jedoch als anspruchsvoll, da es schwierig ist, eine gleichmäßige Verdrillung von zahlreichen Litzen (teilweise über 1.000) zu gewährleisten, bei der alle den gleichen Widerstand aufweisen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Litzen häufig in Bündeln organisiert und mitunter erneut verdrillt. Des Weiteren trägt das Bündeln der Litzen zur mechanischen Flexibilität des Drahtes bei.

Die Befestigungen, Abschirmungen und Nachbildungsplatten

Aluminium spielt eine entscheidende Rolle bei der Konstruktion und Optimierung von WPT-Systemen, insbesondere im Hinblick auf das Management EMF. Aufgrund seiner exzellenten Leitfähigkeit findet Aluminium häufig Verwendung als Abschirmmaterial, um EMI zu minimieren. In WPT-Systemen kann dies durch den Einsatz von Aluminiumplatten erzielt werden, welche elektromagnetische Strahlung blockieren oder streuen. Dadurch lassen sich unerwünschte Einflüsse auf empfindliche elektronische Komponenten im EV oder in der Umgebung reduzieren.

Ein weiteres wesentliches Charakteristikum von Aluminium in WPT-Systemen ist die Fähigkeit, Wirbelströme zu induzieren, wenn es einem variablen magnetischen

Feld ausgesetzt ist. Die dadurch entstehenden Wirbelströme können zu einer Erwärmung des Materials und somit zu einem Leistungsverlust führen. Aus diesem Grund ist es in der Praxis von entscheidender Bedeutung, dünne Aluminiumplatten zu verwenden, um den Energieverlust durch Wirbelströme zu minimieren. Eine strategische Platzierung von Aluminium kann dazu beitragen, die magnetischen Flusslecks zu reduzieren und somit die Effizienz des Ladeprozesses zu erhöhen. Ein weiterer Vorteil von Aluminium in diesem Kontext ist dessen geringes Gewicht. In Fahrzeuganwendungen, bei denen die Reduzierung des Gewichts von entscheidender Bedeutung ist, kann Aluminium als leichtes Material eine wesentliche Rolle spielen. Es ermöglicht sowohl eine effiziente Abschirmung als auch eine optimierte Effizienz des Ladesystems, ohne das Fahrzeug zusätzlich zu belasten.

Aluminiumplatten fungieren sowohl als Befestigungsschichten für die WPT-Module als auch als Abschirmplatten. Die Dicke der Befestigungsschicht variiert in Abhängigkeit vom jeweiligen Modul und liegt zwischen 2 mm und 4 mm. Die abschirmende Aluminiumplatte hingegen weist eine konstante Dicke von 2 mm auf.

In der Simulation findet Stahl Verwendung für die Fahrzeognachbildung, da er die realen magnetischen und mechanischen Eigenschaften von Fahrzeugkarosserien in adäquater Weise abbildet. In WPT-Systemen beeinflusst er das EMF insbesondere durch seine ferromagnetischen Eigenschaften sowie die Induktion von Wirbelströmen. Die Verwendung von Stahl in der Simulation ermöglicht die detaillierte Untersuchung der Wechselwirkung zwischen EV und Ladesystem sowie die Optimierung der Effizienz, ohne dass auf kosten- und zeitintensive reale Tests zurückgegriffen werden muss. Aufgrund dessen misst die Stahlplatte eine Größe von 1.500 mm × 1.500 mm sowie eine Dicke von 2 mm.

4.1.3 Fahrzeugmodell

In EMF-Simulationen besteht die Möglichkeit, sowohl originale Fahrzeugmodelle als auch vereinfachte Nachbildungen, wie bspw. eine Stahlplatte, zu verwenden. Beide Ansätze weisen spezifische Vor- und Nachteile auf, die in Abhängigkeit des jeweiligen Anwendungsfalls zu berücksichtigen sind. Der Einsatz originaler Fahrzeugmodelle bietet den Vorteil einer hohen Präzision, da diese die realen geometrischen und materialtechnischen Eigenschaften des Fahrzeugs exakt widerspiegeln. Die Modelle umfassen eine Vielzahl von komplexen Details, darunter die Karosserieform, die Materialverteilung sowie mögliche elektromagnetische Störeinflüsse. Dies führt zu präziseren Ergebnissen. Diesbezüglich ist insbesondere bei der Untersuchung der EMV sowie der Analyse von WPT-Systemen eine hohe Genauigkeit von Vorteil, um reale Szenarien adäquat simulieren zu können. Der Nachteil dieser Methode besteht jedoch in dem hohen Rechenaufwand sowie der Komplexität des Modells. Die hohe

geometrische Detaillierung der Originalmodelle bedingt eine signifikante Erhöhung der Berechnungsanzahl und somit eine signifikante Verlängerung der Simulationszeit sowie eine signifikante Steigerung der erforderlichen Rechenleistung. Des Weiteren ist der Zugang zu Originaldaten nicht immer gewährleistet bzw. erschwert, da Fahrzeughersteller aus Sicherheits- und Konkurrenzgründen die Freigabe dieser Informationen ablehnen bzw. verzögern können.

Für Expositionsauswertungen, wie sie in der Publikation [153] beschrieben werden, ist der Einsatz einer detaillierten Karosserie sinnvoll, um insbesondere eine adäquate Bestimmung der Exposition von Fahrzeuginsassen zu gewährleisten. Für die Realisierung dieses Vorhabens wird das originale 3D-Fahrzeugmodell des Herstellers LEVC verwendet. Dieses Modell zeichnet sich durch eine präzise Abbildung der realen geometrischen und materialtechnischen Eigenschaften der Karosserie aus [160].

Aufgrund des großen Simulationsraums von mehreren Metern in jede räumliche Richtung und der notwendigen hohen Auflösung der abschirmenden Karosserie erfordern diese Simulationen Hochleistungsrechner in Kombination mit einer effizienten numerischen Methode. Das skaliert-freie Finite-Difference Time-Domain (SF-FDTD)-Schema [161] wird für die erforderlichen hochgenauen Simulationen verwendet. Es ermöglicht die Verwendung des etablierten FDTD-Schemas [162] mit seinen hochauflösenden Fähigkeiten bei höheren Simulationsfrequenzen f' im MHz-Bereich als bei der ursprünglichen Frequenz f im kHz-Bereich. Mit zunehmender Simulationsfrequenz nimmt jedoch die Eindringtiefe $\delta \sim 1/\sqrt{(\sigma\omega)}$ (σ : elektrische Leitfähigkeit, ω : Kreisfrequenz) ab, was die Magnetfeldverteilung verändert und daher eine entsprechende Skalierung der elektrischen Leitfähigkeit $\sigma' \sim f/f'$ erfordert.

$$\delta(f', \sigma') = \delta(f, \sigma) \quad (4.1)$$

Das hochauflösende WPT-System ist zentriert unter der Karosserie angebracht (mit einem magnetischen Spalt von 229 mm), und die Ströme für die 20 kW-Leistungsübertragung werden angewendet. Alle nicht leitfähigen oder schwach leitfähigen Teile des Fahrzeugmodells werden aus der Simulation entfernt, da sie keinen oder einen vernachlässigbaren Dämpfungseffekt auf die Magnetflussdichte haben. Die Unterseite und die Seiten der Karosserie erfordern jedoch eine hohe Auflösung (bis zu Zehntel Millimeter). Um eine Vergleichbarkeit der Magnetflussdichte neben dem Fahrzeug mit den gemessenen Werten zu gewährleisten, hat der Simulationsraum in alle Richtungen einen Abstand von etwa 1 m von der offenen Grenze. In der Simulation wird angenommen, dass der Boden, der aus Beton besteht, einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Verteilung der Magnetflussdichte hat und daher im Modell nicht berücksichtigt wird. Die gesamte Simulation umfasst bis zu 2 Milliarden FDTD-Gitterzellen mit einer Simulationsfrequenz von $f' = 5$ MHz. Die elektrischen Leitfähigkeiten

higkeiten bei $f = 85\text{ kHz}$ werden um f/f' skaliert. Ein Beispiel für die Verteilung der Magnetflussdichte ist in Abbildung 4.5 dargestellt [152].

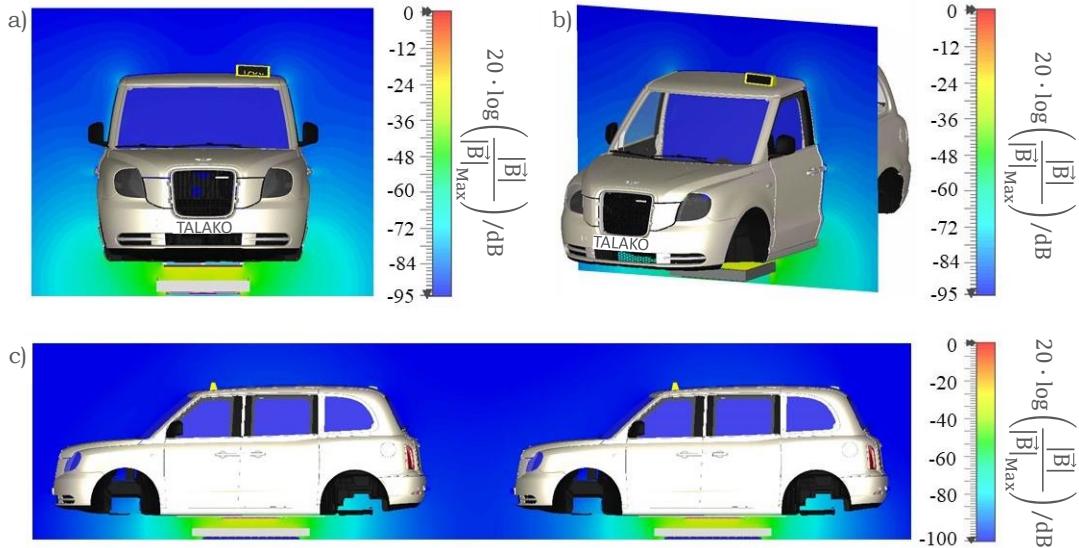


Abbildung 4.5: Verteilung der magnetischen Flussdichte mittels originalen Fahrzeugmodells: a) Vorderansicht, b) Seitenansicht von einem Taxi und c) Seitenansicht von zwei Taxis [152, 160].

Da diese Fragestellung jedoch nicht den Schwerpunkt der vorliegenden Dissertation bildet, sondern lediglich im Rahmen ergänzender Analysen betrachtet wurde, kommt in den Hauptsimulationen in den Kapiteln 4.3.3 und 4.4.3 ausschließlich die vereinfachte Fahrzeognachbildung zum Einsatz (siehe Abbildung 4.6).

Die Fahrzeognachbildung, wie bspw. eine Stahlplatte mit den Maßen $1.500\text{ mm} \times 1.500\text{ mm} \times 1\text{ mm}$, reduziert die Komplexität und den Rechenaufwand erheblich. Diese Annäherung erweist sich in Situationen als vorteilhaft, in denen eine grobe Schätzung der EMF-Effekte ausreichend ist. Dies kann bei frühen Entwicklungsstadien oder bei der Untersuchung spezifischer, begrenzter Parameter der Fall sein. Dies resultiert in einer verkürzten Simulationszeit sowie einer Kostenersparnis, insbesondere bei der Analyse von WPT-Systemen, bei der die generelle Wirkung der Metallstruktur auf die elektromagnetische Kopplung im Vordergrund steht.

In der vorliegenden Arbeit wurde dieser Ansatz gezielt gewählt, um zu demonstrieren, dass eine vereinfachte Modellierung für die Bewertung der Magnetfeldverteilung im Umfeld des Fahrzeugs und damit für die Erreichung der Untersuchungsziele vollständig ausreichend ist.

Für die simulative Auswertung wurden mehrere Ebenen und Linien definiert, wie in Abbildung 4.6 dargestellt. Diese umfassen:

- **zwei Frontebenen:**
(F1) 200 mm und (F2) 1.000 mm von der Fahrzeugfront entfernt.
- **zwei Seitenebenen:**
(S1) 200 mm und (S2) 1.000 mm von der Fahrzeugseite entfernt.

In Abhängigkeit des Anwendungsszenarios werden auf den einzelnen Ebenen Evaluationslinien unterschiedlicher Höhen angelegt (siehe 4.2.2). Bei der Betrachtung diverser Versätze bleiben die Positionen der Evaluationsebenen und -linien stets in identischer Distanz zueinander und bewegen sich gemeinsam mit der Nachbildungsschale des Fahrzeugunterbodens.

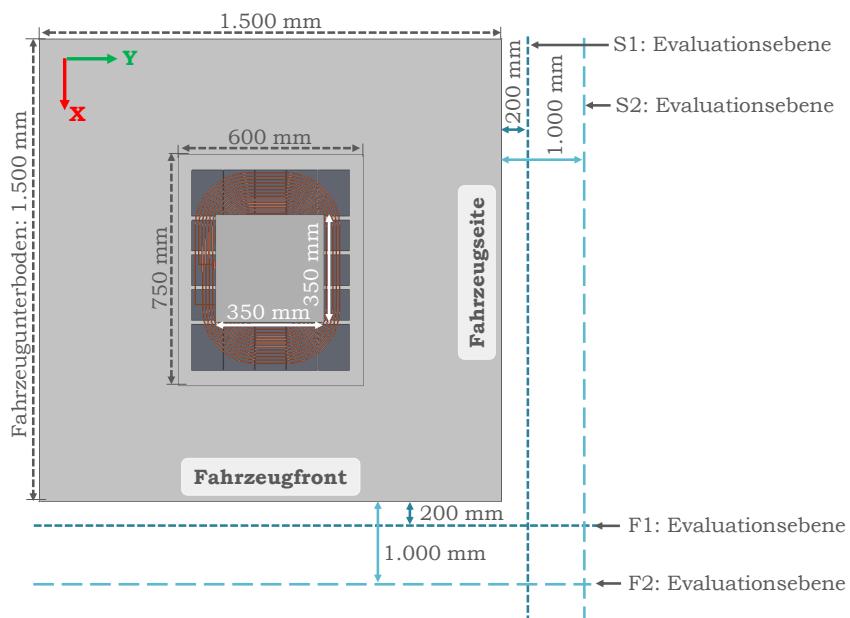


Abbildung 4.6: Simulative Evaluationsebenen mittels Fahrzeognachbildung.

Die Entscheidung zwischen einem originalen Fahrzeugmodell und einer vereinfachten Nachbildung ist maßgeblich von den Anforderungen der Simulation abhängig. Während das originale Modell präzisere Ergebnisse liefert, ermöglicht die Nachbildung durch eine Stahlplatte eine Zeit- und Ressourcenersparnis. In zahlreichen Fällen erweist sich eine Kombination beider Ansätze als vorteilhaft, wobei die jeweilige Ausgestaltung von den spezifischen Charakteristika des Projekts sowie den definierten Simulationszielen abhängt.

4.2 Messkonzept

Die experimentelle Überprüfung der Einhaltung von EMF-Sicherheitsstandards beginnt mit der Messung des vom WPT-System erzeugten Magnetfelds. In der Folge werden die erfassten Werte der magnetischen Flussdichte mit den Referenzwerten (RLs) verglichen, um eine Überschreitung der Grenzwerte zu identifizieren. Diesbezüglich ist sicherzustellen, dass zum einen die Messgeräte den geltenden technischen Standards entsprechen sowie eine korrekte Kalibrierung aufweisen und zum anderen ist eine präzise Definition der Konfiguration des WPT-Systems sowie eine sorgfältige Vorbereitung des Messaufbaus unerlässlich.

Das in dieser Arbeit entwickelte Messkonzept definiert eine exakte Vorgehensweise bei den Messungen, wodurch die Vergleichbarkeit, Wiederholbarkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen gewährleistet wird. Zu diesem Zweck wurden verschiedene nationale wie auch internationale Normen wie DIN EN 61980 [56], ISO 19363 [55] und SAE J2954 [35] aus dem Schwerpunkt „Induktive Energieübertragungssysteme für Elektrofahrzeuge“ teilweise zur Ergänzung herangezogen (vgl. Kapitel 2.5). Die vorliegenden Normen fungierten dabei als Orientierungshilfe und Ergänzung einzelner Aspekte, jedoch basierte das Gesamtkonzept nicht ausschließlich auf diesen Vorgaben.

4.2.1 Messequipment

Bei der Auswahl einer Magnetfeldsonde müssen verschiedene Faktoren beachtet werden, um genaue und zuverlässige Messungen zu gewährleisten. Abhängig von der konkreten Anwendung und den spezifischen Anforderungen sind verschiedene Kriterien zu berücksichtigen.

Ein wesentlicher Aspekt ist der **Messbereich** der Sonde. Es ist zu berücksichtigen, dass die zu erwartenden Magnetfeldstärken starken Schwankungen unterliegen, sodass der Messbereich der Sonde entsprechend gewählt werden muss. Dieser sollte sowohl sehr schwache Felder im nT-Bereich als auch starke Felder von mehreren Tesla erfassen können.

Ein weiterer Aspekt, der Berücksichtigung finden muss, ist der **Frequenzbereich** der Sonde. Magnetfelder können sowohl statisch (DC) als auch variabel (AC) sein, weshalb die Eignung der Sonde für den jeweiligen Frequenzbereich gegeben sein muss. Sonden, die für die Messung statischer Magnetfelder konzipiert sind, eignen sich bspw. für die Erfassung des Erdmagnetfelds. Andere Sonden sind für die Detektion hochfrequenter Felder, wie sie in der Nähe von Hochspannungsleitungen oder WPT-Systemen auftreten, ausgelegt.

Des Weiteren ist die **Sensitivität** der Sonde von Relevanz. Sie definiert die Fähigkeit

zur Erfassung geringster Veränderungen des Magnetfelds. In Anwendungsbereichen, in denen besonders präzise Messungen erforderlich sind, ist eine hochsensitive Sonde unerlässlich, um auch geringfügige Änderungen des Magnetfelds erfassen zu können. Darüber hinaus ist die **Richtcharakteristik** der Sonde von Relevanz. Es existieren Sonden, die eine isotrope Charakteristik aufweisen und somit das Magnetfeld in alle Richtungen messen (sogenannte isotrope Sonden). Des Weiteren sind Sonden verfügbar, die lediglich in einer Achse messen (uniaxiale Sonden). In Abhängigkeit von den gestellten Anforderungen ist zu entscheiden, ob eine Sonde erforderlich ist, die das Magnetfeld in einer oder mehreren Raumrichtungen erfasst.

Die **Kalibrierung** der Sonde ist von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit der erfassten Messwerte. Eine regelmäßige Kalibrierung gewährleistet die zuverlässige und präzise Funktionsweise der Sonde. Diesbezüglich sei insbesondere auf die Relevanz einer Kalibrierung in wissenschaftlichen und industriellen Kontexten hingewiesen, in denen exakte Messergebnisse unabdingbar sind.

Ein weiteres wesentliches Kriterium stellt die **Temperaturstabilität** der Sonde dar. Da Magnetfeldsonden in unterschiedlichen Umgebungen zum Einsatz kommen, ist es erforderlich, dass sie bei Temperaturschwankungen stabile und genaue Messergebnisse liefern. Die Funktionsfähigkeit innerhalb des vorgesehenen Temperaturbereichs ist eine grundlegende Voraussetzung, um Störungen durch Temperaturschwankungen zu vermeiden.

Des Weiteren sind die **Größe und Geometrie** der Sonde zu berücksichtigen. In Abhängigkeit von der vorliegenden Messumgebung kann die Auswahl einer kompakten oder spezifisch geformten Sonde erforderlich sein, um schwer zugängliche Bereiche zu erreichen oder lokale Magnetfeldmessungen durchzuführen.

Darüber hinaus muss die Sonde eine hohe **Störfestigkeit** aufweisen, insbesondere in Umgebungen, in denen zahlreiche elektromagnetische Störquellen vorhanden sind. Es ist erforderlich, dass die Sonde in der Lage ist, das gewünschte Magnetfeld von unerwünschten Störquellen zu unterscheiden, um verlässliche Messungen zu gewährleisten.

Schließlich ist die **Einsatzmöglichkeit** der Sonde von Relevanz. Der Verwendungszweck determiniert in erster Linie die zu erfüllenden Eigenschaften der Sonde. In der medizinischen Bildgebung, bspw. beim MRT, sind Sonden erforderlich, die eine besonders hohe Präzision aufweisen. Demgegenüber können in industriellen Anwendungen Sonden zum Einsatz kommen, die eine höhere Robustheit und geringere Empfindlichkeit aufweisen.

Einige der genannten Unsicherheitsquellen können auf vernachlässigbare Werte reduziert werden.

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung in Kapitel 4.3 werden Feldmessungen durchgeführt, um die vorhergehenden Simulationen gemäß den Richtlinien der SAE J2954 zu vergleichen [35]. Zu diesem Zweck wird ein Exposure Level Tester System

(ELT-400, Frequenzbereich: 1 Hz bis 400 kHz, Messbereich: bis zu 80 mT, Auflösung: 1 nT) mit einer Fläche von 100 cm^2 isotropen Drei-Achsen-Sonden verwendet [163]. Das Magnetometer wurde bereits in Studien wie [49, 164–166] eingesetzt, wobei es sich grundsätzlich als geeignet für die Bewertung der Körperexposition bezüglich der abgeleiteten Grenzwerte der ICNIRP für die magnetische Flussdichte von magnetoquasistatischen Feldern erwiesen hat. Das ELT-400 ist vom Vektortyp, bei dem drei Sensorelemente in einem rechtshändigen System angeordnet sind, um die Größen der drei Feldkomponenten zu erfassen. Die Projektion des Magnetfeldvektors auf die jeweilige Achse der Sensorelemente wird gemessen. Die Anordnung der Sensorelemente erfolgt orthogonal zueinander. Die effektiven Querschnittsflächen der X- und Z-Spulen stehen senkrecht zueinander. Die Orientierung ist jeweils um 45° zur Mittelachse geneigt. Auch die Ausrichtung der Y-Achse ist senkrecht, und die Querschnittsfläche ist horizontal [163]. Da die Anordnung der Sensorelemente von außen nicht unmittelbar ersichtlich ist, wird eine Skizze der Sensorelemente in Abbildung 4.7 gezeigt.

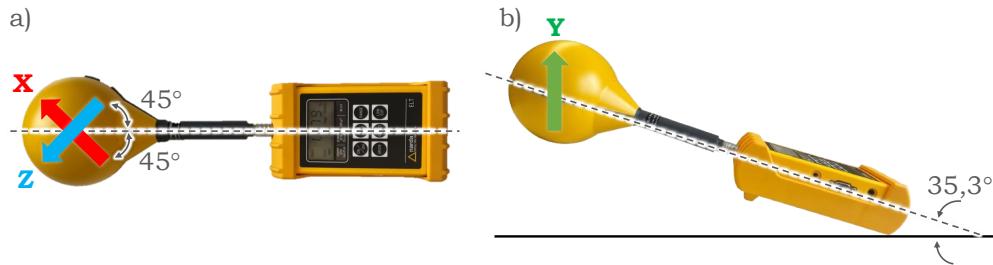


Abbildung 4.7: Anordnung der Sensorelemente für die isotrope 3-Achsen-Sonde:
a) Draufsicht und b) Seitenansicht (Datenquelle: [163]).

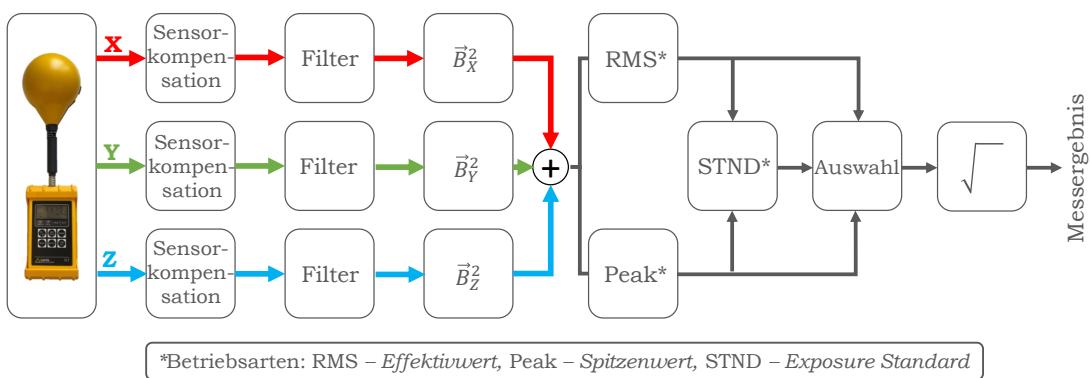


Abbildung 4.8: Blockschaltbild zum Funktionsprinzip des Magnetometers (Datenquelle: [163]).

Die in den Sensorelementen induzierte Spannung wird zur Bestimmung der magnetischen Flussdichte verwendet. Diese Spannungen werden digitalisiert und von einem Signalprozessor ausgewertet. In Bezug auf die Bereitstellung der Messwerte durch das ELT-400 stehen drei Betriebsmodi zur Verfügung. Die Abfrage der Messwerte kann jeweils als Effektivwert, Spitzenwert oder Expositionsstandard erfolgen. Das ELT-400 ist in der Lage, sowohl den Effektivwert (RMS) als auch den Spitzenwert (Peak) des Magnetfeldes zu messen. Während der Messung stehen beide Werte zur Verfügung, deren Auswahl durch Änderung des Erkennungsmodus erfolgt. Die Messwerte werden mit einer Frequenz von 250 µs ausgegeben.

Der Effektivwert der magnetischen Flussdichte lässt sich aus den individuellen Effektivwerten der drei Sensorelemente berechnen.

$$|\vec{B}|_{\text{RMS}} = \sqrt{\vec{B}_X^2 + \vec{B}_Y^2 + \vec{B}_Z^2}. \quad (4.2)$$

Im Gegensatz zum Effektivwert ist der Spitzenwert grundsätzlich von der zeitlichen Phasenlage der gemessenen Feldkomponenten abhängig. Seine Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

$$|\vec{B}|_{\text{Peak}} = \text{Max} \left\{ \sqrt{\vec{B}_X^2(t) + \vec{B}_Y^2(t) + \vec{B}_Z^2(t)} \right\}. \quad (4.3)$$

Die Ermittlung des Expositionsstandards erfolgt durch simultane Bestimmung und Vergleich der Effektiv- und Spitzenwerte, um auf diese Weise die Exposition berechnen zu können. Das Messergebnis wird als Prozentsatz des ICNIRP-relevanten Grenzwertes von 27 µT (RMS) angegeben.

4.2.2 Durchführung der Messungen

Ein Messkonzept stellt einen strukturierten Plan mit klar definierten Verfahren zur Durchführung von Messungen in wissenschaftlichen oder technischen Zusammenhängen dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein solches Messkonzept entwickelt und eingesetzt, um die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit von Messungen sicherzustellen sowie eine einheitliche Vorgehensweise zu gewährleisten.

Die in den Normen [35, 55, 56] beschriebenen Messbereiche befinden sich sowohl außerhalb des Fahrzeugs (darunter, daneben) als auch innerhalb des Fahrzeugs (z. B. am Fahrersitz). Im Rahmen der Entwicklung des in dieser Arbeit eingesetzten Messkonzepts wurden die in den Normen spezifizierten Messbereiche als Ausgangspunkt herangezogen. In Abbildung 4.9 sind die Messbereiche exemplarisch anhand eines

Beispielfahrzeuges markiert.

Da die Rückwirkung eines Menschen auf ein magnetisches Quellfeld vernachlässigbar ist, kann die magnetische Flussdichte direkt und ohne Anwesenheit eines Körpers gemessen und mit den abgeleiteten Grenzwerten [52] verglichen werden.



Abbildung 4.9: Definierte Messbereiche sowohl außerhalb als auch innerhalb des Fahrzeuges (Datenquellen: [35, 55, 56]).

Sobald das EV die gewünschte Positionierung über dem Ladesystem eingenommen hat, wird mit einer Abstandshilfe in einem Abstand von 200 mm rund um das EV (gemessen vom äußersten Punkt der Karosserie, exklusive der Seitenspiegel) die Evaluationslinie gezogen (siehe Abbildung 4.10). Der in der Norm IEC 61980 spezifizierte Abstand von 200 mm wurde als Referenz herangezogen [56].

Entlang der definierten Evaluationslinie wurden für diese Arbeit eigene Messhöhen und Messpositionen festgelegt, die über die in den Normen beschriebenen Vorgaben hinausgehen. Die Selektion der Höhen erfolgt unter Berücksichtigung typischer Körperproportionen und Aufenthaltsbereiche von Personen. Eine Höhe von 56,4 mm repräsentiert die Position der Füße oder dem Kopf, wenn eine Person am Boden liegt, 500 mm entsprechen der Kniehöhe bzw. der Kopfhöhe eines Kleinkindes, 1.000 mm liegt in Hüfthöhe und 1.500 mm in Kopf- bzw. Brusthöhe eines Erwachsenen (siehe Abbildung 4.11). Die Positionen rund um das Fahrzeug wurden gezielt an Punkten gewählt, an denen sich Personen im Alltag überwiegend aufhalten – beispielsweise an den Vorder- und Hintertüren zum Ein- und Aussteigen, am Kofferraum zum Be- und Entladen sowie im Bereich der Fahrzeugfront, etwa um einen Blick unter die Motorhaube zu werfen (siehe Abbildung 4.10). Zur Gewährleistung einer stabilen und reproduzierbaren Positionierung der Magnetfeldsonden außerhalb des Fahrzeugs wurden geeignete EMF-Stative eingesetzt.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation wurden alle Magnetfeldmessungen nach einem einheitlich definierten Ablaufplan durchgeführt. Der standardisierte Messablauf, welcher in festgelegter Reihenfolge erfolgte, gewährleistet sowohl die Vergleichbarkeit zwischen den Messreihen als auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Die

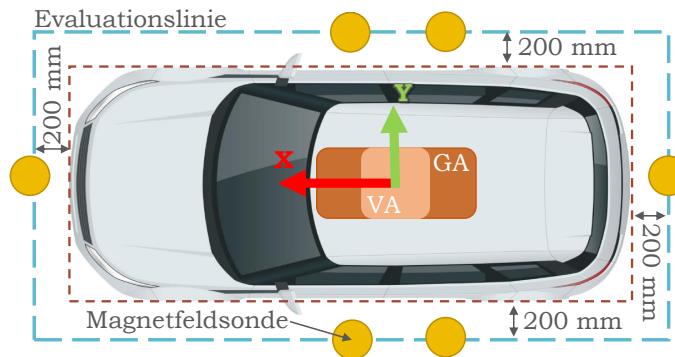


Abbildung 4.10: Definierte Messpunkte auf der Evaluationslinie [56] um das Fahrzeug.

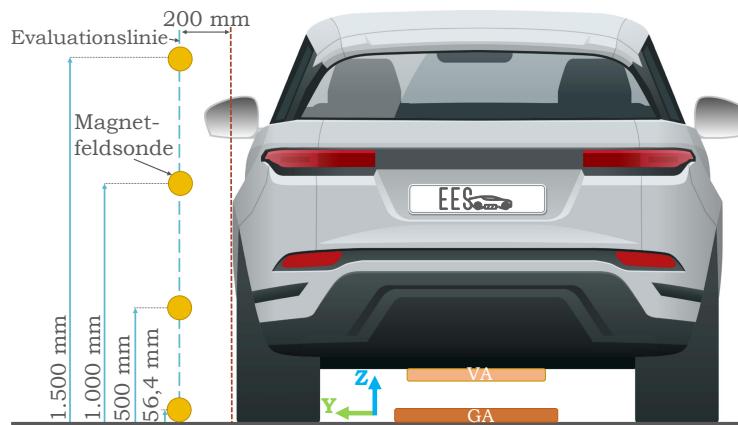


Abbildung 4.11: Definierte Messpunkte auf der Evaluationslinie [56] neben dem Fahrzeug auf unterschiedlichen Höhen.

klare Struktur des Verfahrens ermöglicht eine systematische Erfassung aller relevanten Szenarien und schafft somit eine methodische Grundlage, auf der zukünftige Messungen unter gleichen Bedingungen wiederholt werden können.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Messungen war, dass der Ladezustand der Energiespeicher der EVs vor Beginn der Versuche weitgehend entladen war. Ziel war es, den SoC auf etwa 10 % zu reduzieren, um konsistente Bedingungen für die induktiven Ladevorgänge und die Erfassung der EMF sicherzustellen.

Für die Untersuchungen wurden zwei grundlegende Fahrzeugpositionierungen betrachtet: die optimale Ausrichtung des Fahrzeugs über dem Ladesystem sowie Positionierungen mit definiertem Versatz in x- bzw. y-Richtung. Die Messungen wurden zuerst in optimaler Positionierung durchgeführt, um einen Referenzfall zu erfassen, bei dem die maximale magnetische Kopplung zwischen Primär- und Sekundärspule

vorliegt und somit typischerweise die höchsten Magnetfeldstärken auftreten. Dieser Referenzfall bildet die Grundlage für den Vergleich mit den Versatzmessungen und ermöglicht eine eindeutige Quantifizierung der Unterschiede. Bei beiden Positionierungen erfolgten die Messungen in einer festgelegten Abfolge: Zunächst wurden außerhalb des Fahrzeugs Messungen entlang der Evaluationslinie durchgeführt, da hier aufgrund der Nähe zum WPT-System die höchsten Magnetfeldstärken zu erwarten sind. Im Anschluss daran wurden Messungen innerhalb des Fahrzeugs durchgeführt, um die Feldverteilung im Innenraum sowie die abschirmende Wirkung der Fahrzeugstruktur zu erfassen. Diese strukturierte Vorgehensweise gewährleistet eine direkte Vergleichbarkeit zwischen optimaler und versetzter Positionierung sowie zwischen Außen- und Innenmessungen.

Die detaillierte Beschreibung des Messprozesses ist in Anhang D.2 dargelegt.

Die Erweiterung des Messkonzepts von einem EV auf zwei EVs ist in Abbildung 4.12 skizziert. Dies ist insbesondere für Anwendungsfälle von Interesse, in denen EVs bspw. hintereinander stehen und zeitgleich laden (siehe Abbildung 4.13).

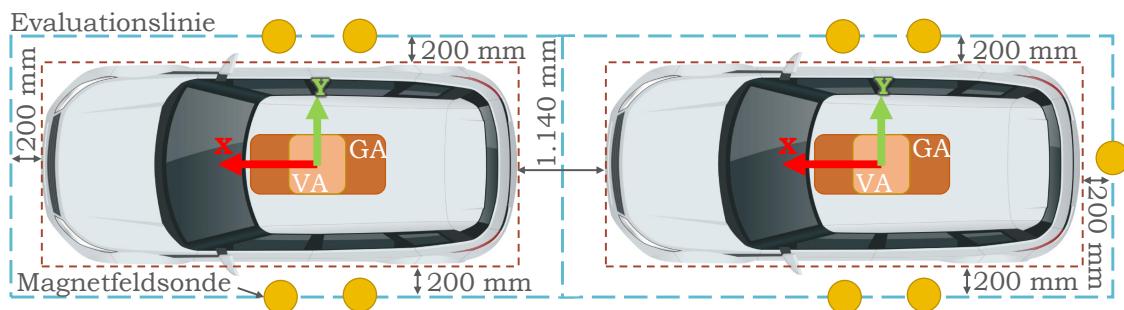


Abbildung 4.12: Erweiterung der definierten Messpunkte auf der Evaluationslinie um zwei Fahrzeuge basierend auf Abbildung 4.10.

Die Dokumentation von Messungen stellt einen integralen Bestandteil wissenschaftlicher und technischer Arbeiten dar, da sie die Voraussetzung für die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit von Ergebnissen bildet. Eine präzise Erfassung der Messbedingungen, der verwendeten Geräte, des Aufbaus sowie der Ergebnisse ermöglicht die Nachvollziehbarkeit und gegebenenfalls die Reproduzierbarkeit der Versuche. Gleichzeitig ermöglicht die Dokumentation eine fundierte Auswertung der Daten und erlaubt die Identifikation und Erklärung von Unsicherheitsquellen oder Abweichungen. Eine lückenlose und transparente Messdokumentation ist folglich von entscheidender Bedeutung, um die Validität der Forschungsergebnisse sicherzustellen und die Vergleichbarkeit mit anderen Studien oder Referenzwerten zu gewährleisten. In der Anlage D.1 finden sich alle wesentlichen Punkte der angewandten Messdokumentation.

4.3 Test Case Study: 22 kW WPT-System

Im Rahmen des Forschungsvorhabens TALAKO (Taxiladekonzept für Elektrotaxis im öffentlichen Raum) wurde ein innovatives Ladekonzept entwickelt, das die Vorteile der induktiven Ladetechnologie nutzt [81]. Das zweiphasige Projekt (siehe Abbildung 4.13) umfasste zunächst die Entwicklung und Installation eines WPT-Prototyps für ein Taxi auf dem Betriebshof der Taxi Stephany GmbH (Mülheim an der Ruhr). Nach erfolgreicher Inbetriebnahme und Validierung wurde dieser in der zweiten Phase für den öffentlichen Raum adaptiert. Das WPT-System mit 22 kW Übertragungsleistung und 85 kHz Betriebsfrequenz wird von der Fa. INTIS (Integrated Infrastructure Solutions GmbH) entwickelt und produziert [167]. In einer Taxi-Wartespur in der Kölner Innenstadt wurden sechs Primärspulen in Reihe integriert, sodass Elektrotaxis während des Wartens und Vorrückens geladen werden können. Die Sekundärspulen sind in LEVC TX eingebaut [160], Plug-In-Hybride mit Range Extender, die vor allem als Londoner Taxis (Black Cabs) bekannt sind und von LEVC (London Electric Vehicle Company) hergestellt werden.

In der modernen Produktentwicklung stellt die Erfassung und Abschätzung von EMF eine entscheidende und unabdingbare Funktion dar. Diesbezüglich wurden im Rahmen von TALAKO eine entsprechende Simulationsumgebung sowie ein Messkonzept zur Bestimmung der EMF entwickelt.

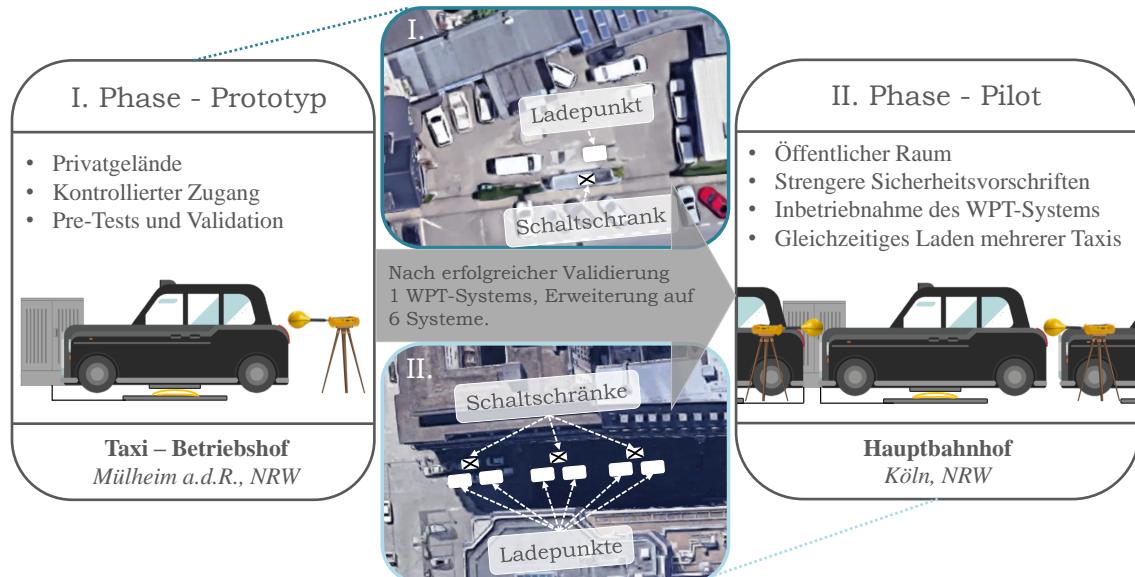


Abbildung 4.13: Übersichtsgrafik des zweiphasigen Forschungsprojektes TALAKO.

4.3.1 Messungen: 1 Taxi

Im Verlauf des Projektes wurden wiederholte EMVU-Messungen durchgeführt, um die Ergebnisse vorheriger Simulationen zu validieren und eine Grundlage für die Bestimmung der Exposition zu schaffen. Dementsprechend wurden mehrere Messreihen an der Prototyp- sowie Pilotanlage durchgeführt. EMVU-Messungen wurden jeweils an den Pre-Release-Versionen der Prototyp- sowie Pilotanlage vor Ort beim Entwickler und Hersteller, der INTIS GmbH in Lathen, vorgenommen. Nach erfolgreich abgeschlossener Validierung konnten die finale Prototyp- sowie Pilotanlage ausgeliefert werden. Im Anschluss an die Auslieferung der Prototypanlage nach Mülheim an der Ruhr und der Pilotanlage nach Köln wurden erneut EMVU-Messungen durchgeführt, deren Ergebnisse im Folgenden präsentiert werden.

Die Positionierung des WPT-Systems wurde durch ein in den Fahrzeugen integriertes Positionierungssystem realisiert. Dieses System ermöglichte eine präzise Ausrichtung des GA- und VA-Moduls, um eine effiziente Energieübertragung sicherzustellen. In der Folge konnten Abweichungen minimiert und die Kopplungseffizienz optimiert werden. Dies ist insbesondere für eine hohe Ladeleistung und geringe Streufeldverluste von entscheidender Bedeutung. Dabei wurde ein gewisser Spielraum bei der Positionierung zugelassen, sodass eine millimetergenaue Ausrichtung des Fahrzeugs nicht erforderlich war.

In der Abbildung 4.14 ist ein definierter Messpunkt auf der Evaluationslinie (in Blau auf dem Boden markiert) auf den drei verschiedenen Höhen (500 mm, 1.000 mm und 1.500 mm) am Fahrzeugheck aus der Messreihe an der Prototypanlage dargestellt. Das Fahrzeug ist optimal positioniert ($X = 0$, $Y = 0$). Es wird deutlich, dass der Effektivwert der magnetischen Flussdichte mit steigender Positionierung der Magnetfeldsonde abnimmt. Bei einer Höhe von 500 mm wird ein Effektivwert der magnetischen Flussdichte von $0,61 \mu\text{T}$ erreicht, was $2,26\%$ des Grenzwertes der ICNIRP von $27 \mu\text{T}$ entspricht. Dieser Wert kann als unkritisch kategorisiert werden. Das Magnetfeld wird zur Fahrzeugfront und -heck hin gut von der Karosserie abgeschirmt, sodass an diesen Bereichen geringere magnetische Flussdichten gemessen werden als an den Fahrzeugseiten. Aufgrund der geringen Breite der Karosserie ist die Schirmung seitlich weniger effektiv, sodass deutlich höhere magnetische Flussdichten gemessen werden. In Abbildung 4.15 sind die Messwerte der magnetischen Flussdichte an der Hintertür auf der Fahrerseite vergleichend dargestellt.

Darüber hinaus wurden zur Untersuchung des Einflusses der Karosserie zwei Messungen auf dem Klappsitz (links in Fahrtrichtung) durchgeführt. Bei der ersten Messung war die Schiebetür (links in Fahrtrichtung) offen und die vier Sitzpositionen wurden mit der Sonde gemessen, wie in Abbildung 4.9 gezeigt. Bei der zweiten Messung waren alle Türen geschlossen und die vier Sitzpositionen wurden erneut

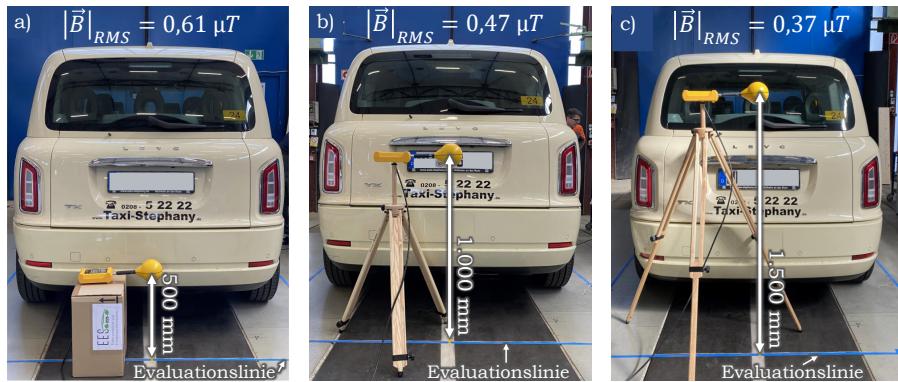


Abbildung 4.14: EMVU-Messung am Heck des Taxis an der Prototypanlage ($I_{p,RMS} = 55 \text{ A}$, $P_{out} = 20 \text{ kW}$).

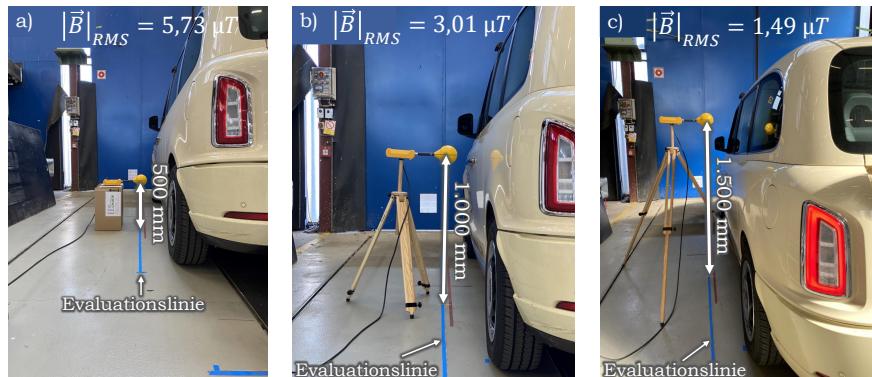


Abbildung 4.15: EMVU-Messung neben der Hintertür (Fahrerseite) an der Prototypanlage ($I_{p,RMS} = 55 \text{ A}$, $P_{out} = 20 \text{ kW}$).

auf demselben Sitz gemessen. Der Einfluss der Tür ist deutlich sichtbar. An drei der vier Positionen waren die Werte um mehr als 50 % kleiner. Mit einer maximal gemessenen Magnetflussdichte von $1,17 \mu\text{T}$ liegen die gemessenen Werte deutlich unter $27 \mu\text{T}$, unabhängig davon, ob die Tür geöffnet oder geschlossen war. Das Ergebnis dieser Messreihe wird in Abbildung 4.16 dargestellt. Auf dem Fahrzeugboden unmittelbar über der Sekundärspule wurde der insgesamt höchste Messwert mit $1,89 \mu\text{T}$ (7 % des Grenzwertes von $27 \mu\text{T}$) erfasst. Je höher die Magnetfeldsonde gehalten wird (z. B. Kopfhöhe), desto kleiner wird der Messwert.

Zusätzlich zu den Messungen bei optimaler Spulenausrichtung, wie in Abbildung 4.22, wurden weitere Messungen mit einem lateralen Versatz der Spulen durchgeführt. Das Fahrzeug einschließlich der Sekundärspule wurde um 70 mm in Y-Richtung versetzt (Ausgangspunkt: Mitte der Primärspule) (siehe Abbildung 4.17). Entsprechend wurden die Messungen auf der Fahrerseite durchgeführt, da man sich näher an der Pri-

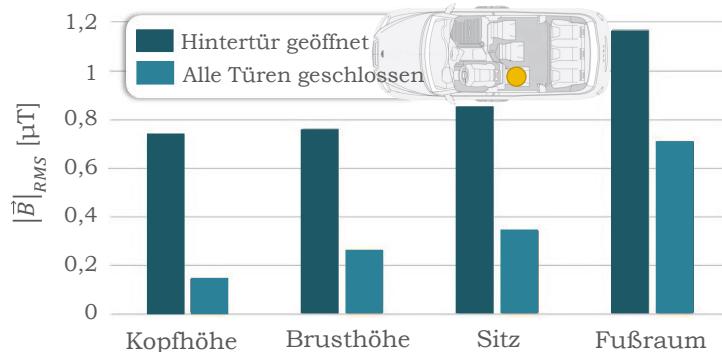


Abbildung 4.16: Einfluss der Karosserie anhand der EMVU-Messung auf dem Klappssitz (in Fahrtrichtung links) bei geschlossener und geöffneter Hecktür ($I_{p,RMS} = 55 \text{ A}$, $P_{out} = 20 \text{ kW}$).

märspule befindet. Infolge eines Versatzes ist eine Verschiebung der Evaluationslinie erforderlich, um den Abstand von 200 mm gewährleisten zu können. Die Messergebnisse mit Versatz zeigen eine leichte Erhöhung des Magnetfeldes zwischen 8,25 % bis 14,6 % im Vergleich zu den Messungen bei optimaler Positionierung. Aufgrund der seitlichen Verschiebung des Fahrzeugs ist eine Reduktion der Abschirmung des Magnetfeldes durch die Karosserie zu verzeichnen, was in einer leichten Erhöhung der Messwerte resultiert. Die erfassten Werte bleiben jedoch deutlich unter dem Grenzwert von 27 μT und erreichen maximal 28,93 % des Grenzwertes.

Bei den durchgeführten EMVU-Messungen im Fahrzeuginnenraum zeigen sich Unterschiede zwischen einer optimalen Positionierung und bei Versatz. Die Messergebnisse sind an verschiedenen Sitzpositionen erhoben worden und in Abbildung 4.18 visualisiert. Bei Versatz wird auf allen Positionen ein vergleichsweise höherer Wert gemessen. Die Werte sind weit vom Grenzwert von 27 μT entfernt.

Sobald die Magnetfeldsonde die Grenze unter die Fahrzeugkarosserie überschreitet, wird der ICNIRP-Grenzwert von 27 μT überschritten. In den einzigen dokumentierten Szenarien, in denen eine solche Grenzwertüberschreitung registriert wurde, befand sich die Sonde auf dem Boden unter dem Fahrzeug (vgl. Abbildung 4.19). Die Positionierung erfolgte in unmittelbarer Nähe zur Primärspule auf der Beifahrerseite. An dieser Stelle lassen sich Magnetfeldstärken beobachten, wo die Magnetfeldstärken den Grenzwert um das Doppelte bis zu 15-fache überschreiten, insbesondere im Bereich zwischen Primär- und Sekundärspule. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer detaillierten Betrachtung der Exposition in den vorliegenden Anwendungsfällen (vgl. Kapitel 3.4).

Eine Überschreitung des ICNIRP-Grenzwertes für die magnetische Flussdichte ist jedoch unbedenklich, sofern die körperinternen elektrischen Felder die ICNIRP-Basisgrenzwerte einhalten (siehe Abbildung 3.8). Diese Bedingung ist in den durch-

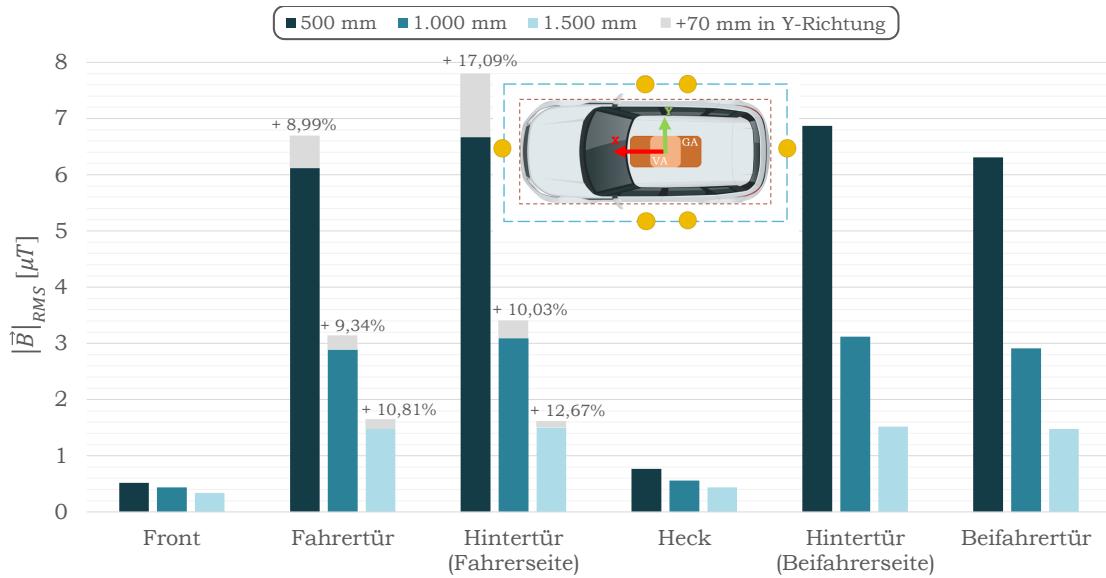


Abbildung 4.17: Vergleich der EMVU-Messwerte des WPT-Systems ohne und mit seitlichem Versatz von $\Delta Y = \pm 70$ mm ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW) rund um das Fahrzeug.

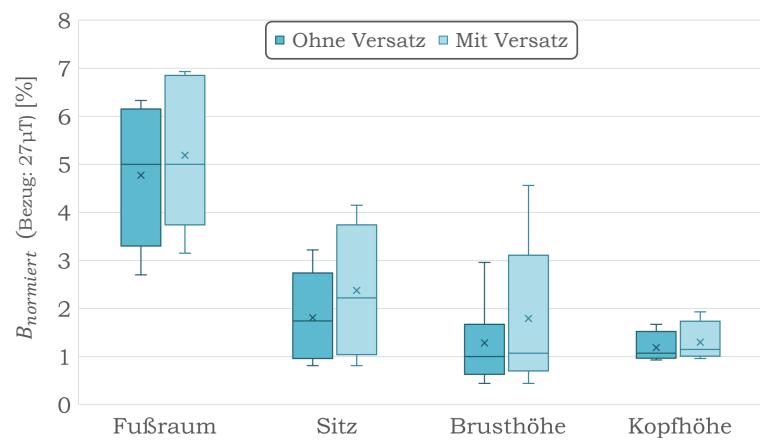


Abbildung 4.18: Vergleich der Messwerte auf verschiedenen Sitzpositionen ohne und mit seitlichem Versatz von $\Delta Y = \pm 70$ mm ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW).

geführten Messungen erfüllt, sodass die Sicherheit von Menschen und Tieren gewährleistet bleibt (siehe Abbildung 4.25). Die EMVU-Messwerte an der Fahrzeugfront sowie am Heck zeigen weiterhin keine Auffälligkeiten oder Bedenken hinsichtlich einer möglichen Expositionssüberschreitung.

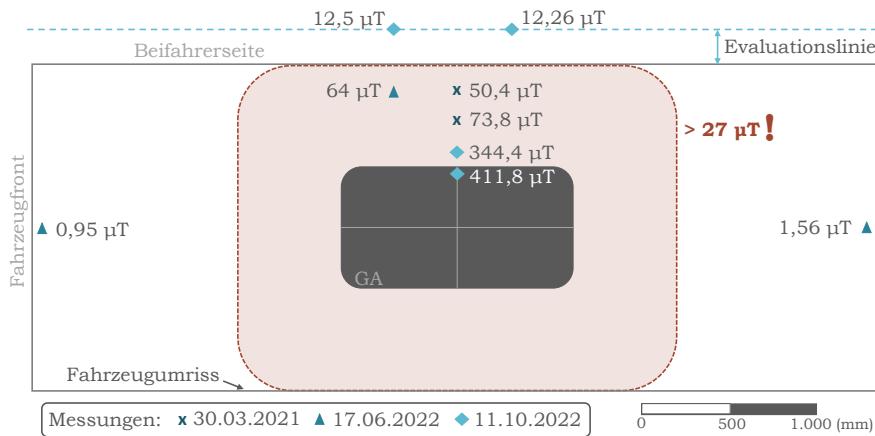


Abbildung 4.19: EMVU-Messungen unter dem Fahrzeug: Messpunkte und -werte aus unterschiedlichen Messreihen (siehe Tabelle 4.4).

Tabelle 4.4. Ergebnisse zu EMVU-Messungen unter dem Fahrzeug.

Messpunkt	Datum	Abstand von GA-Mitte zur Sondenmitte	I_P [A]	U_P [V]	SoC [%]	$ \vec{B} _{RMS}$ [µT]
Mittig zwischen Beifahrer- und Hintertür	30.03.2021	620 mm	58,6	346	37	73,8
		800 mm	58	348	34	50,4
	11.10.2022	437 mm	50	357	48	344,4
		317 mm	50	353	45	411,8
Fahrzeugfront	17.06.2022	2372 mm	55	371	64	0,95
Fahrzeugheck	17.06.2022	2372 mm	55	371	65	1,4
Beifahrtür	17.06.2022	780 mm	55	369	61	64

4.3.2 Messungen: 2 Taxis

Im Rahmen der Pilotphase des Forschungsprojekts TALAKO besteht die Möglichkeit, dass mehrere Taxen an den sechs Ladepunkten hintereinander gleichzeitig laden können. Um das Verhalten magnetischer Felder, bspw. deren Überlagerung, zu untersuchen, wurden Magnetfeldmessungen durchgeführt, bei denen zwei Fahrzeuge hintereinander stehen und gleichzeitig geladen werden.

Die Abbildung 4.20 zeigt die Messergebnisse der zwei hintereinander stehenden Taxen auf allen drei Messhöhen. Bei einer optimalen Positionierung der Taxen wurde neben dem Fahrzeug ein maximaler Wert von $6,45 \mu\text{T}$ gemessen, was einer ICNIRP-Grenzwertausschöpfung von 23,89 % entspricht. An der Fahrzeugfront bzw. am Heck wurde ein Messwert von $1 \mu\text{T}$ nicht überschritten. Die durchgeführten Magnetfeldmessungen entsprechen den Standards [35, 55, 56]. Es konnte bestätigt werden, dass der abgeleitete ICNIRP-Grenzwert der magnetischen Flussdichte von $27 \mu\text{T}$ nicht überschritten wird. Somit kann ausgeschlossen werden, dass Grenzwertüberschreitungen bei der körperinternen elektrischen Feldstärke (Basiswerte der ICNIRP) auftreten. Dies gilt ebenfalls bei einem Versatz der beiden Fahrzeuge in X-Richtung (vgl. Abbildung 4.20). Eine Vergrößerung des Abstands der Taxen um 420 mm wurde vorgenommen. In diesem Fall konnte eine Erhöhung der magnetischen Flussdichte von lediglich 0,48 % zwischen den Taxen gemessen werden (vgl. Abbildung 4.20). Neben den Fahrzeugtüren auf der Fahrerseite haben die Messwerte bis zu +25,23 % zugenommen. Mit einem maximalen Wert von $7,48 \mu\text{T}$ wird der ICNIRP-Grenzwert von $27 \mu\text{T}$ ebenfalls nicht überschritten.

Bei einer weiteren Messung werden die Taxen -50 mm in Y-Richtung versetzt. Zusätzlich zu den drei definierten Messhöhen sind Messungen auf dem Boden bei $56,4 \text{ mm}$ vorgenommen worden. Sowohl auf den Standardhöhen wie auf Bodenhöhe sind keine Grenzwertüberschreitungen von $27 \mu\text{T}$ zu verzeichnen. Allerdings wird ersichtlich, dass die Messwerte auf Bodenhöhe knapp doppelt so hoch sind wie vergleichsweise die Messwerte auf 500 mm . Mit $12,91 \mu\text{T}$ ist der höchste Wert bei $56,4 \text{ mm}$ gemessen und eine Grenzwertausschöpfung von 47,81 % erreicht worden. Beim seitlichen Versatz des Fahrzeuges in Y-Richtung liegt ein maximaler Zuwachs von +29 % vor und eine Grenzwertausschöpfung von 60,78 %.

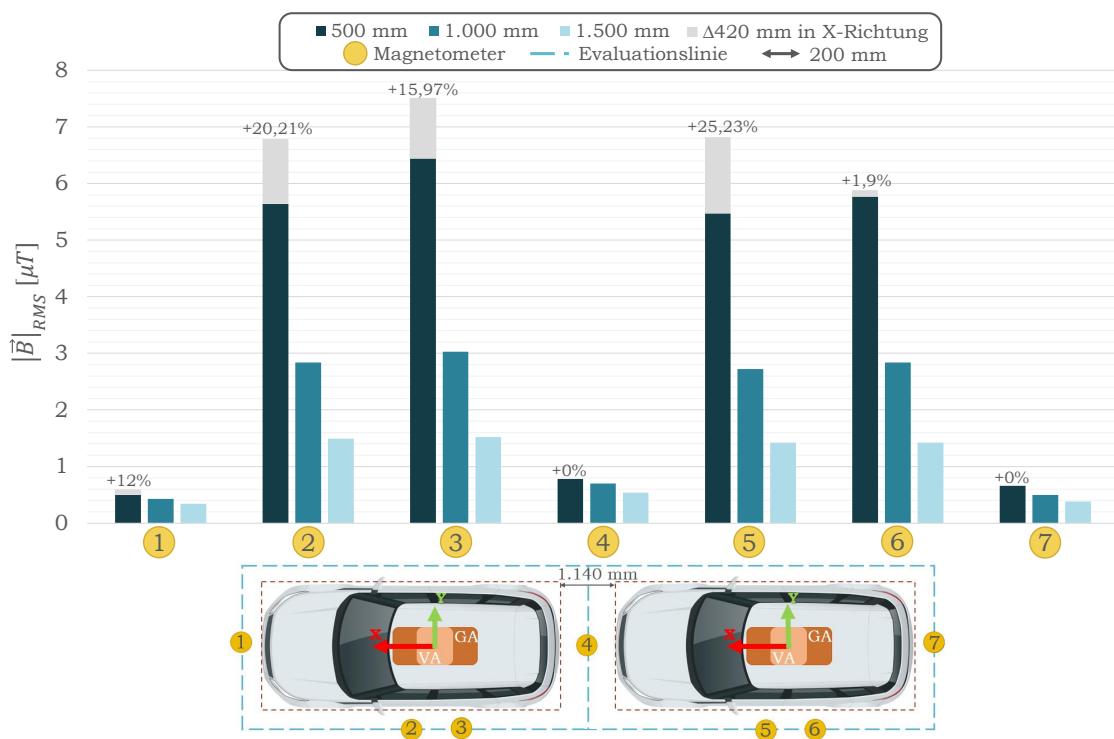


Abbildung 4.20: EMVU-Messungen bei zwei hintereinander stehenden Taxen ohne und mit Versatz in $\Delta X = \pm 420$ mm ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW).

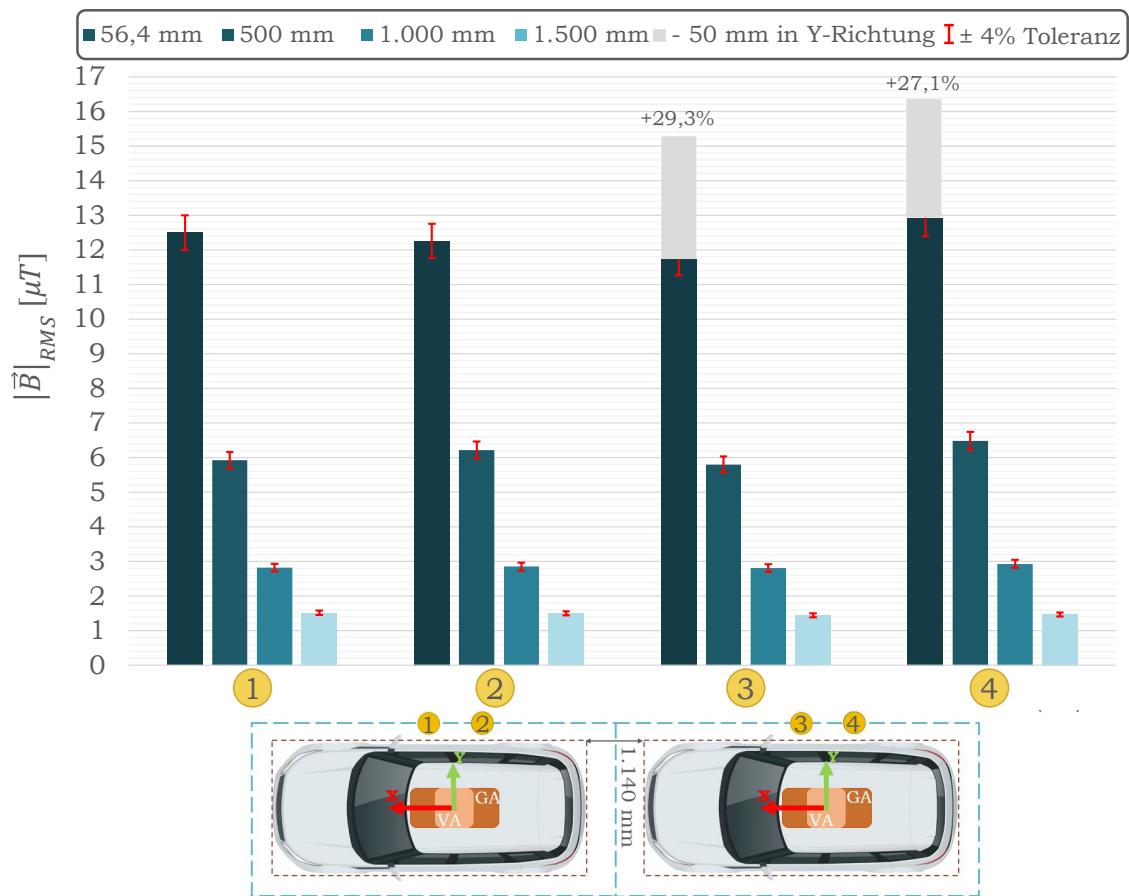


Abbildung 4.21: EMVU-Messungen bei zwei hintereinander stehenden Taxen ohne und mit Versatz in $\Delta Y = -50$ mm ($I_{p,RMS} = 55$ A, $P_{out} = 20$ kW).

4.3.3 Simulative und messtechnische Magnetfeldauswertung

Die Simulationsergebnisse werden im Kontext der gemessenen magnetischen Flussdichten bewertet und liefern wesentliche Erkenntnisse über die Genauigkeit des Simulationsmodells. Die blau gestrichelte Linie um die Fahrzeuge (Abbildung 4.22 und 4.24) dient als Evaluations- und Messlinie für die magnetische Flussdichte auf den Höhenpositionen (56,4 mm, 500 mm, 1.000 mm, 1.500 mm). Die gelben Punkte kennzeichnen die Sondenpositionen um die Fahrzeugkarosserie herum (siehe Kapitel 4.2). In der Abbildung 4.22 ist der Verlauf der simulierten magnetischen Flussdichte rundum ein Taxi zusammen mit den gemessenen Werten an den Messpunkten (gelbe Punkte) für jede Höhenposition dargestellt (basierend auf den Abbildungen 4.10 und 4.11). In der Abbildung 4.23 sind die Ergebnisse von der Fahrzeugfront präsentiert. Zusätzlich ist der Verlauf der simulierten magnetischen Flussdichte mit zwei gleichzeitig ladenden Taxis in einem Längsabstand von 1.140 mm (x-Achse) in Abbildung 4.24 dargestellt (basierend auf Abbildung 4.11 und 4.12). Die Tabellen 4.5 und 4.6 präsentieren eine übersichtliche Darstellung der Mess- und Simulationswerte, wobei die prozentuale Abweichung zwischen den experimentellen und simulierten Ergebnissen ebenfalls angegeben ist.

Unter Berücksichtigung der Messgeräteunsicherheit von $\pm 4\%$ werden gute Ergebnisse erzielt [163]. In beiden Szenarien (Abbildung 4.22, 4.23 und Abbildung 4.24) sind das GA- und VA-Modul optimal zueinander ausgerichtet (kein Versatz).

Bei den Messungen auf Bodenniveau (Sondenradius 56,4 mm) sind tendenziell höhere Magnetfeldstärken zu erwarten, da sich die Messpunkte näher am Spulensystem befinden. Durch den offenen Spalt zwischen dem Fahrzeugboden und der Karosserie kann das Magnetfeld ungehindert austreten, wodurch eine erhöhte Exposition in diesem Bereich zu erwarten ist. Neben dem Fahrzeug wurden Magnetfeldstärken zwischen 11,74 μT und 12,91 μT gemessen. Die Abweichung zu den simulierten Werten liegt in einem Bereich von 0,32 % bis 5,54 %, was auf eine hohe Übereinstimmung zwischen Simulation und Messung hinweist (siehe Tabelle 4.6). An der Fahrzeugfront ist lediglich ein minimaler Anstieg der magnetischen Flussdichte zu beobachten. Der maximal gemessene Wert beträgt 0,74 μT , während die Simulation einen nahezu identischen Wert von 0,75 μT liefert (siehe Abbildung 4.23).

Auf der 500 mm lagen die gemessenen $|\vec{B}|_{\text{RMS}}$ -Werte zwischen 0,52 μT und 6,87 μT (siehe Tabellen 4.5, 4.6). Die Messwerte auf 500 mm zeigen eine starke Übereinstimmung mit der Simulation über alle Punkte hinweg, wobei die prozentualen Abweichungen zwischen 0,71 % und 35,06 % liegen. Der höchste prozentuale Fehler tritt am Fahrzeugheck auf, wo der gemessene Wert höher als der simulierte Wert ist. Diese Diskrepanz könnte auf lokale Variationen des Magnetfelds oder auf Messunsicherheiten an diesem spezifischen Punkt zurückzuführen sein. Die relativ hohe prozentuale

Abweichung könnte darauf hinweisen, dass die Simulation möglicherweise nicht die gesamte Komplexität des Magnetfelds in den Randbereichen erfasst. Zudem könnten die sehr niedrigen gemessenen Magnetfeldwerte zusätzliche Messungenauigkeiten verursachen und die beobachteten Abweichungen verstärken.

Auf 1.000 mm zeigten die simulierten Werte einen ähnlichen Verlauf. Die prozentuale Abweichung auf 1.000 mm war moderat und lag zwischen 0,32 % und 19,64 % (siehe Tabelle 4.5 und 4.6). Wie bei 500 mm können die höheren Fehler auf die Position der Messpunkte und die Genauigkeit des Messgeräts zurückgeführt werden.

Die Messungen auf 1.500 mm weisen die größte Abweichung zwischen simulierten und gemessenen Werten auf, mit Fehlern zwischen 0,68 % und 13,64 % (siehe Tabelle 4.5 und 4.6). Die größten Diskrepanzen treten an der Fahrzeugfront und -heck auf. Diese höheren Abweichungen könnten auf die geringere Magnetfeldstärke in dieser Höhe und größere Abschirmung durch die Fahrzeugkarosserie zurückzuführen sein, wodurch das Messsystem anfälliger für Ungenauigkeiten wird.

Die Resultate der Simulationen zeigen eine signifikante Übereinstimmung mit den empirischen Werten, wobei die Abweichungen innerhalb desselben Größenbereichs liegen. Im Gegensatz zu einer Vielzahl vorangegangener Studien, die ausschließlich unter Laborbedingungen durchgeführt wurden, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit Messungen im realen Umfeld präsentiert. Trotz der höheren Komplexität und potenziell größeren Störeinflüsse weisen diese eine hohe Korrelation mit den simulierten Kurvenverläufen auf, wobei lediglich geringfügige Abweichungen auftreten. Die Simulationen basieren auf einem stark vereinfachten Fahrzeugmodell, das lediglich aus einer Stahlplatte und der Primärspule besteht. Dennoch wird demonstriert, dass selbst mit einem derart reduzierten Modell belastbare Ergebnisse erzielt werden können, die mit Messungen im realen Umfeld übereinstimmen. Dieser Aspekt ist in der bisherigen Literatur nicht dokumentiert.

Darüber hinaus wird in dieser Arbeit das bestehende Messkonzept über den Stand der Wissenschaft hinaus erweitert, um Messungen an mehreren gleichzeitig ladenden Fahrzeugen zu ermöglichen.

Diese Ergebnisse weisen auf die Robustheit der Simulationsmodelle hin, wobei möglicherweise nicht alle lokalen Magnetfeldvariationen vollständig erfasst werden. Es ist jedoch festzuhalten, dass alle gemessenen Werte signifikant unter dem von der ICNIRP definierten Grenzwert von 27 μT liegen [52].

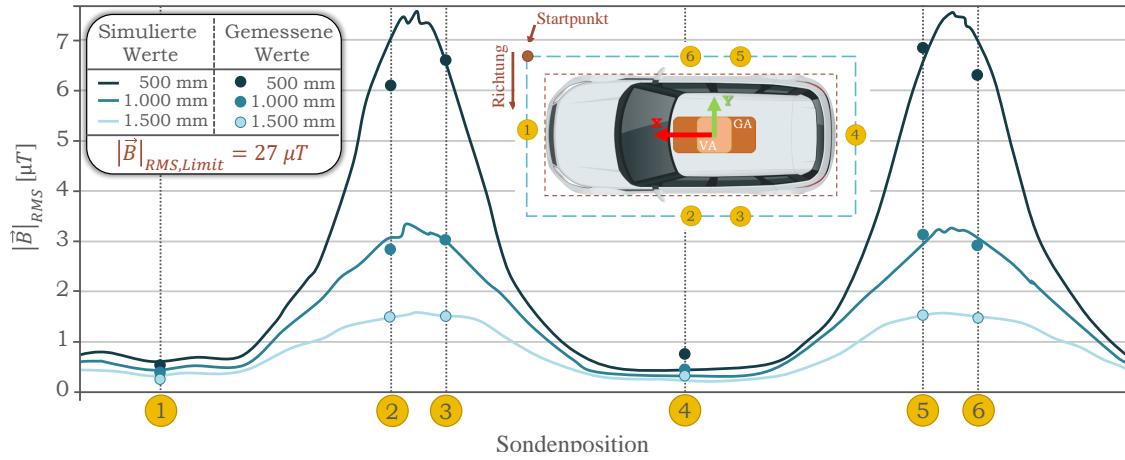


Abbildung 4.22: Simulierte und gemessene magnetische Flussdichte bei einem aktiven WPT-System ohne Versatz ($I_{p,RMS} = 55 \text{ A}$, $P_{out} = 20 \text{ kW}$, Messpunkte rundum das Fahrzeug).

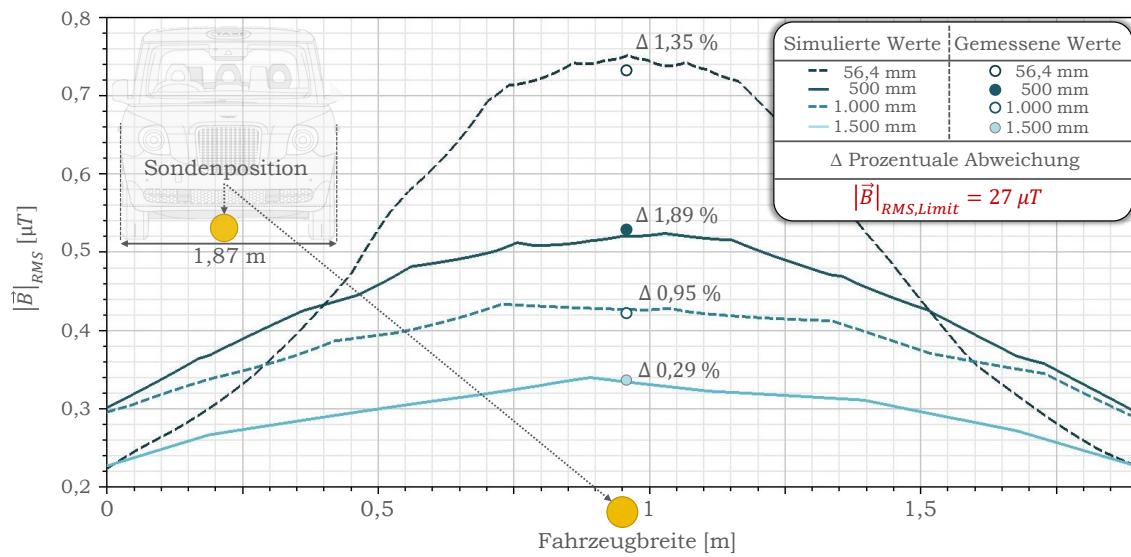


Abbildung 4.23: Simulierte und gemessene magnetische Flussdichte bei einem aktiven WPT-System ohne Versatz ($I_{p,RMS} = 55 \text{ A}$, $P_{out} = 20 \text{ kW}$, Messpunkt vor dem Fahrzeug).

Tabelle 4.5. Vergleich der $|\vec{B}|_{\text{RMS}}$ -Werte: Messung vs. Simulation an den Punkten 1-6 (Abbildung 4.22) und in verschiedenen Höhen (siehe Abbildung 4.11).

Messhöhe	$ \vec{B} _{\text{RMS}}$ [µT]	Sondenposition					
		1	2	3	4	5	6
500 mm	Messung	0,52	6,12	6,67	0,77	6,87	6,31
	Simulation	0,59	7,05	6,52	0,5	6,92	7,0
	Prozentuale Abweichung	13,46	15,2	2,25	35,06	0,71	10,94
1.000 mm	Messung	0,44	2,89	3,09	0,56	3,12	2,91
	Simulation	0,5	3,11	3,1	0,45	2,98	3,1
	Prozentuale Abweichung	13,64	7,61	0,32	19,64	4,49	6,53
1.500 mm	Messung	0,34	1,48	1,5	0,44	1,52	1,48
	Simulation	0,38	1,47	1,52	0,38	1,54	1,52
	Prozentuale Abweichung	11,76	0,68	1,33	13,64	1,32	2,7

Tabelle 4.6. Vergleich der $|\vec{B}|_{\text{RMS}}$ -Werte: Messung vs. Simulation an den Punkten 1-4 (Abbildung 4.24) und in verschiedenen Höhen (siehe Abbildung 4.11).

Messhöhe	$ \vec{B} _{\text{RMS}}$ [µT]	Sondenposition			
		1	2	3	4
56,4 mm	Messung	12,5	12,26	11,74	12,91
	Simulation	12,54	12,52	12,39	12,41
	Prozentuale Abweichung	0,32	2,12	5,54	3,87
500 mm	Messung	5,92	6,22	5,8	6,48
	Simulation	7,39	7,38	7,42	7,35
	Prozentuale Abweichung	24,83	18,65	27,93	13,43
1.000 mm	Messung	2,82	2,85	2,81	2,93
	Simulation	2,94	3,03	2,91	2,90
	Prozentuale Abweichung	4,26	6,32	3,56	1,02
1.500 mm	Messung	1,52	1,50	1,44	1,47
	Simulation	1,58	1,60	1,6	1,59
	Prozentuale Abweichung	3,95	6,67	11,11	8,16

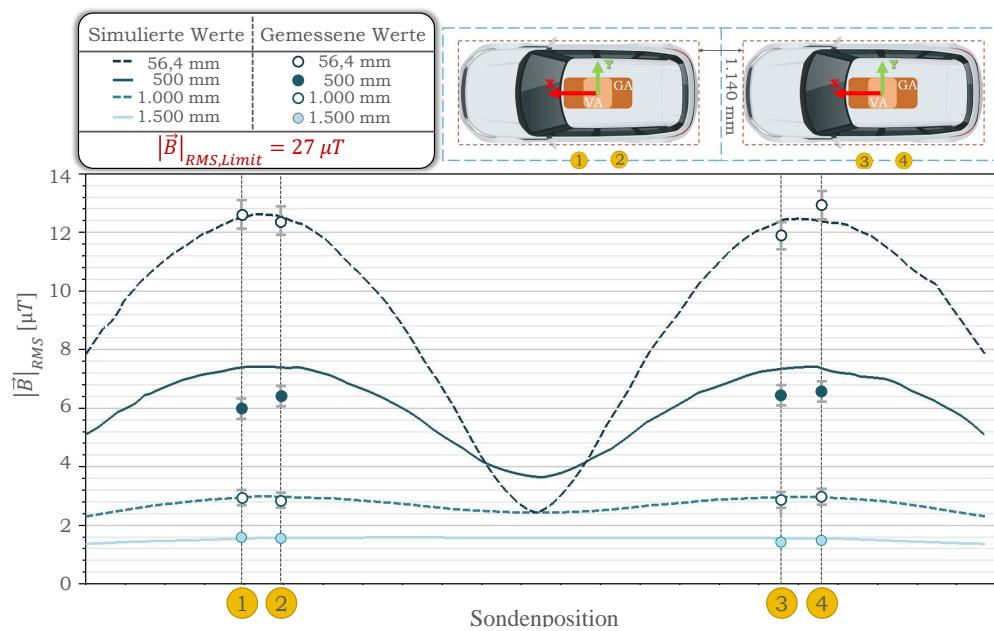


Abbildung 4.24: Simulierte und gemessene magnetische Flussdichte bei zwei hintereinander stehenden Taxen ohne Versatz ($I_{p,RMS} = 55 \text{ A}$, $P_{out} = 20 \text{ kW}$, Messpunkte neben den Fahrzeugen).

4.3.4 Expositionsauswertung

Die Durchführung von EMVU-Prüfungen für WPT-Systeme, die im öffentlichen Bereich eingesetzt werden, wird mit zunehmender Verbreitung dieser Technologie immer wichtiger, um die gesundheitliche Unbedenklichkeit für die Bevölkerung sicherzustellen. Um bereits in der Entwicklungsphase die Einhaltung der von der ICNIRP festgelegten Grenzwerte für elektrische Felder im Körper zu gewährleisten [52], sind, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, hochauflösende numerische Feldsimulationen für verschiedene mögliche Expositionsszenarien erforderlich. Um eine große Anzahl unterschiedlicher Feldexpositionen in kurzer Zeit simulieren und analysieren zu können, müssen die numerischen Berechnungen in High-Performance-Computing-Rechenzentren durchgeführt werden.

Basierend auf den von der ICNIRP 2010 und der DIN 50527 abgeleiteten Grenzwerten ist es im ersten Schritt notwendig, das niederfrequente Magnetfeld, das durch das WPT-System erzeugt wird, zu berechnen [52, 168]. Dies erfordert numerische Simulationen, die alle wesentlichen elektrisch leitfähigen Komponenten umfassen – sowohl das gesamte Ladesystem als auch die Fahrzeugkarosserie. Diese Modelle müssen geometrisch präzise aufgebaut sein, um eine realistische Verteilung der magnetischen Flussdichte zu gewährleisten, was zu komplexen Berechnungen führt und den Einsatz leistungsfähiger numerischer Methoden und Hochleistungsrechner unverzichtbar macht. Wenn die berechneten Magnetfeldexpositionen die ICNIRP-Grenzwerte erreichen oder überschreiten, müssen zusätzlich die inneren elektrischen Felder im Körper berechnet werden [169, 170].

In der Studie [152] werden verschiedene mögliche Expositionsszenarien analysiert, die im Rahmen des TALAKO-Projekts mit numerischen Simulationen bewertet wurden [81]. Dabei wird der frequenzskalierte Ansatz der SF-FDTD-Methode genutzt, um die Rechenzeit zu verkürzen und hochauflösende Feldsimulationen effizient durchzuführen. Zusätzlich wird die Co-Simulationsmethode mit dem Skalarpotentialansatz verwendet, um die im Körper induzierten elektrischen Felder bei Exposition mit niederfrequenten Feldern zu bestimmen [169]. Eine Überschreitung der ICNIRP-Referenzwerte bedeutet nicht zwangsläufig, dass die zugrunde liegenden Basisgrenzwerte der ICNIRP verletzt werden. Diese Referenzwerte werden unter der Annahme der maximalen Feldkopplung mit dem menschlichen Körper berechnet, um den größtmöglichen Schutz zu gewährleisten. Sollte dennoch eine Überschreitung festgestellt werden, sind zusätzliche numerische Analysen erforderlich, um die Exposition durch niederfrequente Felder anhand der im Körper induzierten elektrischen Felder genauer zu bewerten.

Es werden fünf Szenarien in [152] vorgestellt, die typische Alltagssituationen rund um ein Fahrzeug darstellen. Dazu werden zwei Menschmodelle, Hugo und Duke, mit unterschiedlicher Konstitution verwendet [171].

Die Ergebnisse der Expositionsszenarien zeigen, dass sowohl die Ausrichtung als auch der Abstand des biologischen Körpers zu einer niederfrequenten Feldquelle entscheidende Faktoren für die Körperexposition sind. Je näher ein Körperteil sich an der niederfrequenten Feldquelle befindet, desto höher fallen die elektrischen Feldstärken aus. Im Worst-Case Szenario in Abbildung 4.25 b), in dem das Modell Duke (Abbildung 4.25 a)) neben dem Fahrzeug liegt und drunter greift, treten im Unterarm und in der Hand hohe Feldwerte auf, die mit $|\vec{B}|_{\text{Max, RMS}} = 844,18 \mu\text{T}$ bei Weitem den ICNIRP-Referenzwert von $27 \mu\text{T}$ überschreiten. Nach zusätzlicher numerischer Abschätzung des körperinternen elektrischen Feldes mit $|\vec{E}|_{99\text{th, RMS}} = 1,39 \text{ V/m}$ wird der ICNIRP-Basisgrenzwert $|\vec{E}|_{99\text{th, RMS}} = 11,47 \text{ V/m}$ für eine Frequenz von 85 kHz eingehalten (siehe Abbildung 4.25 c)). Dementsprechend sind für alle betrachteten Expositionsszenarien keine gesundheitlichen Beeinträchtigungen der Allgemeinbevölkerung durch niederfrequente Magnetfelder zu erwarten [152].

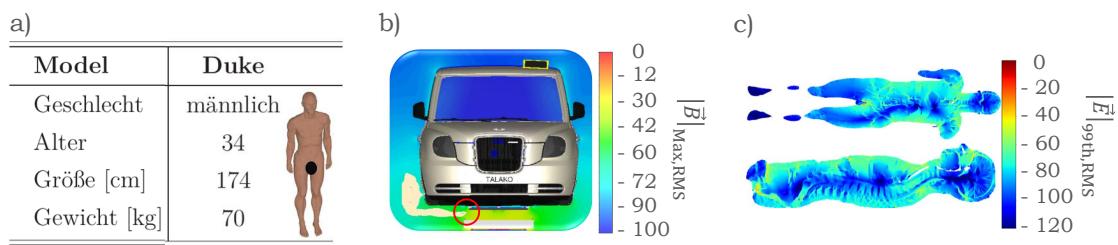


Abbildung 4.25: Worst-Case Expositionsszenario aus [152].

4.4 Simulationsbasierte Fallstudie: 50 kW WPT-System

Das Kapitel 4.3 fokussierte sich auf die Evaluierung der Magnetfeldsimulationen eines WPT-Systems mit einer Leistung von 22 kW. Dabei wurde insbesondere die anspruchsvolle Herausforderung adressiert, dieses System in offenen und öffentlichen Bereichen zu simulieren. Im Rahmen des TALAKO-Projekts wurde ein Ladekonzept für Elektrotaxis entwickelt, welches auf aktuellen Standards basiert. Zur Evaluierung der Simulationsergebnisse wurde ein Messkonzept entwickelt, welches Magnetfeldmessungen für diverse Szenarien beinhaltet. Diese umfassen ein ladendes Taxi mit und ohne Versatz sowie zwei gleichzeitig ladende Taxis mit und ohne Versatz. Die Messungen dienen der Verifizierung der Simulationsergebnisse und sind in Kapitel 4.3.1 und 4.3.2 näher beschrieben. In den untersuchten Expositionsszenarien, bei denen zwei menschliche Modelle in verschiedenen Positionen berücksichtigt wurden,

konnte festgestellt werden, dass die gemessenen und simulierten Magnetflussdichten den ICNIRP-Empfehlungen entsprechen [52]. Dies lässt den Schluss zu, dass das im TALAKO-Projekt implementierte WPT-System keine nachteiligen Auswirkungen auf die Gesundheit der allgemeinen Bevölkerung hat (siehe Kapitel 4.3.4). Die Resultate des spezifischen Anwendungsszenarios im Rahmen des TALAKO-Projekts (Stop-and-Go-Laden) legen nahe, dass einfache unipolare, runde Spulendesigns eine vielversprechende Option darstellen. Diese Designs zeichnen sich durch eine Kombination aus Einfachheit und Effizienz aus, wodurch sie den Anforderungen der Anwendung in optimaler Weise gerecht werden. Das in Kapitel 4.2 vorgestellte Messkonzept kann auf andere WPT-Systeme übertragen werden. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Ergebnisse aufgrund von Variationen der Bedingungen in verschiedenen Anwendungen möglicherweise nicht direkt übertragbar sind. Dennoch können die Messungen als nützlicher Referenzwert zur Abschätzung der Ladeleistung in ähnlichen Szenarien dienen.

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich bereits mehrere Studien, die sich mit den Auswirkungen von EMF in WPT-Systemen auf leichte EVs mit Ladeleistungen bis zu 22 kW befasst haben [13, 153, 172]. Für die Untersuchung der höheren Ladeleistungen, die für schwere Nutzfahrzeuge erforderlich sind, ist jedoch eine Berücksichtigung der tolerierbaren Ladezeiten erforderlich. In der Untersuchung von WPT-Systemen mit Ladeleistungen von 44 kW bis 100 kW zielten frühere Arbeiten [173–175] hauptsächlich darauf ab, die Magnetfelder während des Ladens einzelner EV zu reduzieren. Dies erfolgte durch Maßnahmen wie Abschirmung, Kompen-sation und Spulendesigns. Trotz noch bestehender Schwierigkeiten werden diese Problematiken durch laufende Forschungsaktivitäten sowie Investitionen seitens der Industrie kontinuierlich adressiert, wodurch eine Realisierung von WPT für Elektro-LKWs zunehmend möglich erscheint [176].

Im Falle von Parkplätzen oder Depots, in denen eine simultane oder konsekutive Ladung mehrerer EVs erfolgt, ist eine Evaluierung der Magnetfeldüberlagerung unerlässlich, insbesondere im Kontext von hochleistungsfähigen WPT-Systemen.

Im vorliegenden Kapitel wird eine reale Anwendung behandelt, wobei ein 50 kW statisches WPT-System mit unipolarem Spulendesign für ein schweres Nutzfahrzeug vorgeschlagen wird. Das unipolare Design wird ausgewählt, da es im Vergleich zu einem bipolaren Design die Fähigkeit aufweist, geringere Magnetfelder zu erzeugen [177]. Die Magnetfeldinteraktionen zwischen zwei nebeneinander stehenden LKWs, die mit dem designten WPT-System ausgestattet sind, werden mittels einer Finite-Elemente-Analyse unter Verwendung von ANSYS Electronics Desktop analysiert, wie in [178] beschrieben. Im Folgenden wird eine reproduzierbare Evaluierungsmethode vorgestellt, welche auf einer EMF-Simulation basiert. Die angewandte

Simulationsmethode ist an sich nicht neu, jedoch ermöglicht die Kombination geeigneter Evaluierungsebenen und -linien eine vergleichbare und auf andere Szenarien anwendbare simulative Evaluierungsmethode. Die Evaluierung der Magnetfelder erfolgt auf Oberflächen sowie entlang von Linien in definierten Abständen, wobei die folgenden Normen [35, 52, 55, 56] als Grundlage dienen. Darüber hinaus sollen diese Ergebnisse eine Grundlage für praktische Messungen bilden.

4.4.1 Simulationsmodell

Das in Abbildung 4.26 a) designete WPT-System umfasst ein GA- und ein VA-Modul. Diese wurden speziell für eine übertragene Leistung von 50 kW über einen magnetischen Spalt von 300 mm bei einer Betriebsfrequenz von 85 kHz ausgelegt. Die Größe des VA-Moduls wurde mit 900 mm x 700 mm so gewählt, dass sie den Abmessungen des Fahrzeugunterbodens entspricht. Das GA-Modul weist eine Größe von 1.400 mm x 700 mm auf und ist in Längsrichtung verlängert. Diese Verlängerung bietet zusätzlichen Raum für das Manövriren beim Parken, sowohl in Vorwärts- als auch in Rückwärtsrichtung. Für den Nachbau des LKW-Unterbodens wird eine hochfeste Stahlplatte mit den Maßen 2.300 mm x 2.500 mm x 1 mm verwendet, die aus [35] stammt und oberhalb der VA-Aluminiumabschirmung platziert wird. Die gesamte Simulation umfasst bis zu 1,3 Mio. Netzelemente. Dabei wurden Wirbelströme innerhalb der Platten mittels der adaptiven Netzberechnungsmethode von ANSYS Electronics Desktop sorgfältig berücksichtigt.

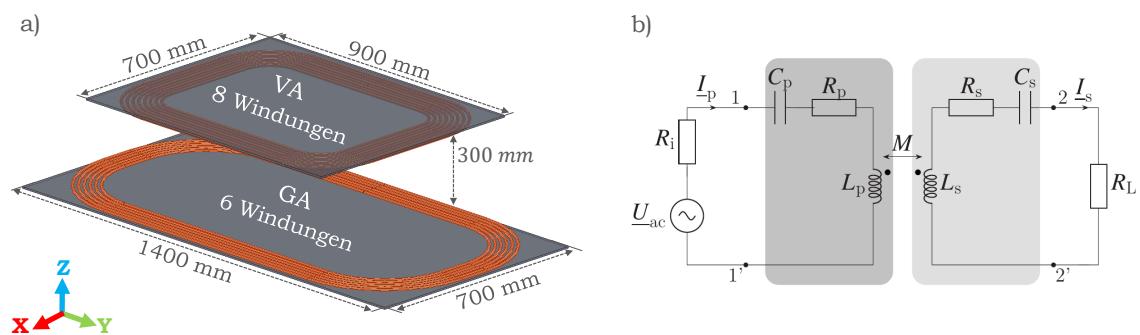


Abbildung 4.26: Designtes WPT-System: a) Anordnung des GA- und VA-Moduls, b) Ersatzschaltbild.

Die Abbildung 4.26 b) präsentiert den vereinfachten Schaltkreis des simulierten WPT-Systems. Wie zu erkennen ist, findet eine S/S-Kompensation Verwendung. Der Wert der entsprechenden Primärkapazität C_p sowie der Sekundärkapazität C_s für die S/S-Kompensation wird mittels

$$C_{p,s} = \frac{1}{\omega^2 \cdot L_{p,s}} \quad (4.4)$$

bestimmt, wobei die Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi f$ und die Betriebsfrequenz $f = 85$ kHz ist. Die übertragene Leistung P_{out} ist auf 50 kW mit einer Ausgangsspannung U_L von 450 V festgelegt. Basierend auf diesen angenommenen Werten kann der Sekundärstrom I_s wie folgt berechnet werden:

$$I_s = \sqrt{\frac{P_{out}}{R_L}}. \quad (4.5)$$

Die folgenden Gleichungen werden verwendet, um die Eingangsspannung U_{in} sowie den Primärstrom I_p bei Resonanz zu definieren:

$$U_{ac} = (R_i + R_p) \cdot I_p - j\omega M \cdot I_s, \quad (4.6)$$

$$I_p = -\frac{I_s \cdot (R_L + R_s)}{j\omega M}, \quad (4.7)$$

$$M = k \cdot \sqrt{L_p \cdot L_s}. \quad (4.8)$$

In den zuvor präsentierten Gleichungen sind die folgenden Parameter zu berücksichtigen: der Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle U_{ac} , die Eigeninduktivität $L_{p,s}$ der Primär- / Sekundärspule, der parasitäre Widerstand $R_{p,s}$ der Primär- / Sekundärspule, der Kopplungskoeffizient k und die Gegeninduktivität M zwischen den Primär- und Sekundärspule. Die entsprechenden zusammengefassten und elektrischen Parameter für die verschiedenen Versätze sind in den Tabellen 4.7 und 4.8 aufgeführt. Gemäß den Empfehlungen in [35] sind die vorgeschriebenen Versätze $\Delta X = \pm 75$ mm (Seitwärtsrichtung) und $\Delta Y = \pm 100$ mm (Vorwärts-Rückwärts-Richtung). In Bezug auf das analysierte WPT-System lässt sich festhalten, dass die standardisierten Versätze keinen entscheidenden Einfluss auf die Magnetfeldverteilung bei einer Fahrzeuggröße wie der eines LKWs aufweisen. Daher werden neue Versätze angenommen: $\Delta X = \pm 150$ mm und $\Delta Y = \pm 400$ mm basierend auf der Längsvergrößerung der GA.

Tabelle 4.7. Spulenparameter des simulierten 50 kW WPT-Systems.

Offset ($\Delta X, \Delta Y$) [mm]	L_p [μH]	R_p [$\text{m}\Omega$]	L_s [μH]	R_s [$\text{m}\Omega$]	M [μH]
(-150, -400)	104,12	24,72	114,94	22,26	6,27
(-75, -100)	101,89	24,55	114,97	22,49	11,74
(0, 0)	101,47	24,44	114,96	22,62	12,64
(75, -100)	101,99	24,00	115,06	22,28	11,76
(150, -400)	104,11	24,62	114,90	22,41	6,26

Tabelle 4.8. Elektrische Parameter des simulierten 50 kW WPT-Systems.

Offset ($\Delta X, \Delta Y$) [mm]	U_{ac} [V]	I_p [A]
(-150, -400)	352,89	144,97
(-75, -100)	611,94	90,97
(0, 0)	693,01	82,06
(75, -100)	612,65	90,86
(150, -400)	352,18	144,99

4.4.2 Angewandte Methodik

Im Rahmen dieses Kapitels erfolgt eine Fokussierung auf zwei LKWs, welche gleichzeitig geladen werden, während sie nebeneinander geparkt sind. Der Fall, bei dem die LKWs hintereinander stehen, wird aufgrund der Abschirmung durch das Fahrzeug vernachlässigt. Da das WPT-System in der Regel direkt unter der Fahrerkabine installiert wird, ist das an der Vorderseite und den Seiten des Fahrzeugs auftretende Magnetfeld von besonderem Interesse. Aufgrund der vorliegenden Abschirmung durch den Fahrzeugaufbau (Sattelauflieder) kann eine Magnetfeldmessung am Heck des Fahrzeugs vernachlässigt werden. Die Vorgehensweise basiert auf den Inhalten der Kapitel 4.1 und 4.2.

Die Szenarien werden unter Berücksichtigung von keinem Versatz (in Abbildung 4.27 a)) und dem Worst-Case-Versatz (in Abbildung 4.27 b): $\Delta X = \pm 150$ mm, $\Delta Y = -400$ mm) bewertet. Die Werte des Worst-Case-Szenarios weichen von den in [55] und [35] angegebenen Toleranzen ($\Delta X = \pm 75$ mm, $\Delta Y = \pm 100$ mm) ab, um ein möglichst ungünstiges, aber dennoch realistisches Szenario hinsichtlich der magnetischen Flussdichte bei der längeren GA zu schaffen. Die Bewertungslinien werden vor und neben den LKWs in einem Abstand von 200 mm (gemessen am äußersten Punkt des Fahrzeugkörpers — ohne Außenspiegel: siehe Abbildung 4.28) wie in [55] und [56] empfohlen, gezogen. Die $|\vec{B}|_{\text{RMS}}$ -Werte werden in zwei verschiedenen Höhen (0 mm,

500 mm) wie in Abbildung 4.28 dargestellt, erfassst. Des Weiteren werden die Höhen 1.000 mm und 1.500 mm, welche ebenfalls in [55] und [56] definiert sind, nicht berücksichtigt, da die simulierten Magnetfeldwerte an diesen Abnahmepunkten deutlich unter dem ICNIRP $|\vec{B}|_{\text{RMS}}$ -Grenzwert von 27 μT liegen.

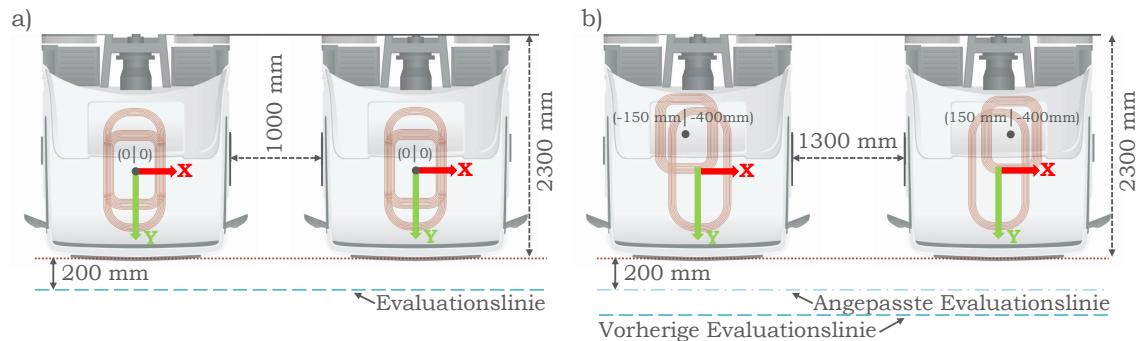


Abbildung 4.27: Szenarien: a) ohne Versatz und b) mit Worst-Case-Versatz.

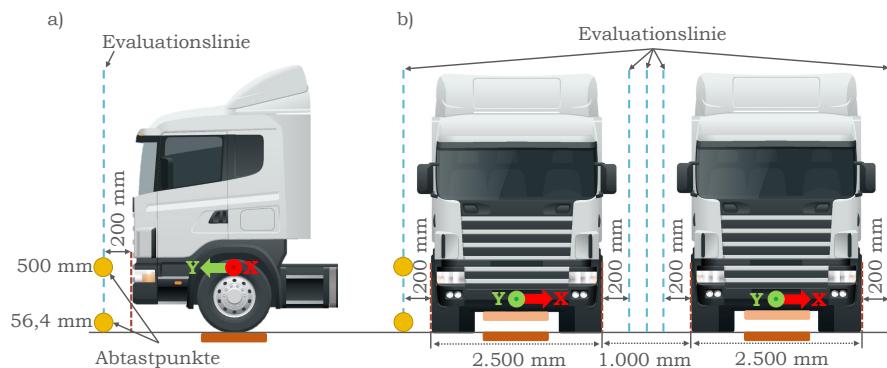


Abbildung 4.28: Bewertungslinien und -höhen a) vor und b) neben den LKWs.

4.4.3 Simulative Magnetfeldauswertung

Die Auswertung belegt, dass bei optimaler Positionierung der GA- und VA-Module keine Überschreitung der ICNIRP-Grenzwerte vor den LKWs (siehe Abbildung 4.31), direkt neben einem LKW (siehe Abbildung 4.29) oder an der zentralen Position zwischen den LKWs (siehe Abbildung 4.30) festgestellt wird. An der Vorderseite des Fahrzeugs wurde lediglich eine maximale magnetische Flussdichte von 13,65 μT in einer Höhe von 0 mm gemessen (siehe Abbildung 4.31). Die Höhe von 0 mm kann als repräsentativ für eine Person gelten, die gefahrlos neben dem Fahrzeug liegen könnte, sofern kein Versatz vorliegt.

Darüber hinaus zeigt die Auswertung, dass die magnetische Flussdichte neben einem LKW in einem Abstand von 200 mm im Worst-Case-Versatz einen Maximalwert von $11,53 \mu\text{T}$ in einer Höhe von 0 mm erreicht, verglichen mit $1,41 \mu\text{T}$ im Fall ohne Versatz (siehe Abbildung 4.29). In beiden Fällen wird der ICNIRP-Grenzwert von $27 \mu\text{T}$ eingehalten.

Jedoch zeigen die Ergebnisse vor den LKWs eine Verletzung der ICNIRP-Grenzwerte in der Worst-Case-Analyse. Dabei wird der Grenzwert in den Höhen [0, 500 mm] mit $[127,63 \mu\text{T}, 38,04 \mu\text{T}]$ deutlich überschritten (siehe Abbildung 4.31 und Tabelle 4.9). In diesem Zusammenhang ist eine weitere Untersuchung durch zusätzliche Simulationen bezüglich der inneren elektrischen Felder oder Abschirmmaßnahmen erforderlich, um die Sicherheit zu gewährleisten.

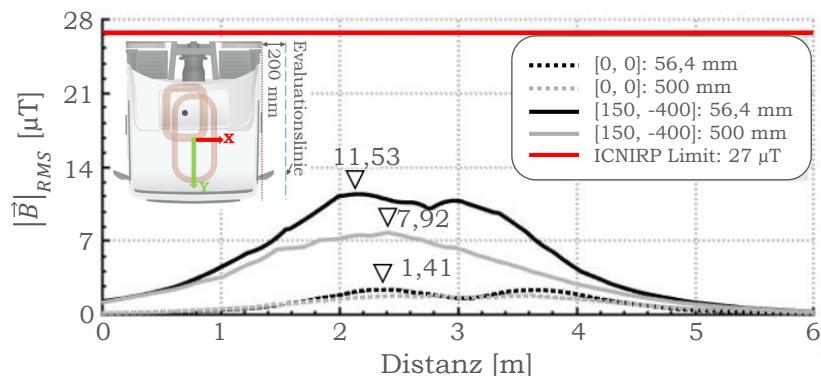


Abbildung 4.29: Magnetische Flussdichte neben einem LKW auf der Evaluationslinie in einem Abstand von 200 mm auf verschiedenen Höhen [56,4 mm, 500 mm] bei optimaler Positionierung und Worst-Case-Versatz.

Tabelle 4.9. Maximale magnetische Flussdichte bei den vorgeschlagenen Versätzen auf der Evaluationslinie vor den LKWs in 200 mm Entfernung und verschiedenen Höhen [0, 500 mm, 1.000 mm, 1.500 mm]

Offset ($\Delta X, \Delta Y$) [mm]	0 mm [μT]	500 mm [μT]	1.000 mm [μT]	1.500 mm [μT]
($\pm 150, -400$)	127,65	38,01	9,67	3,84
($\pm 75, -100$)	15,77	5,33	1,94	0,91
(0, 0)	13,68	4,73	1,69	0,81

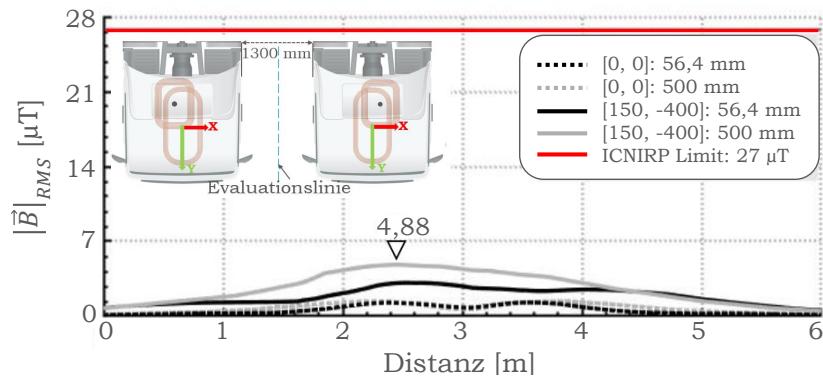


Abbildung 4.30: Magnetische Flussdichte zentral zwischen den LKWs auf der Evaluationslinie auf verschiedenen Höhen [56,4 mm, 500 mm] bei optimaler Positionierung und Worst-Case-Versatz.

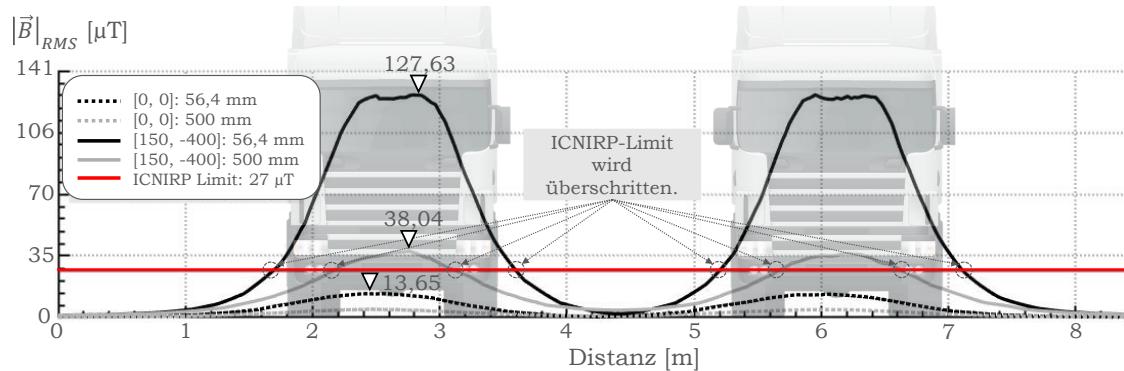


Abbildung 4.31: Magnetische Flussdichte vor den LKWs auf der Evaluationslinie in einem Abstand von 200 mm auf verschiedenen Höhen [56,4 mm, 500 mm] bei optimaler Positionierung und Worst-Case-Versatz.

4.5 Sicherheitskonzept zur Begrenzung der elektromagnetischen Exposition

Ein Sicherheitskonzept ist demnach ein systematisch entwickelter Plan, der dazu dient, potenzielle Risiken zu identifizieren, zu bewerten und entsprechende Maßnahmen zu definieren, um diese Risiken zu minimieren oder zu beseitigen. Der Fokus liegt hierbei auf dem Schutz von Personen sowie der Ladeinfrastruktur vor potenziellen Bedrohungen und Gefahren. Auf Basis der in Abschnitt 4.3 durchgeführten Untersuchungen konnten Gefährdungen identifiziert, bewertet und entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden.

In Tabelle 4.13 werden verschiedene Szenarien präsentiert, die sich aus dem alltäglichen Betrieb ergeben können. Die Eintrittswahrscheinlichkeit gibt an, mit welcher Häufigkeit das betreffende Szenario in der Pilotanlage zu erwarten ist. Darüber hinaus werden Lösungsansätze präsentiert, unabhängig davon, ob die Eintrittswahrscheinlichkeit als hoch oder niedrig einzustufen ist. Das Ziel dieser Lösungsansätze ist es, eine mögliche Überschreitung der zulässigen Grenzwerte zu vermeiden bzw. eine mögliche Gefährdung zu verhindern.

Für die systematische Bewertung der in den Szenarien identifizierten Risiken wird eine zweidimensionale Risikomatrix herangezogen. Diese berücksichtigt zum einen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Ereignisses und zum anderen den Schweregrad der möglichen Auswirkungen. Beide Dimensionen werden in fünf Stufen kategorisiert, sodass eine differenzierte Bewertung der Risiken möglich ist.

Die Eintrittswahrscheinlichkeit W ist ein Maß für die Häufigkeit, mit der ein bestimmtes Szenario während des Betriebs der Anlage zu erwarten ist. Die Einteilung erfolgt auf Basis von Einschätzungen der Betriebssituation (siehe Tabelle 4.10).

Der Schweregrad S bezieht sich auf die Abweichung der gemessenen Magnetfeldwerte von den zulässigen Expositionsgrenzwerten nach ICNIRP. Maßgeblich ist hierbei das Verhältnis

$$r = \frac{|\vec{B}|_{\text{Messung}}}{|\vec{B}|_{\text{Grenzwert}}} \quad (4.9)$$

wobei für die vorliegende Arbeit der ICNIRP-Grenzwert für die magnetische Flussdichte von $27 \mu\text{T}$ herangezogen wird [52]. Die Einstufung ist in der Tabelle 4.11 ersichtlich.

Tabelle 4.10. Einstufung der Eintrittswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit der Betriebsstunden.

Stufe	Bezeichnung	Häufigkeit	Beschreibung
(1)	Nie	< 1 Ereignis pro 5.000 h	Praktisch ausgeschlossen
(2)	Selten	1 Ereignis pro 1.000 h bis 5.000 h	Sehr unwahrscheinlich, jedoch denkbar
(3)	Möglich	1 Ereignis pro 100 h bis 1.000 h	Kann unter bestimmten Umständen auftauchen
(4)	Wahrscheinlich	1 Ereignis pro 5 h bis 100 h	Tritt regelmäßig oder in charakteristischen Betriebssituationen auf
(5)	Häufig	≥ 1 Ereignis pro 5 h	Sehr wahrscheinlich

 Tabelle 4.11. Einstufung der Gefährdungslage in Abhängigkeit vom Faktor r .

Stufe	Bezeichnung	Kriterium	Beschreibung
(1)	Gering	$r < 0,5$	Werte liegen deutlich unterhalb des Grenzwertes, Risiko praktisch nicht gegeben.
(2)	Mäßig	$0,5 \leq r < 1,0$	Werte nähern sich dem Grenzwert an, bleiben jedoch darunter.
(3)	Erhöht	$1,0 \leq r < 2,0$	Grenzwert wird überschritten, jedoch maximal verdoppelt.
(4)	Hoch	$2,0 \leq r < 5,0$	Werte liegen deutlich oberhalb des Grenzwertes.
(5)	Sehr hoch	$r \geq 5,0$	Erhebliche Überschreitung des Grenzwertes mit kritischer Gefährdungslage.

Die Kombination von Eintrittswahrscheinlichkeit und Schweregrad ergibt den Risikowert

$$\mathcal{R} = W \times S. \quad (4.10)$$

Zur besseren Visualisierung und zur Unterstützung der Ableitung geeigneter Maßnahmen wird eine Farbskala verwendet (siehe Tabelle 4.12).

Tabelle 4.12. Klassifizierung der Risikostufen \mathcal{R} mit Maßnahmenempfehlungen.

Farbe	Bezeichnung	Bereich	Maßnahmenempfehlung
grün	Niedrig	$1 \leq \mathcal{R} \leq 4$	Risiko akzeptabel, keine zusätzlichen Maßnahmen erforderlich.
gelb	Mäßig	$5 \leq \mathcal{R} \leq 9$	Risiko sollte durch verhältnismäßige Maßnahmen reduziert werden.
orange	Hoch	$10 \leq \mathcal{R} \leq 16$	Risiko nicht akzeptabel ohne zusätzliche Maßnahmen, technischen oder organisatorische Maßnahmen zwingend erforderlich.
rot	Sehr hoch	$17 \leq \mathcal{R} \leq 25$	Risiko kritisch. Betrieb in dieser Form nicht zulässig, sofortige Maßnahmen notwendig.

Durch diese mehrstufige Einteilung kann jedes identifizierte Szenario systematisch eingeordnet und in seiner Relevanz bewertet werden. Gleichzeitig ermöglicht die Farbskala eine schnelle visuelle Einordnung der Risikoschwere und unterstützt die Nachvollziehbarkeit der abgeleiteten Schutzmaßnahmen.

Tabelle 4.13. Risikoklassifizierung der betrachteten Szenarien.

1. Szenario	
Während des Ladevorgangs halten sich Personen neben dem EV auf, also außerhalb.	
Risikobewertung:	grün
Eintrittswahrscheinlichkeit:	häufig
Schweregrad:	gering
Mögliche Schutzmaßnahmen:	
LOD, Anpassung der Schirmung bzw. Ferritauslegung, Barrieren, Markierungen, Beschilderung	

2. Szenario

Während des Ladevorgangs greift eine Person eine Hand oder streckt einen Fuß zwischen die Ladespulen.

Risikobewertung:

Eintrittswahrscheinlichkeit:	möglich
Schweregrad:	sehr hoch

Schutzmaßnahmen:

LOD, Barrieren, Markierungen, Beschilderung

3. Szenario

Während der Inbetriebnahme, Wartung oder Inspektion besteht für Personen die Möglichkeit, mit Gliedmaßen in Bereiche zu gelangen, in denen der Betrag der magnetischen Flussdichte oberhalb der zulässigen abgeleiteten ICNIRP-Grenzwerte liegt.

Risikobewertung:

Eintrittswahrscheinlichkeit:	möglich
Schweregrad:	sehr hoch

Schutzmaßnahmen:

Betriebsanweisung mit definierten Richtlinien für den Umgang und Betrieb der Anlage

4. Szenario

Während des Ladevorgangs befinden sich Personen im Fahrzeuginnenraum.

Risikobewertung:

Eintrittswahrscheinlichkeit:	häufig
Schweregrad:	gering

Mögliche Schutzmaßnahmen:

Einbau von Schirmblechen in der Fahrzeugkarosserie in den Bereichen, in denen sich Personen im EV befinden.

5. Szenario

Im Rahmen der Inbetriebnahme kann es, ohne dass sich ein Fahrzeug auf einer der Ladeplatten befindet, zu einem magnetischen Fluss kommen, dessen Betrag über den zulässigen abgeleiteten ICNIRP-Grenzwerten liegt.

Risikobewertung:

Eintrittswahrscheinlichkeit:	selten
Schweregrad:	sehr hoch

Schutzmaßnahmen:

Betriebsanweisung mit definierten Richtlinien für den Umgang und Betrieb der Anlage; Errichtung von Absperrungen während der Inbetriebnahme, um Passanten zu schützen. In 1 m-Abstand zur Ladeplatte ist das Magnetfeld unter 27 µT (siehe Abbildungen 4.32, 4.33b und 4.34d).

6. Szenario

Während des Ladevorgangs halten sich Personen mit medizinischen Implantat wie z. B. ein Herzschrittmacher neben dem EV auf.

Risikobewertung:

Eintrittswahrscheinlichkeit:	häufig
Schweregrad:	gering

Mögliche Schutzmaßnahmen:

Einbau von Schirmblechen in der Fahrzeugkarosserie in den Bereichen, in denen sich Personen im EV befinden.

7. Szenario

Während des Ladevorgangs liegt eine Person mit medizinischen Implantat wie z.B. ein Herzschrittmacher unter dem EV.

Risikobewertung:

Eintrittswahrscheinlichkeit:	möglich
Schweregrad:	sehr hoch

Schutzmaßnahmen:

LOD, Barrieren, Markierungen, Beschilderung

8. Szenario

Infolge eines Fehlers in der Ladesteuerung erfolgt eine Aktivierung einer Ladeplatte, auf der sich kein Fahrzeug befindet. Der ermittelte Wert der erzeugten magnetischen Flussdichte liegt über den zulässigen abgeleiteten ICNIRP-Expositionsgrenzwerten

Risikobewertung:

Eintrittswahrscheinlichkeit:	selten
Schweregrad:	sehr hoch

Schutzmaßnahmen:

Softwaregesteuerte Abschaltung, die erkennt, wenn keine Last vorhanden ist, und die Ladeplatte automatisch deaktiviert.

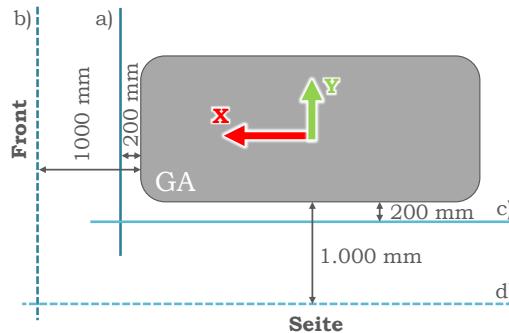


Abbildung 4.32: Simulationsskizze zur Primärspule mit frontaler a) + b) und seitlicher c) + d) Evaluationslinie.

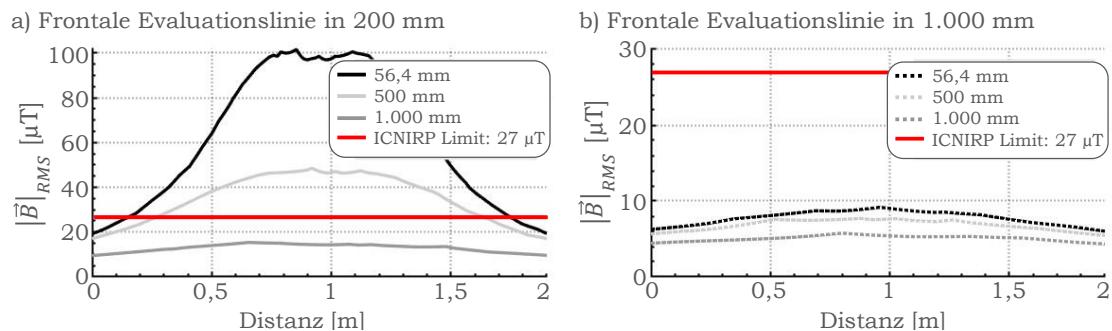


Abbildung 4.33: Auswertung der magnetischen Flussdichte auf frontaler Evaluationslinie zur Primärspule (siehe Abbildung 4.32)

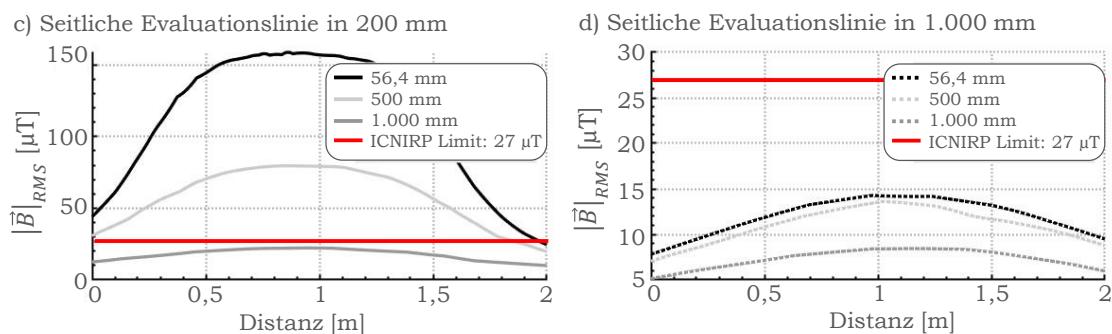


Abbildung 4.34: Auswertung der magnetischen Flussdichte auf seitlicher Evaluationslinie zur Primärspule (siehe Abbildung 4.32)

4.6 Zusammenfassung

Im Rahmen der Einführung neuer Ladetechnologien für EVs ist die Einhaltung strenger Sicherheitsanforderungen von essentieller Bedeutung, insbesondere im öffentlichen Raum. Daher ist die Festlegung von Designkriterien für die Produktentwicklung auf der Grundlage realistischer Annahmen und entsprechender Simulationen von entscheidender Bedeutung. Die vorliegende Studie fokussiert sich auf die Evaluierung der Magnetfeldsimulationen von WPT-Systemen, wobei ein besonderes Augenmerk auf die anspruchsvolle Herausforderung gelegt wurde, derartige Systeme in öffentlich zugänglichen Bereichen zu bewerten. Es beginnt mit der Vorstellung eines Simulationskonzepts, das aus der Modellierung des WPT-Moduls, der Berücksichtigung spezifischer Materialeigenschaften und der Integration eines Fahrzeugmodells besteht. Auf dieser Grundlage wird ein Messkonzept entwickelt, das die Auswahl und Anwendung von Messequipment sowie die Durchführung der Messungen beschreibt. Anhand einer Test Case Study mit einem 20 kW-WPT-System werden erste praktische Messungen durchgeführt, die sowohl ein einzelnes Taxi als auch zwei gleichzeitig ladende Taxis umfassen. Diese Tests ermöglichen eine Kombination von Simulationen und Messungen zur Analyse der Magnetfeldstärke. Daraus und aus Ergebnissen einer Studie zur Expositionsauswertung ergibt sich, dass das eingesetzte WPT-System keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen auf die Bevölkerung hat. Die Resultate der vorliegenden Untersuchung zum spezifischen Anwendungsszenario legen nahe, dass einfache unipolare kreisförmige Spulendesigns eine vielversprechende Lösung darstellen. Die untersuchten Designs zeichnen sich durch eine Kombination aus Einfachheit und Effizienz aus, welche den Anforderungen der Anwendung in adäquater Weise gerecht wird. Das in diesem Artikel präsentierte Messkonzept kann zudem auf andere WPT-Systeme übertragen werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Ergebnisse nicht ohne weiteres auf andere Anwendungsbereiche übertragen werden können, da die Rahmenbedingungen in den einzelnen Fällen variieren. Dennoch können die Messungen als nützliche Referenz für die Schätzung der Ladeleistung in ähnlichen Szenarien herangezogen werden.

Des Weiteren wird eine simulationsbasierte Fallstudie für ein 50 kW-WPT-System vorgestellt, um detaillierte Erkenntnisse über die Magnetfeldverteilung in einem leistungsstärkeren Ladeszenario zu gewinnen. Die Ergebnisse zeigen, dass die gemessene magnetische Flussdichte je nach Positionierung der Fahrzeuge die ICNIRP-Empfehlungen überschreiten kann, insbesondere im ungünstigsten Versatzfall. In diesem Fall wurde ein größerer Versatz von $\Delta X = \pm 150$ mm (seitliche Richtung) und $\Delta Y = -400$ mm (vorwärts-rückwärts Richtung) berücksichtigt, was von den in SAE J2954 angegebenen Werten ($\Delta X = \pm 75$ mm, $\Delta Y = -100$ mm) aufgrund der Fahrzeuggröße abweicht. Um das potenzielle Gesundheitsrisiko für Menschen umfassend zu bewerten, sind zusätzliche numerische Simulationen wie in der Test Case Study

erforderlich, um die intern induzierten elektrischen Felder im Körper zu bewerten. Das bloße Überschreiten des Grenzwertes der magnetischen Flussdichte reicht nicht aus, um das tatsächliche Risiko zu bestimmen. Falls die Grenzwerte tatsächlich überschritten werden, sind grundlegende Anpassungen am WPT-System zwingend erforderlich. Verschiedene Maßnahmen wie die Änderung des Spulendesigns, der Übertragungsleistung oder der Abschirmung können implementiert werden, um die magnetische Flussdichte zu reduzieren.

Die numerischen Simulationen in Kombination mit der vorgestellten Bewertungsmethode gestatten eine erste Einschätzung der EMVU von WPT-Systemen in der Entwicklungsphase. Auf Basis der initialen Evaluierung können anschließend vergleichende Messungen in realen Szenarien durchgeführt werden. Ziel ist es, die WPT-Systeme durch die gewonnenen Erkenntnisse weiter zu verfeinern und für eine breite Anwendung zu optimieren. Obgleich die Berücksichtigung von originalen Fahrzeugmodellen zu umfassend präzisen Ergebnissen führt, erfolgen die Simulationen in Übereinstimmung mit der SAE J2954 mit Fahrzeugnachbildungen zur Bewertung der EMF. Des Weiteren wird ein Sicherheitskonzept vorgestellt, welches je nach Alltagsszenario entsprechende Maßnahmen vorschlägt (u. a. Warnhinweise, ZugangsbARRIEREN, Abschirmungen, Anpassungen am Spulendesign), um die elektromagnetische Exposition von Personen zu minimieren und deren Sicherheit zu gewährleisten. Die vorliegende Forschungsarbeit leistet einen Beitrag zur Entwicklung von EMF-sicheren WPT-Systemen für EVs und gewährt Einblicke in Compliance- und Sicherheitsüberlegungen.

5 Implementierung einer Ladeinfrastruktur

Die Energiewende befürwortet die Ablehnung fossiler und nuklearer Energiequellen und präferiert die Nutzung erneuerbarer und nachhaltiger Energiequellen. Um das genannte Ziel zu erreichen, wurden Konzepte in Bezug auf den Transport und das Wohnen entwickelt [179–181]. Dies sind enorme Herausforderungen, insbesondere für die Automobilindustrie, die aufgefordert wird, neue wettbewerbsfähige Technologien zu entwickeln, um die aktuellen konventionellen Fahrzeuge zu ersetzen. Der technologische Fortschritt führt zu anspruchsvollen und neuen Belastungen für die Branche [182]. Bislang erfolgt die Stromversorgung von EVs standardmäßig mittels Plug-in-Kabeln. Allerdings ergeben sich bei der Verwendung von Kabeln zahlreiche Probleme, bspw. hinsichtlich der Handhabung, der Stolpergefahr, des Materialverschleißes sowie der Wetterbedingungen. Diese Schwierigkeiten lassen sich durch den Einsatz eines WPT-Systems vermeiden. Für einen erfolgreichen kommerziellen Start und eine hohe Akzeptanz bei den Verbrauchern sind verschiedene Faktoren von Bedeutung. Dazu zählen eine ausreichende Reichweite, bessere Anschaffungskosten, eine ausgereifte und zuverlässige Technologie sowie eine gut entwickelte Ladeinfrastruktur [183].

Die Realisierung einer gut vernetzten Ladeinfrastruktur ist mit einer Vielzahl an Herausforderungen verbunden. In der Literatur werden bereits verschiedene Aspekte dieser Problematik diskutiert, wobei folgende Punkte thematisiert werden:

- Gewährleistung einer ausgeglichenen Netznutzung (Smart Grid) [184, 185].
- Flexibilität durch eine ausreichende Anzahl an Ladestationen [186].
- Garantie einer konsistenten Nutzung der Ladestationen [187].
- Vermeidung hoher Investitionen [186].

Die in dieser Übersicht dargestellten Studien [186–190] befassen sich mit einem gemeinsamen Aspekt: einem Ansatz zur Optimierung der Ladeinfrastruktur für EVs, HEVs und PHEVs. Auf Basis dieser Erkenntnis führen die Autoren in [186–190] weitere Analysen durch, bspw. zur Sicherstellung des Ladeservices, zur Reduzierung von Leistungsverlusten, zur Verbesserung der Spannungsstabilität und zur Minimierung der Gesamttransportstrecke. Die meisten der oben genannten Studien konzentrieren

sich auf die kabelgebundene Lademethode und beinhalten Technologien wie EVs, HEVs und PHEVs.

In der wissenschaftlichen Literatur werden bereits eine Reihe von Problemen aufgezeigt, die mit der Ladeinfrastruktur für EVs zusammenhängen. Im Rahmen der Untersuchungen wurden wesentliche Aspekte wie Sicherheit und Zustandsbewertung untersucht, um potenzielle Fehlfunktionen zu vermeiden und die Interoperabilität sowie Funktionalität der elektronischen Komponenten zu gewährleisten [191, 192]. Des Weiteren werden die Auswirkungen einer installierten Ladeinfrastruktur auf die Luftqualität wie auch die damit verbundenen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit analysiert [193] sowie die Möglichkeit, EE mit der Ladeinfrastruktur zu kombinieren [194]. In verschiedenen Publikationen [195–198] werden Modelle zur Vorhersage der Nachfrage nach öffentlich zugänglichen Ladestationen vorgestellt. Andere Studien fokussieren sich auf Infrastrukturkonfigurationen und damit auf den technischen Aspekt [199]. Obgleich all diese Themen für eine erfolgreiche Integration von EVs in den Automobilmarkt sowie zur Steigerung der Kundenakzeptanz von großer Bedeutung sind, wird in den genannten Veröffentlichungen die Komplexität der Entwicklung einer zufriedenstellenden und nachhaltigen Ladeinfrastruktur mit ihren zahlreichen Einflussfaktoren nicht ausreichend berücksichtigt.

Daher ist es das Ziel dieser Arbeit, die Einflussfaktoren, die bei der Entwicklung und Planung einer Ladeinfrastruktur eine Rolle spielen, näher zu betrachten und die Wechselwirkungen sowie Verbindungen zwischen den verschiedenen Themen aufzuzeigen. In diesem Kontext ist zudem von Relevanz, nicht-technologische Aspekte zu berücksichtigen. Die wesentliche Herausforderung besteht in der Entwicklung einer gut vernetzten Ladeinfrastruktur ohne verfügbare operative Erfahrungen und derzeit fehlende Standards. Des Weiteren sind die technischen Entwicklungen für AC- bzw. DC-Ladegeräte aufgrund der Unfähigkeit, die zukünftige Marktnachfrage und die Unsicherheit hinsichtlich der erforderlichen Ladeleistungen präzise zu prognostizieren, noch nicht abgeschlossen. Hinzu kommen noch einige weitere zu lösende Probleme, welche im Folgenden näher erörtert werden. Die wesentlichen Faktoren, die einen Einfluss auf die Infrastrukturplanung haben, werden vorgestellt, um die Komplexität des Themas zu veranschaulichen. Der erste Teil dieses Abschnitts bietet einen Vergleich des aktuellen Stands der Ladeinfrastruktur für EVs in Deutschland mit anderen Ländern. U. a. werden Förderprogramme thematisiert, welche die Entwicklung der Infrastruktur vorantreiben und beschleunigen sollen. Es folgt eine Untersuchung der geografischen Merkmale, die die Grundlage für die Potenzialanalyse hinsichtlich der Errichtung von Ladestationen bilden. Die Zielgruppe definiert den Umfang des Ausbaus der Ladeinfrastruktur an einem Standort. Abschließend werden die verschiedenen Ladetechnologien erörtert, die in Betracht gezogen werden können.

5.1 Internationale Perspektiven: Deutschland im Vergleich

Es lässt sich eine signifikante Varianz hinsichtlich des aktuellen Stands der jeweiligen Ladeinfrastruktur zwischen den einzelnen Staaten beobachten. Im Folgenden wird ein Fokus auf die Ladeinfrastruktur in Deutschland gelegt, wobei ein Vergleich mit anderen Ländern angestellt wird, um Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu identifizieren.

Um eine reibungslose Energieversorgung sicherzustellen, ist ein stetiger Ausbau der derzeitigen Ladeinfrastruktur notwendig. Mit der steigenden Anzahl von EVs auf der Straße muss auch die Anzahl der Ladepunkte zunehmen.

In der Richtlinie 2014/94/EU (Richtlinie über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe) verpflichtet die Europäische Union ihre Mitgliedstaaten zur Entwicklung einer nationalen Strategie zum Erreichen einer flächendeckenden und ausgewogenen Ladeinfrastruktur [200]. Im September 2023 erfolgte eine Neuaufsetzung der Richtlinie, welche nun als Richtlinie 2023/1804 bezeichnet wird [201].

Die deutsche Bundesregierung veröffentlichte dementsprechend einen Masterplan, der auf dem „Klimaschutzprogramm 2030“ basiert und Ziele sowie Maßnahmen für den Ausbau der Ladeinfrastruktur definiert. U. a. sieht der Plan den Bau von 1 Mio. öffentlich zugänglichen Ladestationen bis 2030 vor [202]. Bis 2025 sollen verschiedene Förderaufrufe veröffentlicht werden, um die hohe Zahl von 1 Mio. Ladestationen zu realisieren. Diese Förderaufrufe beziehen sich nicht nur auf öffentlich zugängliche Ladestationen, sondern auch auf private Ladestationen.

Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr hat den Ausbau der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur erfolgreich gefördert. Mit der „Förderrichtlinie Ladeinfrastruktur für EVs in Deutschland“ wurden seitens des Bundes von Anfang 2017 bis Mitte 2021 insgesamt 300 Mio. € bereitgestellt. Damit konnten sowohl private Investoren als auch Kommunen beim Aufbau von Schnell- und Normalladepunkten unterstützt. Bei diesen Bemühungen liegt der Schwerpunkt speziell auf dem Ausbau des Netzes der öffentlich zugänglichen Ladestationen, wobei 200 Mio. € in normale Ladepunkte (3,7 kW bis 22 kW) und 100 Mio. € in Schnellladepunkte (> 22 kW) investiert werden sollen. Das Programm stieß auf eine signifikante Nachfrage, sodass der Aufbau von 30.000 Ladepunkten, darunter knapp 10.000 Schnellladepunkte, bewilligt werden konnte [203].

Das Nachfolgeprogramm „Ladeinfrastruktur vor Ort“ setzte diese Förderung fort. Mit ebenfalls 300 Mio. € richtete es sich speziell an kleine und mittelständische Unternehmen, um sie zur Investition in die Elektromobilität zu motivieren. Bis zum Ende des Jahres 2021 konnten Anträge eingereicht werden [203].

Das aktuelle Förderprogramm „Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur für EVs in

Deutschland“ (2021-2025) stellt weitere 500 Mio. € bereit. Gegenstand der Förderung sind Normalladepunkte (bis 22 kW) sowie Schnellladepunkte (mit mehr als 22 kW) Leistung, die ausschließlich mit Gleichstrom betrieben werden. Zudem werden die Kosten für Netzanschlüsse und Pufferspeicher unterstützt [203].

Die deutsche Bundesregierung strebt bis zum Jahr 2030 ein Verhältnis von etwa einem Ladepunkt für 15 EVs an [202]. Gemäß Kraftfahrt-Bundesamt wurden im Jahr 2023 insgesamt 524.219 EVs und 175.724 Plug-in-Hybride in Deutschland neu zugelassen [204]. Die Quantifizierung der installierten Ladestationen erweist sich demgegenüber als anspruchsvoller, da lediglich diejenigen Ladestationen berücksichtigt werden, die der Ladesäulenverordnung (LSV) entsprechen und erfolgreich bei der Bundesnetzagentur registriert wurden. Infolgedessen zählt die Bundesnetzagentur 128.517 (103.226 Normalladepunkte, 25.291 Schnellladepunkte) installierte Ladestationen in Deutschland [205].

In Deutschland besteht derzeit noch eine räumliche Disparität hinsichtlich der öffentlich zugänglichen Ladestationen. Diese Erkenntnis wird durch Abbildung 5.1 bestätigt, in welcher die Anzahl der Ladestationen pro Bundesland (siehe Abbildung 5.1a) und die Erreichbarkeit von Normalladestationen in den Regionen (siehe Abbildung 5.1b) dargestellt ist. In den überwiegend ländlichen Gebieten im Osten Deutschlands (z. B. in Brandenburg, Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern) ist die Dichte der Ladestationen geringer. Demgegenüber ist der Ausbau des Netzes in den großen Metropolen Deutschlands (u. a. in Berlin, Hamburg, Düsseldorf, Stuttgart und München) bereits gut vorangeschritten. Im Durchschnitt kann die nächste öffentlich zugängliche Normalladestation für EVs innerhalb einer kurzen Zeitspanne erreicht werden. Die durchschnittliche Fahrzeit beträgt 7 min. In 82 % der Gemeinden ist die Normalladestation innerhalb von 10 min erreichbar. Die nächste Schnellladestation ist in 12 min zu erreichen. In 43 % der Gemeinden ist die Fahrt sogar in weniger als 10 min möglich. In Ballungsräumen und Großstädten sind es oft nur 2 min bis 5 min. In einzelnen ländlichen Regionen sind hingegen Fahrzeiten von über 15 min oder sogar 30 min notwendig. Dies trifft auf wenig besiedelte Regionen wie Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt zu [206].

Im Jahr 2019 gaben über 64,7 % der EV-Besitzer an, dass sie es vorziehen würden, zu Hause zu laden, 15,1 % an öffentlich zugänglichen Ladepunkten, 7,4 % bei der Arbeit und 12,8 % waren noch unentschlossen [207]. Folglich sollte der Fokus nicht nur auf den Ausbau einer Infrastruktur für öffentlich zugängliche Ladestationen beschränkt werden, sondern auch auf das private Lade-Segment. Aus diesem Grund wird der Kauf von Ladestationen ab November 2020 subventioniert. Für die aktuelle Förderperiode 2024 erhält ein Antragssteller nach Einreichung des Antrags und Nachweis

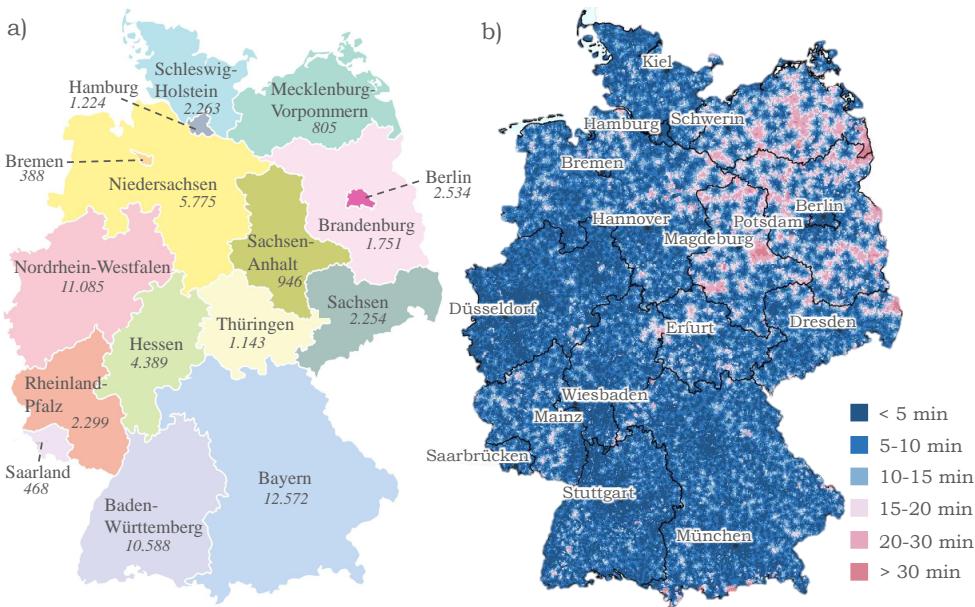


Abbildung 5.1: a) Anzahl der Ladestationen pro Bundesland (Datenquelle: [205]),
b) durchschnittliche Erreichbarkeit einer Normalladestation in Deutschland 2023 (Datenquelle: [206]).

der Installation eine Förderung von maximal 1.000 €. Als Voraussetzung gilt allerdings, dass der Strom aus erneuerbaren Energien (z. B. aus einer PV-Anlage oder über einen Stromliefervertrag) bezogen wird. Neben dem Kaufpreis werden auch die Montage-, Anschluss- und Installationskosten in die geförderten Kosten einbezogen [208].

Unter der Voraussetzung, dass den Menschen die Möglichkeit zur Heimladung zur Verfügung steht, werden sie diese präferieren, da sie einen höheren Komfort bietet. Dazu zählen bspw. die freie Parkplatzwahl, die Vertrautheit der Umgebung, die Vermeidung von Wartezeiten, eine unkomplizierte Abrechnung sowie der Schutz des Fahrzeugs. Ladestationen, die der Öffentlichkeit zugänglich sind, sind hingegen für jene von Relevanz, die keine Möglichkeit haben, ihr Fahrzeug zu Hause oder an ihrem Arbeitsplatz zu laden. Auch für Touristen kann die Verfügbarkeit öffentlicher Ladestationen von Vorteil sein.

Die Quantifizierung des Ausmaßes, in dem der Ausbau der Ladeinfrastruktur die soziale Akzeptanz beeinflusst, ist mit Schwierigkeiten verbunden. Die soziale Akzeptanz ist von der individuellen Wahrnehmung der Menschen abhängig. Die Akzeptanz wird sich nicht verbessern, solange die Menschen besorgt sind, Ladestationen suchen zu müssen oder lange Wartezeiten beim Laden ihres Fahrzeugs einplanen zu müssen. Es ist daher unerlässlich, dass gerade diese Menschen, die mit den genannten

Bedenken konfrontiert sind, mit EVs in Kontakt kommen und eigene Erfahrungen sammeln oder positive Erfahrungen von anderen hören, um ihre Zweifel zu überwinden. Die Fahrzeugtechnik selbst ist alltagstauglich, sodass lediglich eine Senkung der Kosten erforderlich wäre.

Im Folgenden werden einige ausgewählte Daten präsentiert, um einen Überblick über die Anzahl der Ladepunkte für EVs weltweit zu geben und eine Einschätzung darüber zu vermitteln, wie groß die globale Nachfrage nach Ladestationen ist.

In den USA hat die Regierung fast 50 Mio. \$ für die Subventionierung von Projekten angekündigt, die den Zugang zu Lademöglichkeiten erweitern sollen. Dies steht im Einklang mit dem Ziel, bis 2030 ein landesweites Netz von 500.000 öffentlichen Ladepunkten aufzubauen. Die Zahl der öffentlichen Ladepunkte steigt bis 2035 auf 1,7 Mio., von denen viele wahrscheinlich durch private Investitionen finanziert werden und sich außerhalb der Autobahnkorridore befinden. Dies entspricht etwa 55 EVs pro Ladepunkt im Jahr 2035.

Laut dem US-Energieministerium [209] gab es am 26. August 2024 in den USA insgesamt 66.699 Ladestationen. Dabei unterstützt die Mehrheit (57.259) dieser Ladestationen das Level-2-Laden (3,3 kW bis 3,6 kW AC). Darüber hinaus wurden 10.842 Schnellladestationen (50 kW DC und mehr) registriert [209, 210].

In [210] betonen die Autoren, dass es in den USA eine Lücke bei der Ladekapazität gibt, die aktuell 3,3 Mio. EVs zu versorgen. Die Ladeinfrastruktur muss jährlich um etwa 20 % wachsen, um diese erwartete Anzahl an EVs bewältigen zu können [210]. Basierend auf den Prognosen in [211] benötigt Kalifornien bis 2025 zwischen 229.000 und 279.000 Ladegeräte (2023: 53.099 Ladepunkte), um die erwartete Anzahl von 1,3 Mio. EVs (2023: 1,18 Mio. EVs) zu laden [211].

In Europa wird sich die Anzahl öffentlicher Ladestationen bis 2035 auf etwa 2,7 Mio. erhöhen, verglichen mit rund 730.000 im Jahr 2023. Dabei entfallen etwa 80 % der europäischen öffentlichen Ladeinfrastruktur auf die Europäische Union, was bis 2035 etwa 2,3 Mio. Ladegeräte bedeutet. Die EU-Verordnung über die Infrastruktur für alternative Kraftstoffe beinhaltet unter anderem die Vorgabe, dass ab dem Jahr 2025 alle 60 km entlang des EU-Trans-European Transport Network (TEN-T) DC-Schnellladegeräte (mit einer Mindestleistung von 150 kW) installiert werden müssen. Infolgedessen wird sich der Anteil an Schnellladegeräten von etwa 15 % im Jahr 2023 signifikant erhöhen.

Die Ladeinfrastruktur ist in Westeuropa und insbesondere in Ländern wie den Niederlanden, Deutschland, Frankreich, Norwegen und dem Vereinigten Königreich am weitesten entwickelt. In diesen Ländern gibt es eine hohe Dichte an Ladestationen, sowohl in städtischen Gebieten als auch entlang von Autobahnen. In Südeuropa und

Osteuropa ist die Infrastruktur noch weniger dicht, entwickelt sich jedoch schnell weiter [212].

Im Jahr 2022 waren in Norwegen 3.500 Ladestationen mit 19.400 Normalladepunkten und 5.600 Schnellladepunkten installiert (3,06 Mio. insgesamt registrierte Fahrzeuge, davon 600.000 EVs (19,6 %) [213]. Die politische Effektivität Norwegens zeigt sich in der kontinuierlichen Schaffung von Anreizen für die Anschaffung von EVs. Die Ergebnisse dieser Maßnahmen sind vielversprechend. So waren EVs bspw. über einen längeren Zeitraum sowohl von der Mehrwertsteuer als auch von der hohen norwegischen Kaufsteuer auf Neuwagen befreit.

In den Niederlanden gab es bis April 2023 130.012 Ladepunkte (öffentliche zugänglich und halböffentliche) (8,9 Mio. insgesamt registrierte Fahrzeuge, davon 330.000 EVs (3,7 %)) [214, 215]. Im Vergleich zu 128.517 Ladestationen in Deutschland (49,1 Mio. insgesamt registrierte Fahrzeuge, davon 1,41 Mio. EVs (2,9 %)) und unter Berücksichtigung der geografischen Größe Deutschlands sind die Niederlande einen Schritt voraus und einer der führenden Anbieter von Ladestationen in der EU [216].

Das Vereinigte Königreich plant, bis 2030 mindestens 300.000 öffentliche Ladepunkte zu installieren. Es wird jedoch erwartet, dass dieses Ziel nicht vor 2035 erreicht wird [217]. Bei einem Bestand von ca. 20 Mio. EVs im Jahr 2035 entspricht dies mehr als 60 EVs pro öffentlichem Ladepunkt gegenüber etwa 30 im Jahr 2023.

Auf dem heutigen globalen Markt für EVs ist China das Land, in dem der Zugang der Bevölkerung zu Lademöglichkeiten zu Hause am stärksten eingeschränkt und die öffentliche Ladeinfrastruktur am weitesten entwickelt ist. Im Jahr 2023 entfielen 70 % der weltweiten öffentlichen Ladevorgänge auf China, und es wird erwartet, dass das Land auch 2035 mit einem ähnlichen Anteil führend sein wird. Während die aktuelle Verfügbarkeit öffentlicher Ladepunkte in China bereits über dem weltweiten Durchschnitt liegt (weniger als 10 EVs pro öffentlichem Ladepunkt), hat die Regierung kürzlich neue Richtlinien für die Entwicklung einer qualitativ hochwertigen Ladeinfrastruktur veröffentlicht [217]. Derzeit hat China mit ca. 45 % einen der höchsten Anteile von Schnellladern an der Gesamtzahl öffentlicher Ladepunkte. In Zukunftsszenarien wird die Zahl der öffentlichen Schnellladepunkte bis 2035 auf etwa 7,5 Mio. ansteigen und sich damit gegenüber 2023 fast versechsfachen, während die Zahl der Normalladepunkte bis 2035 auf 8,2 Mio. ansteigen könnte [217].

Japans Green Growth Strategy zielt darauf ab, bis 2030 insgesamt 150.000 Ladepunkte zu installieren, davon 30.000 Schnellladepunkte, um ein Komfortniveau zu erreichen, das mit dem Betanken konventioneller Fahrzeuge vergleichbar ist [218]. Bis 2035 soll die Zahl der öffentlichen Ladepunkte jedoch nur 190.000 erreichen. Die Anzahl der Elektrofahrzeuge pro öffentlichem Ladepunkt würde von ca. 18 im Jahr 2023 auf über 80 im Jahr 2035 steigen [217].

In Indien wurden im Rahmen des FAME II-Programms finanzielle Unterstützung und Zielvorgaben für die Ladeinfrastruktur festgelegt, z. B. die Anforderung, dass alle 25 km entlang der Hauptverkehrsachsen Ladeeinrichtungen installiert werden müssen [219]. Darüber hinaus hat das Ministerium für Schwerindustrie im März 2023 finanzielle Unterstützung für den Ausbau der Ladeinfrastruktur angekündigt [219]. Das Verhältnis von Elektrofahrzeugen pro öffentlichem Ladepunkt ist nach wie vor niedrig, ähnlich wie in China. Die Anzahl der Ladepunkte soll bis 2035 auf fast 2 Mio. steigen, um etwa 25 Mio. Elektrofahrzeuge zu versorgen [217].

5.2 Standortwahl

Die bereits vorhandene regionale Infrastruktur bildet die Basis für zukünftige Erweiterungen. Alle Regionen sind durch ihre geografische Gegebenheiten, bspw. Flüsse, Berge und Wälder, gekennzeichnet, und die aktuelle Infrastruktur hat sich entsprechend entwickelt, um diese Merkmale zu berücksichtigen. Die Standortwahl für Ladestationen im öffentlichen Raum erfolgt immer in Zusammenarbeit mit der jeweiligen Stadt. Dieser Findungsprozess ist aufgrund des bürokratischen Aufwands und der zahlreichen zu berücksichtigenden Kriterien langwierig. Die Kriterien sind je nach Kommune bzw. Landkreis unterschiedlich. Zu den geografischen Gegebenheiten müssen weitere Infrastruktureigenschaften, wie zentrale Verkehrsachsen, zentrale Verkehrsströme, wichtige Sehenswürdigkeiten (POIs) und Gewerbegebiete, identifiziert, erfasst und berücksichtigt werden [220]. Generell gestaltet sich die Standortwahl im urbanen Raum aufgrund der hohen Dichte an Versorgungsleitungen, Rohrzügen sowie Schächten schwieriger als im ländlichen Raum. Darüber hinaus sind bei der Planung u. a. Kriterien wie architektonische Besonderheiten (Tunnel, Räume von U-Bahnhöfen, Unterführungen o. Ä.), Ver- und Entsorgungseinrichtungen (Strom, Gas, Wasser, Fernwärme, öffentliche Kanäle, Nachrichtenkabel, Meldeschleifen der Straßenverkehrstechnik), Denkmalschutz, Wahrzeichen, Traditionen zu berücksichtigen. Grundsätzlich bieten Parkplätze bzw. -häuser günstige Voraussetzungen für einen geeigneten Standort, da auf diesen Flächen in der Regel weniger Rohrzüge o. Ä. vorhanden sind.

Der erste Schritt kann in einer groben Kartierung der gewünschten Verteilung von regionalen Ladestationen bestehen, welche auch als Makroplanung bezeichnet wird [221]. Aus Nutzersicht sowie unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Aspekte ist die Auswahl stark frequentierter Standorte zu bevorzugen. Des Weiteren ist die Schließung geografischer Lücken von essenzieller Bedeutung.

Darauf folgt die Mikroplanung, in deren Rahmen der exakte Standort der Ladestationen definiert wird. Die Standortwahl der Ladestationen ist maßgeblich von

der Flächenknappheit geprägt. In vielen Großstädten besteht bereits ein Mangel an Parkplätzen, sodass eine weitere Verknappung der Flächen durch den Bau von Ladestationen für viele Städte nicht akzeptabel sein könnte. Die Auswahl erfolgt in erster Linie nicht nach Bedarf und Eignung, sondern nach Verfügbarkeit. Die folgenden Kriterien, die von den kommunalen Behörden (beteiligte Akteure: Tiefbauamt, Denkmalbehörde, Straßenverkehrsbehörde, Ordnungsamt, Netzbetreiber und Liegenschaftsverwaltung) festgelegt werden, sollten unter anderem für ein Standortkonzept erfüllt sein [222]:

- Konformität mit dem Straßenverkehrsrecht,
- Berücksichtigung von Denkmalzonen,
- Sichtbarkeit, belebte und gut beschilderte Straßen,
- Öffentlich zugängliche Standorte zu jeder Zeit,
- Ganzjährig zugängliche Standorte (insbesondere im Winter),
- Sichere Standorte mit nächtlicher Beleuchtung,
- Zugang zum Niederspannungs- oder Mittelspannungsnetz je nach Ladetyp,
- Ladestationen von beiden Richtungen anfahrbar (falls möglich), keine Einbahnstraßen,
- Bevorzugung von Hauptstraßen zum Schutz von Wohngebieten,
- Zuverlässiges Mobilfunknetz oder LAN-Kabel für die Anbindung an ein Backend-System,
- Ästhetische Aspekte bzgl. des Stadtbildes.

Sobald ein potenzieller Standort in den Fokus rückt, kann über die Stadt online eine Planauskunft über die Versorgungsnetze für die entsprechende Baumaßnahme angefordert werden. Hierzu sind lediglich Angaben zur Lage des Grabungsbereiches (Straße, Hausnummer), ein Lageplan, der Zeitraum sowie eine Kurzbeschreibung der geplanten Baumaßnahme erforderlich.

Es existieren diverse Optionen hinsichtlich der Ladung von EVs. In der Konsequenz wird eine zukunftsoptimierte Ladeinfrastruktur mehrere dieser Ladetechnologien bereitstellen, wobei der Schwerpunkt auf jenen liegt, die sich in optimaler Weise in Bezug auf den jeweiligen Standort, den Ladebedarf, die Ladezeit, die Energieversorgung sowie Kostenüberlegungen eignen. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass auch der Einfluss privater Ladepunkte nicht zu unterschätzen ist. Die Möglichkeit, EVs über Nacht zu Hause beim Besitzer zu laden, ist sowohl bequem als auch kostengünstig.

5.3 Zielgruppe

Neben den geografischen Eigenschaften ist die Berücksichtigung gruppenspezifischer Bedürfnisse in jeder Region ein weiterer wichtiger Aspekt. In Abhängigkeit von der jeweiligen Kundengruppe können unterschiedliche Ladeleistungen in Betracht gezogen werden. Dabei sind Faktoren wie Nutzung (ganzjährig, saisonal), Aufenthaltsdauer oder Art des Zugangs/ der Bezahlung (bspw. Karte, Smartphone-App) zu berücksichtigen. Eine Differenzierung kann anhand von drei Kategorien erfolgen [223, 224]:

- **Bürger, einpendelnde Arbeitnehmer und lokale Unternehmen:**
Die überwiegende Mehrheit der Fahrzeugbesitzer wird ihre privaten Ladepunkte zu Hause oder diejenigen des Arbeitgebers am Arbeitsplatz das gesamte Jahr über nutzen (siehe Abbildung 5.2). Dies impliziert, dass stets ausreichend Zeit zum Laden des EV zur Verfügung steht (tagsüber: am Arbeitsplatz; nachts: zu Hause), wobei eine Ladestation mit geringer Leistung für diese Art der Nutzung ausreichend wäre. In Bezug auf die zuvor genannten Länder (vgl. Kapitel 5.1) stellt die Bereitstellung von Ladestationen für Wohngebäude eine wesentliche Herausforderung dar. Die Installation von Ladestationen ist bei vielen Wohngebäuden aufgrund des Mangels an Parkplätzen nicht möglich. Das in den Städten oben diskutierte Problem ist ein weit verbreitetes Phänomen, welches in der Studie [224] untersucht wurde. In diesen Fällen ist es für die Bewohner erforderlich, auf öffentlich zugängliche Ladestationen zurückzugreifen (z. B. Stadtzentren, Industrieparks, große Parkplätze und Parkhäuser). Die bevorzugten Ladeorte privater Nutzer sind in der Abbildung 5.2 zusammengefasst.
- **Touristen:**
Die Anwesenheit von Touristen ist in der Regel an den Hotspots einer Region zu beobachten. Für diese spezielle Gruppe sollte die Ladeinfrastruktur an den relevanten Orten (z. B. POIs, Tourismusinformationen, Stadtzentren und Hotels) ausgebaut werden. Die Aufenthaltsdauer variiert in Abhängigkeit von den jeweiligen Attraktionen und ist in der Regel saisonal bedingt. In Bezug auf die Gruppe der Touristen kann eine Unterteilung in zwei Kategorien vorgenommen werden: Tagesbesucher und Übernachtungsgäste.
Tagesbesucher legen mittellange Distanzen zurück und benötigen eine Lademöglichkeit am Zielort, bspw. einen großen Parkplatz. In der Nebensaison hingegen werden derartige Parkplätze häufig gar nicht genutzt, was aus wirtschaftlicher Perspektive als ungünstig zu bewerten ist. Des Weiteren ist die Verweildauer zu kurz, um das Fahrzeug mit geringer Leistung vollständig zu laden. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob sich eine Investition

in AC-Ladegeräte mit hoher Leistung oder in DC-Ladestationen insbesondere bei saisonalem Betrieb lohnt. Für Übernachtungsgäste sind Lademöglichkeiten am Zielort erforderlich, da sie lange Distanzen zurücklegen. Eine weitere Möglichkeit stellt die Installation von Ladestationen direkt am Hotel dar, sodass den Gästen ein nächtliches Laden ermöglicht wird, ohne dass sie auf andere Ladestationen am Zielort angewiesen sind. Der Zugang zu den Ladestationen sowie die Bezahlung sollten möglichst unkompliziert gestaltet werden, bspw. durch die Verwendung von Smartphones oder Kreditkarten. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass alle Kunden, unabhängig von ihrer Nationalität, die Ladestationen nutzen können.

- **Durchgangsverkehr:**

Bei einem kurzen Aufenthalt zum Laden eines EV an öffentlich zugänglichen Ladepunkten (z. B. Autobahnen oder Durchgangsstraßen) ist lediglich der Einsatz von Schnellladegeräten mit hoher Ladeleistung zu empfehlen. Das primäre Interesse dieser Gruppe besteht in der möglichst effizienten Fortsetzung ihrer Reise. Der Zugang sowie die Bezahlung sollten möglichst unkompliziert gestaltet werden, bspw. mittels Smartphone oder Kreditkarte. Für Zielgruppen wie Touristen und Durchgangsverkehr sind öffentlich zugängliche Ladeorte in der Abbildung 5.2 dargestellt.



Abbildung 5.2: Private und öffentlich zugängliche Ladestationen (Datenquelle: [54]).

5.4 Ladetechnologien

In Bezug auf Ladestationen ist eine Differenzierung zwischen zwei Arten von Ladeverfahren erforderlich. Die konduktive Ladetechnologie ermöglicht das Laden mittels eines Ladekabels, welches die Verbindung vom Fahrzeug zum Stromnetz herstellt. Im Gegensatz dazu erfolgt die Übertragung der elektrischen Energie bei induktiven Ladegeräten drahtlos durch den Luftspalt mittels einer elektromagnetischen Kopplung. In Abbildung 5.3 sind beide Ladeoptionen dargestellt. Bei der konduktiven Version erfolgt eine weitere Differenzierung zwischen AC- und DC-Laden. Aufgrund systemischer Anforderungen wird beim induktiven Laden jedoch stets ein Wechselstrom verwendet. Des Weiteren werden die maximalen Leistungswerte gemäß den aktuell geltenden Standards angegeben. Die Realisierung unterschiedlicher Ladeverfahren bedingt die Verfügbarkeit spezifischer technischer Ausrüstung. Dies umfasst bspw. die Hardware der Ladestation, Fahrzeugstecker und -buchsen, Stecker und Stromzähler. Es kann als vorteilhaft für Betreiber und Systemdesigner erachtet werden, Kompatibilität und Interoperabilität zu berücksichtigen. Die Standards gewährleisten einheitliche Anforderungen und fördern die Infrastruktur für Elektromobilität. Zudem werden sie kontinuierlich an technologische Innovationen angepasst, um ihre Relevanz angesichts sich ändernder Umstände sicherzustellen.

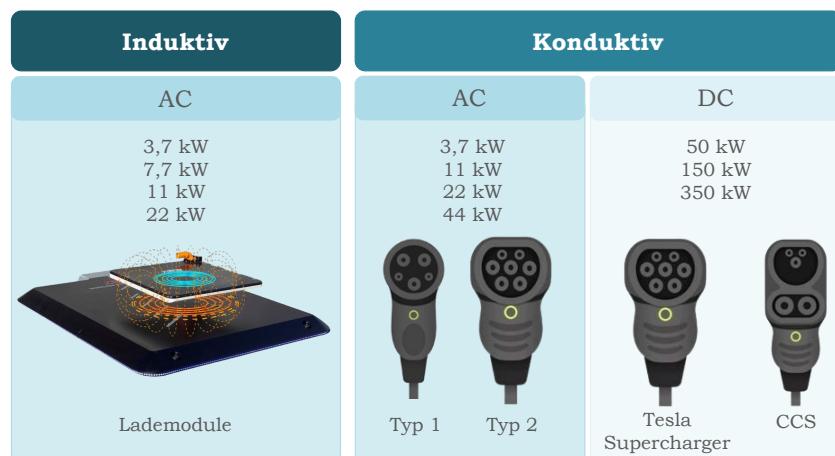


Abbildung 5.3: Ladetechnologien mit typischen Ladeleistungen (Datenquelle: [54]).

Im Kapitel 2 wurde die induktive Ladetechnologie von EVs ausführlich behandelt, einschließlich der technischen Grundlagen, der Funktionsweise, der Standards sowie der Vor- und Nachteile dieser Technologie. Da jetzt jedoch die gesamte Ladeinfrastruktur im Fokus steht, wird neben der induktiven Ladeoption auch die konduktive Ladetechnik betrachtet. Für eine vertiefte Darstellung des induktiven Ladeverfahrens sei an dieser Stelle auf das eigenständige Kapitel 2 verwiesen, in dem die Be-

sonderheiten dieser Technologie ausführlich behandelt wurden. An dieser Stelle soll der Fokus auf die infrastrukturellen Anforderungen und die bestehenden Lademöglichkeiten der beiden Technologien gelegt werden.

5.4.1 Konduktives Ladeverfahren

Das Laden von EVs kann auf verschiedene Arten erfolgen, je nach verfügbarer Infrastruktur und gewünschter Ladegeschwindigkeit. Diese Lademethoden werden in vier Hauptkategorien unterteilt, die als Lademodi bezeichnet werden. Jeder Modus hat spezifische Ladeleistungen und Sicherheitsniveaus. Die vier Lademodi sind Mode 1, Mode 2, Mode 3 und Mode 4.

Der **Mode 1** bezeichnet das Laden an einer herkömmlichen Haushaltssteckdose (230 V Wechselstrom) ohne spezielle Sicherheitsvorkehrungen. Die Ladeleistung liegt typischerweise zwischen 2,3 kW und 3,7 kW. Da es keine direkte Kommunikation zwischen dem Fahrzeug und der Ladequelle gibt, sind die Sicherheitsstandards relativ niedrig. Aus diesem Grund findet dieser Modus nur selten Anwendung und ist insbesondere für ältere EVs oder in Notfällen geeignet.

Der **Mode 2** verwendet ebenfalls eine herkömmliche Haushaltssteckdose oder eine verstärkte Steckdose, jedoch mit einem spezifischen Ladekabel, welches eine integrierte In-Kabel-Kontrollbox (ICCB) beinhaltet. Die erwähnte Box gewährleistet eine optimierte Sicherheit, indem sie den Ladevorgang kontinuierlich überwacht und im Bedarfsfall adäquate Schutzfunktionen bereitstellt. Die Ladeleistung variiert in diesem Modus üblicherweise zwischen 2,3 kW und 3,7 kW, wobei in speziellen Fällen eine Leistung von bis zu 7,4 kW erreicht werden kann. Dieser Modus findet insbesondere in Haushalten Anwendung, sofern keine spezifische Ladeinfrastruktur verfügbar ist.

Der **Mode 3** stellt eine fortgeschrittene Ladeoption dar, welche den Einsatz spezieller Ladestationen, wie bspw. Wallboxen, erfordert. Diese kommunizieren direkt mit dem EV, um den Ladevorgang zu steuern. Die Kommunikation erlaubt eine effiziente und sichere Gestaltung des Ladevorgangs. Die Ladeleistung variiert in diesem Modus typischerweise zwischen 3,7 kW und 22 kW. Aufgrund der hohen Sicherheit und Effizienz stellt Modus 3 den Standard für öffentliche Ladeinfrastrukturen dar und findet ebenfalls häufig Anwendung bei Heimladestationen.

Der **Mode 4** ist für das Schnellladen (DC-Laden) konzipiert, bei dem das EV direkt mit Gleichstrom versorgt wird. Dies erlaubt die Realisierung wesentlich höherer Ladeleistungen, die zwischen 50 kW und 350 kW liegen [54]. Diese Art des Ladens erweist sich insbesondere in Situationen als vorteilhaft, in denen ein rasches Aufladen des EV erforderlich ist, bspw. an Autobahnraststätten oder in städtischen Schnellladernetzen. Mode 4 zeichnet sich durch eine besonders hohe Sicherheit aus, die

durch komplexe Überwachungs- und Steuerungssysteme gewährleistet wird, welche den Ladevorgang in Echtzeit überwachen. Aus diesem Grund setzen Automobilhersteller auf DC-Ladegeräte für das Schnellladen, sodass EVs in weniger als 20 min bei einer maximalen Leistung von 150 kW geladen werden können [225]. Es wird empfohlen, Batterien während des Schnellladens nur auf 80 % des maximalen Ladezustands (SoC) zu laden, um die Batterien zu schützen und ihre Lebensdauer zu verlängern [226].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass jeder Lademodus spezifische Vorzüge sowie Einsatzbereiche (siehe Abbildung 5.4) aufweist. Die Modi 1 und 2 eignen sich für das Laden zu Hause, wobei der Mode 2 aufgrund zusätzlicher Sicherheitsfunktionen zu bevorzugen ist. Mode 3 stellt eine sichere und effiziente Lösung sowohl für den privaten als auch den öffentlichen Bereich dar, während der Mode 4 das Schnellladen unterwegs ermöglicht. Die Auswahl des adäquaten Lademodus ist folglich von den spezifischen Anforderungen hinsichtlich der Ladegeschwindigkeit sowie der verfügbaren Infrastruktur abhängig.



Abbildung 5.4: Anwendungsszenarien der verschiedenen Lademodi.

Die nachfolgende Abbildung 5.5 sowie die im Anhang befindliche Tabelle C.2 bieten einen Überblick über die Standards zum konduktiven Laden. Dabei werden die entsprechenden Standards in der Abbildung 5.5 den jeweiligen Komponenten zugeordnet, während sie in der Tabelle C.2 mit ihren Unterkapiteln detailliert aufgeführt sind.

Die grundlegenden Sicherheitsanforderungen für eine Ladeinfrastruktur sind in der Norm **IEC 61851-1** definiert [227]. Die Norm findet Anwendung auf alle in Ladeinfrastrukturen integrierten Komponenten, wie z. B. das Ladekabel, AC- und DC-Wallboxen, Ladesäulen, Stecker und Steckdosen. Die Norm IEC 61851-23 wurde speziell für DC-Ladegeräte entwickelt und beschreibt die Ladeprozesse sowie die besondere Anforderungen, die zu berücksichtigen sind [227].

Die für die Verbindung eines EV mit der Infrastruktur für das AC-Laden erforderlichen Stecker und Steckdosen sind in der Norm **IEC 62196-2** festgelegt. Die Norm IEC 62196-3 gilt für DC-Stecker und Steckdosen. Die in der Norm IEC 62196-1

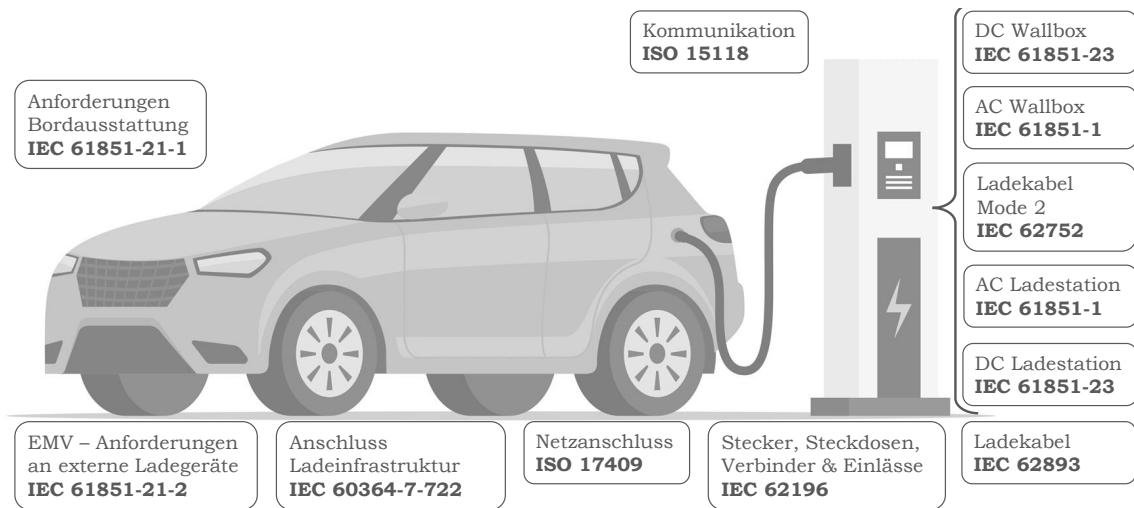


Abbildung 5.5: Konduktives Laden für EVs mit den entsprechenden Normen nach Komponente.

aufgeführten allgemeinen Anforderungen sind für beide Normen bindend [228]. Die in den vorliegenden Normen beschriebenen Stecker und Steckdosen sind Teil des kombinierten Ladesystems und wurden bereits in der Richtlinie 2014/94/EU der Europäischen Union als Mindestanforderung für die Ausstattung von Ladepunkten in öffentlich zugänglichen Bereichen festgelegt [200].

Die Norm **ISO 15118** definiert die erforderliche Hardware, Prozesse und Protokolle für die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und der Ladeinfrastruktur für verschiedene Anwendungsszenarien. Dies umfasst das Lastmanagement, die automatische Authentifizierung des Kunden sowie den Datentransfer für die Abrechnung [57].

Die internationale Norm **IEC 62752** legt die Anforderungen an das Ladekabel für den Lademodus 2 fest, wobei auch das integrierte Steuer- und Schutzgerät für das Laden an Haushalts- sowie an Industriesteckdosen berücksichtigt wird [229].

Die Anforderungen an Ladekabel sind in der Norm **IEC 62893** festgehalten, während die Sicherheitsanforderungen für Fahrzeuge beim Anschluss an eine externe Stromversorgung in der Norm ISO 17409 definiert sind [230, 231].

Die elektromagnetische Verträglichkeit von in EVs installierten Ladegeräten ist in der Norm **IEC 61851-21-1** festgelegt. In Teil 2 der Norm (IEC 61851-21-2) werden die zuvor genannten Anforderungen für Ladegeräte beschrieben, die außerhalb des Fahrzeugs betrieben werden. Die beiden Normen legen Tests fest, die unter de-

finierten Lastbedingungen durchzuführen sind, und regeln Anforderungen an die Störfestigkeit und Emissionen [227].

Der Anschluss von Ladestationen an das elektrische Verteilungsnetz ist in der Norm **IEC 60364-7-722** festgelegt [232].

Des Weiteren wird durch eine einheitliche Benutzerführung mit standardisierten Symbolen eine leicht verständliche und international einheitliche Orientierung gewährleistet. Der Einsatz grafischer Symbole erfolgt u. a. in den Bereichen Benutzeroberflächen, Mensch-Maschine-Interaktionen sowie Sicherheitskennzeichnungen.

5.4.2 Anschaffungskosten

Tabelle 5.1 bietet einen Überblick über die Kosten verschiedener Lademöglichkeiten zum Vergleich. Alle anderen Daten stammen aus dem Jahr 2019, außer den Kosten des WPT-Systems (2018) [233].

Es besteht ein extremer Preisunterschied zwischen AC- und DC-Ladegeräten. Die teuren Gleichrichter können diese deutlich höheren Kosten der DC-Ladegeräte erklären, da diese in diesem Ladesystem in den Ladestationen und nicht in den Fahrzeugen installiert sind.

Zwei Ladepunkte eines DC-Ladegeräts (50 kW) sind zwei- bis fünfmal teurer als zwei Ladepunkte eines AC-Ladegeräts (11 kW bis 22 kW) und verursachen etwa doppelt so hohe jährliche Kosten. Neben der Installation, Inbetriebnahme und Wartung der DC-Ladestationen müssen auch Kostenfaktoren in anderen Bereichen wie Toiletten, Unterstützung des Betriebspersonals, Wartung, Reinigung, Beleuchtung und Sicherheit berücksichtigt werden. Diese Kosten sind jedoch schwer zu bestimmen sowie zu berechnen und bedürfen in Zukunft weiterer Untersuchungen. Acht Ladepunkte eines DC-Ladegeräts kosten insgesamt 500.000€ bis 650.000€ [234]. Vergleicht man ein AC-Ladegerät mit einer Ladeleistung von 3,7 kW mit einem WPT-System mit einer Ladeleistung von 3,7 kW, so ist leicht zu erkennen, dass die Hardware des WPT-Systems doppelt so teuer ist wie eine herkömmliche AC-Ladestation. Dies ist auf die Komplexität der erforderlichen Technologien zurückzuführen. Die Gewährleistung einer sicheren und effizienten Energieübertragung über einen Luftspalt erfordert den Einsatz spezieller und aufeinander abgestimmter Komponenten, insbesondere induktiver Spulen im Resonanzkreis. FOD- und LOD-Sicherheitsmechanismen, strengere EMV- und Sicherheitsstandards sowie Sensorik zur Fahrzeugpositionierung und ein Kommunikationssystem zur Ladeprozesssteuerung erhöhen die Entwicklungskosten. Zudem ist die Installation aufwendig, da die Spulen in die Fahrbahn oder den Parkplatz eingebettet werden müssen. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass WPT-Systeme aufgrund der genannten technischen Anforderungen und baulichen

Maßnahmen kostspieliger sind als vergleichbare Plug-in-Ladestationen. Sie befinden sich in der frühen Phase der Marktdurchdringung und profitieren daher weniger von Skaleneffekten durch Massenproduktion. Die Kostendaten stammen von BMW, die das WPT-System als Luxusfeature für den BMW 530e iPerformance anbieten [233].

Tabelle 5.1. Kosten verschiedener Lademöglichkeiten (Datenquellen: [223, 233, 234]).

	WPT	Wallbox	AC Charger	DC Charger
Ladeleistung [kW]	3,2	3,7	11 bis 22	50
Ladepunkte	1	1	2	2
Hardware [€]	3.205	400 bis 1.200	2.500 bis 8.000	10.000 bis 20.000
Netzanschlusskosten [€]	0	0	bis 2.000	5.000 bis 15.000
Zulassung [€]	0	0	500	1.500 bis 15.000
Installation [€]	bis 2.500	bis 2.500	1.500 bis 3.000	3.500 bis 20.000
Investement (CAPEX¹) [€]	5.705	2.900 bis 3.700	6.500 bis 14.000	25.000 bis 80.000
Service/ Backend (OPEX²) [€/a]	200	200	1.500	3.000
				n.b.

¹Capital Expenditure (CAPEX): Ausgaben, die ein Unternehmen tätigt, um seine Sachanlagen zu kaufen, zu warten oder zu verbessern. ²Operational Expenditure (OPEX): laufende Kosten für den Betrieb eines Produkts, Unternehmens oder Systems.

5.5 Zahlungsmethoden und Backend-Lösungen

Im vorliegenden Kapitel erfolgt eine Beleuchtung der verschiedenen Zahlungsmethoden und Backend-Lösungen, welche an Ladestationen für EVs zum Einsatz gelangen. Die rasante Verbreitung von EVs bedingt eine ebenso dynamische Entwicklung der Ladeinfrastruktur, um den unterschiedlichen Bedürfnissen der Nutzer gerecht zu werden. Ein zentrales Element dieser Infrastruktur ist das Bezahlsystem, das nicht nur einfach und benutzerfreundlich sein muss, sondern auch eine nahtlose Integration in übergreifende Backend-Lösungen und Roaming-Plattformen ermöglichen soll.

5.5.1 Zugang und Zahlungsmethode

Der Zugang zu Ladestationen ist maßgeblich von den verfügbaren Zahlungsmethoden abhängig. Ein grundlegendes Problem stellt die große Anzahl kleiner Ladepunktbetreiber dar, die unterschiedliche Zugangs- und Zahlungsvorgänge implementiert haben [235]. Daher erscheint es ratsam, ein national und international harmonisiertes Verfahren für Zugang und Zahlung zu etablieren, sodass Kunden jederzeit und überall unabhängig von Ladepunktbetreibern laden können. Im Folgenden erfolgt ein kurzer Überblick über einige Vor- und Nachteile verschiedener Zugangs- und Zahlungsmethoden.

- **RFID-Karte:** Die Bedienung erfolgt mittels einer Radio-Frequency Identification (RFID)-Karte, wobei die Handhabung als äußerst einfach zu bezeichnen ist. Im Rahmen dieser Zugangsmethode wird ein Vertrag zwischen dem Nutzer und dem Betreiber abgeschlossen. Der zu zahlende Betrag wird zu einem festgelegten Zeitpunkt vom Konto des Nutzers abgebucht, sodass eine direkte Zahlung nach dem Ladevorgang nicht möglich ist. In diesem Fall wäre der Nutzer an den jeweiligen Vertragspartner gebunden und könnte keine Ladestation eines anderen Anbieters nutzen. Darüber hinaus könnte die RFID-Karte als Multifunktionskarte verwendet werden, bspw. zum Entriegeln des Ladesteckers.
- **Giro-/Kreditkarte:** Aus hygienischer Perspektive ist die kontaktlose Zahlung mittels Kreditkarte einer Barzahlung vorzuziehen, da hierbei kein direkter Kontakt zwischen Zahlungsmittel und -empfänger stattfindet. Alternativ besteht die Möglichkeit der direkten Bezahlung. Allerdings sind die Kosten für Kartenterminals mit bis zu 2.360€ für eine Nachrüstung [236] und bis zu 15.000€ für eine Neuanschaffung [237] relativ hoch. Zudem sind die Anforderung an die Datensicherheit immens.
- **Smartphone (App/ SMS):** Die Nutzung von Smartphones ermöglicht den Nutzer einen einfacheren Zugang zu den Ladestationen des Anbieters (z. B. QR-Codes) sowie die direkte, kontaktlose Zahlung (z. B. Paypal). Der Zugang über das Smartphone kann jedoch mit einem gewissen Zeitaufwand verbunden sein, da der Nutzer sich möglicherweise zuerst registrieren oder einloggen muss, um jede Ladestation nutzen zu können.
- **Bargeld:** Obgleich die Zahlung mittels Bargeld den Vorteil der unmittelbaren Abwicklung bietet, ist die Implementierung von Münz- und Banknoteneinrichtungen mit beträchtlichen Kosten verbunden. So werden für gebrauchte Geräte 900€ und für neue Geräte 7.500€ aufgewandt [237]. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Maschinen regelmäßig geleert sowie gewartet werden

müssen, was lediglich wirtschaftlich darstellbar ist, wenn eine hohe Dichte an Ladestationen gegeben ist. Darüber hinaus kann der Ladevorgang durch das Öffnen des Fahrzeugs abgebrochen werden, was einen Verlust des Guthabens zur Folge hat. Es wäre mit einem deutlich höheren Aufwand verbunden, bei münzbetriebenen Maschinen sein Guthaben zurückzuerhalten.

Aufgrund der steigenden Beliebtheit kontaktloser Zahlungen stellen die Smartphone- und Kreditkartenoptionen die einfachsten Möglichkeiten dar. Eine weitere Option ist die Verwendung von RFID, wobei jedoch für jeden Betreiber eine separate Karte erforderlich wäre. Die Implementierung von Bargeldautomaten ist mit vergleichsweise hohen Kosten verbunden, sodass sich ein regelmäßiges Leeren als unwirtschaftlich erweist.

5.5.2 Tarifmöglichkeiten

Grundsätzlich können zwei Konzepte in Betracht gezogen werden: Erstens eine Preismethode, bei der die gelieferte Energiemenge abgerechnet wird, und zweitens eine Preismethode, bei der nur die Ladezeit berücksichtigt wird.

Wenn das Abrechnungsobjekt die gelieferte Energiemenge (in kWh) ist, müssen die gesetzlichen Anforderungen des Eichrechts beachtet werden [238]. Dies bedeutet, dass die verbrauchte Energie jederzeit für den Benutzer überprüfbar sein muss. Zu diesem Zweck müssen geeichte sowie sichtbare Stromzähler installiert werden und darüber hinaus muss eine manipulationssichere Datenübertragung gewährleistet sein. Ein potenzieller Nachteil dieses Konzepts besteht darin, dass der Benutzer keinen Grund hat, das EV nach Abschluss des Ladevorgangs von der Ladestation zu entfernen, was in Großstädten oder in stark frequentierten Regionen problematisch sein könnte.

Dieses Problem würde nicht bestehen, wenn die Abrechnung auf Basis der Ladezeit erfolgen würde. Eine weitere Alternative könnte eine Kombination aus der Preisgestaltung nach Ladezeit und gelieferter Energiemenge sein. Zunächst erfolgt die Zahlung basierend auf der gelieferten Menge. Sobald das EV vollständig geladen ist, erfolgt die Zahlung basierend auf der Zeit, die das EV die Ladestation blockiert. Dadurch werden EV-Besitzer für jede zusätzliche Minute belastet, in der sie andere am Laden hindern, was ihnen einen zusätzlichen Anreiz gibt, den Ladepunkt zu verlassen.

Die Implikation hier ist, dass die Preisgestaltung das Verhalten der Kunden beeinflussen kann. Regionen, die unter einem Mangel an Parkplätzen leiden, könnten bspw. die Aufenthaltsdauer von EVs an Ladestationen über die Preisgestaltung steuern [239].

5.5.3 Backend-System und Roaming

Die Überwachung und Fernwartung der installierten Ladestationen wird durch das sogenannte Backend-System gewährleistet. Die Ladestation übermittelt in regelmäßigen Abständen ihren aktuellen Status an das Backend-System, wobei diese Kommunikation auch in umgekehrter Richtung erfolgt. Initiiert das Backend-System bspw. einen Reset-Befehl, wird dieser an die Ladestation übermittelt. Eine Erweiterung des Basisdienstes um eine Benutzer-Hotline ist gegen Aufpreis möglich [240]. Das Backend-System empfängt zudem alle relevanten Daten, welche für die Abrechnung erforderlich sind. Dazu zählen bspw. die ID des verwendeten Ladepunkts, die Ladezeit, die gelieferte Energiemenge (d. h. der Zählerstand) sowie die ID des Zugangsmittels [240].

Des Weiteren bildet das Backend-System die Basis für eine Roaming-Plattform. Die Plattform ermöglicht den Kunden die Nutzung von Ladestationen verschiedener Betreiber, ohne bei jedem Betreiber ein separates Konto haben zu müssen. Dies umfasst Kundendaten, Abrechnungsdaten sowie Daten der Ladestationen (z. B. Geodaten, Steckertyp, Ladeleistung und Belegungsstatus). Derzeit existieren mehrere europäische Roaming-Plattformen (z. B. Hubject, Shell ReCharge Solutions, e-clearing.net, GIREVE, PlugSurfing), welche es Kunden ermöglichen, an diverse Ladestationen zu laden, ohne sich mit den jeweiligen Abrechnungsmodalitäten befassen zu müssen. Die Abrechnung erfolgt zentral über die jeweilige Plattform oder den zugehörigen Dienst, was den Zugang zur Ladeinfrastruktur erheblich vereinfacht.

5.6 Planung und Bau im öffentlichen Raum

Die Errichtung eines Ladesystems im urbanen sowie öffentlichen Raum erfordert eine sorgfältige und systematische Planung, welche die Aspekte Zeitmanagement, Aufgabenkoordination sowie Logistik berücksichtigt. In diesem Zusammenhang ist eine koordinierte Zusammenarbeit der zuständigen Parteien, d. h. der Kommune, des Energieversorgers, des Tiefbaus sowie des Lieferanten des Ladesystems wesentlich. Im Folgenden werden auf die verschiedenen Themen wie Genehmigungsverfahren und Planung zur Baustelleneinrichtung eingegangen. U. a. wird auf das induktive Ladesystem aus dem Forschungsvorhaben TALAKO (siehe Kapitel 4.3) verwiesen.

5.6.1 Genehmigungsverfahren

Vor der Installation einer Ladestation ist eine Abstimmung mit verschiedenen staatlichen Stellen erforderlich. Dazu zählen bspw. das Verkehrsministerium, das Stadtentwicklungs- und Planungsamt, das Bauamt, das Ordnungsamt, die Bauaufsichtsbehörde sowie die Stadtwerke. Ohne die Zustimmung dieser Behörden dürfen keine Bauarbeiten durchgeführt werden. Die Bewilligung einer derartigen baulichen Maßnahme ist mit einem beträchtlichen Zeitaufwand verbunden und weist eine hohe Komplexität auf. In einer Mitteilung des Verbands der Automobilindustrie (VDA) wird darauf hingewiesen, dass das Genehmigungsverfahren ab Mitte 2020 weniger als drei Monate dauern sollte [241]. Derzeit scheint es jedoch, dass diese Zielsetzung nicht erreicht wird. Das Unternehmen Aral plant bis 2030 die Errichtung von über 20.000 Schnellladesäulen und kritisiert das langwierige Genehmigungsverfahren, welches bis zu zwei Jahren dauern kann [242]. Diese bürokratische Hürde stellt einen wesentlichen Faktor für die geringe Geschwindigkeit des Ausbaus der Ladeinfrastruktur dar.

Jede Baumaßnahme bedarf einer Genehmigung, welche sich an der Bauordnung (BauO) des jeweiligen Bundeslandes orientiert [243]. Für Nordrhein-Westfalen (NRW) findet die BauO NRW Anwendung. Diese besagt u. a., dass bei Baumaßnahmen im öffentlichen Raum Verträge zwischen der Stadt und dem verantwortlichen Bauherrn zu schließen sind. Sofern das Volumen der Baumaßnahme 75 m^3 überschreitet, ist ein Genehmigungsverfahren einzuleiten. Da die Installation des Schaltschranks zeitgleich mit den Spulen des WPT-Systems (inkl. Verkabelung) erfolgen muss, wird die Baumaßnahme bei der Installation von mehreren Ladepunkten wie bspw. bei TALA-KO die 75 m^3 überschreiten und dementsprechend ist das Genehmigungsverfahren unumgänglich. Der Antrag muss alle erforderlichen Unterlagen zur Beurteilung des Vorhabens enthalten. Hinweise zu den Unterlagen finden sich in der Verordnung über bautechnische Prüfungen [244].

Initiiert wird das Genehmigungsverfahren durch eine Vorprüfrunde der involvierten Fachämter, in welcher entschieden wird, ob und in welchem Umfang weitere Fachabteilungen konkret hinzugezogen werden sollten. Gemäß § 71 Abs.4 der BauO NRW [243] sind die Fachabteilungen dazu verpflichtet, innerhalb eines Zeitraums von acht Wochen eine Stellungnahme abzugeben, in der sie mitteilen, ob sie Einwände haben, ob es etwas zu beachten gilt oder ob keine Bedenken bestehen. Des Weiteren werden die Straßenreinigung sowie die Stadtwerke in die Entscheidungsfindung miteinbezogen. Im Falle einer negativen Stellungnahme innerhalb der achtwöchigen Frist erfolgt eine entsprechende Mitteilung an den Bauherrn, der sodann gemäß den Vorgaben handeln bzw. umzuplanen hat. Sollte der Bauherr diesen Anforderungen innerhalb eines Zeitraums von vier Wochen nicht nachkommen, fordert die Stadt ei-

ne erneute Rückmeldung ihrerseits an. Danach wird eine Anhörung zur Ablehnung einberufen. Im Falle einer zwischenzeitlichen Rücknahme des Bauantrags durch den Bauherrn wird das Genehmigungsverfahren formell sowie gebührenpflichtig abgelehnt. In Abhängigkeit vom konkreten Sachverhalt können die Gebühren variieren. Unter der Voraussetzung, dass keine öffentlichen Interessen dem Bauvorhaben entgegenstehen, wird die Genehmigung erteilt und somit die Freigabe der Baumaßnahmen ausgesprochen. Die Mitteilung an die Kommune über die Umsetzung des Bauvorhabens hat spätestens eine Woche vor Baubeginn zu erfolgen. Es ist von essentieller Bedeutung, dass alle Hinweise und Auflagen, die im Rahmen der Genehmigung aufgerufen wurden, beim Bauvorhaben eingehalten werden. Diesbezüglich werden Kontrollen durchgeführt. Nach Abschluss der Bauarbeiten ist der Bauherr verpflichtet, die Beendigung der Bauarbeiten mitzuteilen. Die Abbildung 5.6 zeigt eine beispielhafte Darstellung der von der Baumaßnahme TALAKO betroffenen Dezernate mit den verantwortlichen Ressorts. Es sei darauf hingewiesen, dass das Organigramm zwischen den Kommunen und Landkreisen variieren kann.

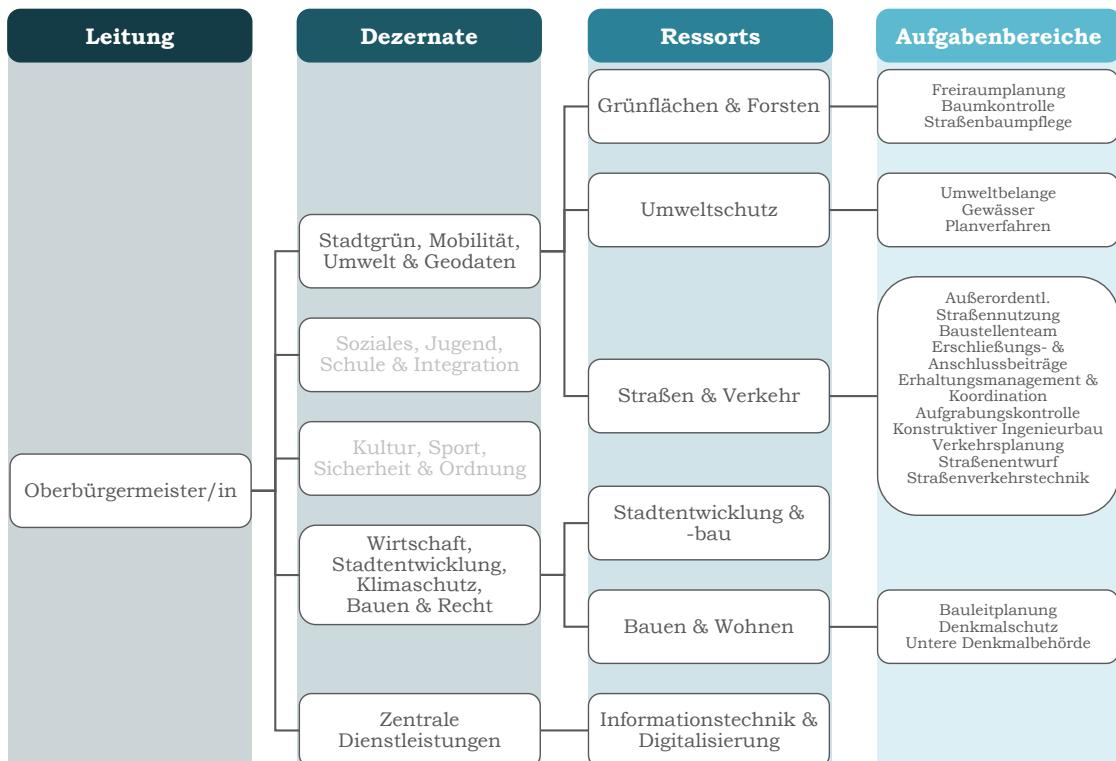


Abbildung 5.6: Verantwortliche Dezernate bzw. Ressorts für die Installation eines WPT-Systems im öffentlichen Raum (siehe Kapitel 4.3).

5.6.2 Baustellenerrichtung

Im Rahmen der Planung der Baustelleneinrichtung ist eine sorgfältige Abarbeitung der in der Tabelle 5.2 aufgelisteten Kategorien unerlässlich, um eine sichere und zugleich wirtschaftliche Gestaltung der Baustelle zu gewährleisten. Die Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin hat aus diesem Grund einen Leitfaden für die Planungsmaßnahmen einer Baustelleneinrichtung veröffentlicht, welcher als Orientierung dienen soll [245]. Dabei sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen, von der Herrichtung des Baufeldes über die Versorgung der Baustellenarbeiter sowie deren Sicherheit bis zur Sicherstellung der Verkehrsinfrastruktur sowie der Medienversorgung.

Tabelle 5.2. Planungskatalog zur Baustelleneinrichtung (Datenquelle: [245]).

Herrichtung des Baufeldes	<ul style="list-style-type: none"> • Sicherung von Grünflächen/ Bewuchs/ Baumbestände • Anmietung von zusätzl. Flächen & ggf. Beantragung einer Sondernutzungserlaubnis • Beachtung von Auflagen bzgl. Medienträger (Leitungspläne, Schachterlaubnisse, -hinweise usw.)
Großgeräte	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz von Großgeräten (z. B. Bagger, Laderaupe)
Gebäude, Container & Bauwagen	<ul style="list-style-type: none"> • Organisation von Containern (Büro, Besprechungsräume) • Berücksichtigung von Einzeltoiletten
Verkehrsflächen, Transportwege, Lager- & Stellflächen	<ul style="list-style-type: none"> • Beantragung von verkehrsrechtlichen Anordnungen für die äußere Baustellenerschließung • Anmietung von öffentlichen/ privaten Flächen • Berücksichtigung von Lagerflächen für Materialien
Medienversorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Einrichtung eines Stromanschlusses • Einrichtung eines Wasseranschlusses • Einrichtung eines Internetanschlusses
Arbeits- & Schutzgerüste	<ul style="list-style-type: none"> • Anordnung von Absturzsicherung auf der Baustelle (z. B. bei offenen Schächte)
Baustellensicherung	<ul style="list-style-type: none"> • Ganze oder teilweise Einzäunung der Baustelle • Sicherung von Schächten, Öffnungen, Hydranten usw. • Beantragung einer verkehrsrechtlichen Anordnung für die Baustellensicherung an Verkehrswegen
Abfalltrennung & -entsorgung	<ul style="list-style-type: none"> • Beachtung von besonderen kommunalen Abfallsatzungen bei Entsorgung von Baustellenabfällen • Beantragung von Genehmigungen für die Entsorgung
Rettungsmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> • Erstellung von Unterlagen (u. a. Ersthelferübersicht, Alarmplan, Gefährdungsbeurteilung)

6 Integration induktiver Ladesysteme: Szenariobasierte Ansätze

Die Automobilindustrie durchläuft derzeit einen tiefgreifenden Transformationsprozess, der maßgeblich durch die internationalen Klimaschutzziele beeinflusst wird. Infolge der steigenden Anzahl von EVs ist eine grundlegende Anpassung der Ladeinfrastruktur erforderlich. Die wechselnden Belastungen des Stromnetzes, die Knappheit an verfügbaren Plätzen für Ladestationen sowie die hohen Investitionen zu Beginn der Gesamtinstallation machen eine Planung und optimierte Verteilung von WPT-Systemen unabdingbar und rechtfertigen diese in besonderem Maße. Im vorliegenden Kapitel 6.1 wird solch eine Verteilung basierend auf einem vordefinierten Szenario mithilfe eines graphentheoretischen Algorithmus, wie den Dijkstra-Algorithmus, vorgenommen. Darüber hinaus beschäftigt sich das Kapitel 6.2 mit einer stattdorfreundlichen Integration der Schaltschränke für WPT-Systeme. Im Rahmen der Untersuchung wird die Nutzbarkeit von zwei Unterflurschränken sowie eines herkömmlichen Schrankes evaluiert.

Die in diesem Kapitel dargelegten Inhalte basieren zu einem Teil auf [246,247].

6.1 Verteilung induktiver Ladesysteme

Im Folgenden wird die angewandte Methodik zur Entwicklung und Analyse der Verteilung von WPT-Systemen in einer ausgewählten Region dargelegt. Der gesamte Prozess lässt sich in mehrere Schritte untergliedern, welche von der Datenerhebung bis zur Anwendung des graphentheoretischen Algorithmus von Dijkstra reichen.

1. Auswahl der Region

Der erste Schritt des Vorgehens besteht in der Auswahl einer Region bspw. innerhalb Deutschlands, die für die weitere Analyse verwendet wird. Eine solche Region dient als Modell zur Simulation der Verteilung von Ladestationen.

2. Datenerhebung

Im nächsten Schritt werden relevante Daten für die gewählte Region zusammengetragen, die u. a. vom Kraftfahrt-Bundesamt, Statistischen Bundesamt bzw. von lokalen Behörden stammen. Diese Datensammlung umfasst:

- Anzahl der registrierten konventionellen Fahrzeuge in der Region;
- durchschnittliche Anzahl von konventionellen Fahrzeugen pro Haushalt, um die Verbreitung von Fahrzeugen besser zu verstehen;
- durchschnittlichen Kaufpreis für ein konventionelles Fahrzeug, der als Vergleichsbasis für die Kostenanalyse dient;
- durchschnittliche jährliche Fahrleistung;
- Anzahl der bestehenden Tankstellen, die als Referenzpunkte für die Verteilung der WPT-Systeme verwendet werden.

3. Annahmen zum Elektrifizierungsgrad der Fahrzeugflotte

Auf Basis der erhobenen Daten werden Annahmen getroffen, um die potenzielle Umstellung auf EVs sowie die Implementierung von WPT-Systemen zu simulieren. Eine wesentliche Prämisse dieser Analyse ist die Annahme, dass 80 % der Bevölkerung auf rein elektrische Fahrzeuge umsteigen könnten. Darüber hinaus wird ein Standardprofil für ein durchschnittliches EV definiert, welches die untersuchte Bevölkerung repräsentiert. Die genannten Annahmen sind von entscheidender Bedeutung, um die Parameter für den Algorithmus zu definieren und die Simulation durchzuführen.

4. Anwendung eines graphentheoretischen Algorithmus

Im Rahmen der vorliegenden Forschung wird der graphentheoretische Algorithmus von Dijkstra eingesetzt, um die optimale Verteilung der induktiven Ladestationen in der ausgewählten Region zu berechnen. Anschließend wird der Algorithmus auf das Straßennetzwerk der Region angewendet, um die kürzesten Routen sowie die effektivsten Positionen für die induktiven Ladestationen zu ermitteln. Die Optimierung erfolgt unter Minimierung der Gesamtkosten für die Infrastruktur. Dabei werden Daten zur bestehenden Verteilung von Tankstellen sowie die Fahrstrecken der Bevölkerung berücksichtigt.

5. Ergebnisse

Als Ergebnis der Anwendung des graphentheoretischen Algorithmus von Dijkstra werden zwei wesentliche Outputs generiert:

- Die optimale Verteilung der induktiven Ladeinfrastruktur in der gewählten Region unter Berücksichtigung der erhobenen Daten und getroffenen Annahmen.

- Ein Kostenvergleich zwischen der geplanten induktiven Ladeinfrastruktur und den bestehenden Tankstellen. Diese Kostenanalyse hilft, die ökonomischen Vorteile und Herausforderungen einer Umstellung auf WPT-Systeme zu bewerten.

Die dargestellte methodische Vorgehensweise in Abbildung 6.1 ermöglicht eine fundierte Analyse zur optimalen Platzierung von WPT-Systemen in einer realen Umgebung. Durch die Kombination aus Datenerhebung, Annahmenbildung, algorithmischer Optimierung und Kostenvergleich wird eine umfassende Bewertung der Machbarkeit und Effizienz von WPT-Systemen durchgeführt.

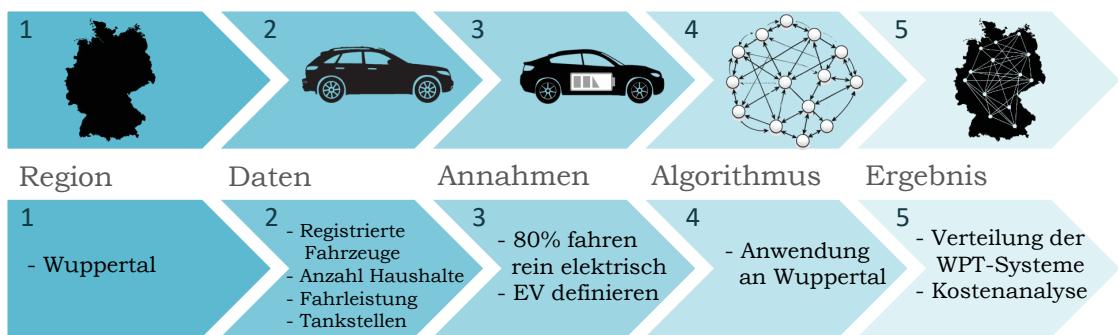


Abbildung 6.1: Ansatz zur Implementierung einer optimierten Ladeinfrastruktur für WPT-Systeme.

6.1.1 Definition und Rahmenbedingungen des Anwendungsszenarios

Der Fokus liegt auf der Erweiterung und Optimierung der Ladeinfrastruktur durch WPT-Systeme. Um dem Verbraucher ein hohes Maß an Flexibilität zu gewährleisten, könnte eine Ladestation pro Haushalt mit einer Ladeleistung von 22 kW für den täglichen Bedarf der durchschnittlichen Bevölkerung ausreichend sein. Sofern der Verbraucher jedoch mit seinem eigenen EV längere Strecken zurücklegen möchte, als die angegebene Reichweite des EV dies erlaubt, ist es unerlässlich, neben Stationen entlang der Autobahnen auch eine gut vernetzte städtische Ladeinfrastruktur bereitzustellen. Die erwähnten Stationen ermöglichen ein schnelles Laden. In Abhängigkeit von der Batterie- sowie der Ladeleistung ist eine Aufladung der EVs innerhalb weniger Minuten möglich. Für die Zwecke dieser Untersuchung wird ein Modell entwickelt, welches auf einem Datensatz einer beispielhaften Region basiert (u. a. Anzahl der Haushalte, Anzahl der zugelassenen konventionellen Fahrzeuge,

durchschnittliche Fahrleistung, durchschnittlicher Kaufpreis eines konventionellen Fahrzeugs). In einem weiteren Schritt werden geeignete Annahmen für ein EV für den durchschnittlichen Nutzer getroffen.

Die Umsetzung erfolgt anhand eines Beispiels aus der Stadt Wuppertal (Nordrhein-Westfalen, Deutschland). Die Daten entstammen dem Jahr 2019. Die Bevölkerung von etwa 360.600 Einwohnern ist in 198.280 Haushalte unterteilt [248]. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass 199.050 Fahrzeuge (einschließlich konventioneller und elektrischer Fahrzeuge) zugelassen sind, lässt sich ableiten, dass jeder Haushalt im Besitz von mindestens einem Auto ist und weniger als 1% der Haushalte im Besitz eines zweiten Autos ist [248]. Der durchschnittliche Deutsche legt pro Tag üblicherweise eine Distanz von 43 km zurück [249], vorzugsweise in Kompaktklassewagen (26 %), Kleinwagen (20 %) oder Mittelklassewagen (15 %) [250]. Der durchschnittliche deutsche Verbraucher investiert derzeit etwa 32.350 € für ein neues Auto alle zwölf Jahre [250]. Auf Basis der zuvor getroffenen Annahmen zum Elektrifizierungsgrad der Fahrzeugflotte lässt sich das EV für die durchschnittliche deutsche Bevölkerung definieren. In Bezug auf die tägliche Durchschnittsfahrleistung, die Fahrzeugklassifikation, den durchschnittlichen Preis konventioneller Fahrzeuge und den staatlichen Anreiz von 4.000 € pro EV [251] sollte ein EV mit einer Reichweite von etwa 200 km und einem Kaufpreis von ungefähr 36.350 € mehr als akzeptabel sein und die Grundanforderungen erfüllen. Im Jahr 2019 erfüllen zwei EVs diese Anforderungen und verzeichnen bereits eine hohe Nachfrage. Die Kompaktklasse wird durch den VW e-Golf [252] und das Kleinwagensegment durch den Renault Zoe [253] repräsentiert. Die entsprechenden technischen Spezifikationen sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

Tabelle 6.1. Technische Spezifikationen der EVs gemäß definierter Anforderungen.

Technische Spezifikationen	VW e-Golf (Kompaktklasse)	Renault Zoe (Kleinwagensegment)
Max. Leistung des Antriebs [kW]	100	65
Batteriekapazität [kW h]	36	22
Elektrische Reichweite [km]	200	243
Höchstgeschwindigkeit [km h ⁻¹]	150	135
Kaufpreis [€]	35.900	23.900

Seit den 1960er Jahren ist ein Rückgang der Anzahl der Tankstellen zu verzeichnen. Im Jahr 1969 belief sich die Anzahl auf etwa 46.700, während sie im Jahr 2018 lediglich 14.100 betrug [250]. Als Ursachen für diese Entwicklung können die unzureichende Wirtschaftlichkeit kleiner innerstädtischer Tankstellen sowie strengere Si-

cherheitsanforderungen identifiziert werden [254]. Infolge der steigenden Anzahl von EVs, welche internationale Klimaschutzziele bedingt ist, wird eine weitere Reduktion der Nachfrage nach Tankstellen prognostiziert. Es wird angenommen, dass sich die Anzahl der Tankstellen an Rastplätzen nicht verändern wird, sodass Langstreckenfahrten problemlos möglich sind. Stattdessen wird die Anzahl der Tankstellen in urbanen Räumen signifikant dezimiert, während für die verbleibenden Standorte eine grundlegende Restrukturierung unumgänglich ist. Eine Anpassung der Tankstellen an neue Energiebedarfe ist erforderlich.

Des Weiteren verfügen 70 % der Fahrzeughalter über eine Garage oder einen privaten Parkplatz [255]. In der vorliegenden Untersuchung werden private Eigentümer induktive Ladesysteme zu Hause installieren und nur 30 % sind auf öffentliche induktive Ladesysteme angewiesen.

6.1.2 Anwendung eines graphentheoretischen Algorithmus zur Routenoptimierung

Das angenommene Szenario aus 6.1.1 basiert auf der Anwendung des graphentheoretischen Algorithmus von Dijkstra zur Optimierung der Verteilung von WPT-Systemen. Der Dijkstra-Algorithmus, ein Vertreter der sogenannten Greedy-Algorithmen, wird eingesetzt, um eine gut vernetzte Ladeinfrastruktur zu realisieren. Diese Verfahren werden eingesetzt, um Maximierungs- oder Minimierungsprobleme zu lösen. Dabei wird in jedem Schritt das lokale Optimum gewählt, welches zu diesem Zeitpunkt den größten bzw. kleinsten Wert aufweist. In Abgrenzung zum Dijkstra-Algorithmus finden sich in den Publikationen Verweise auf Algorithmen wie das k-means und das Fuzzy C-means Clustering [189] sowie das Voronoi-Diagramm [187, 190]. Für die Realisierung eines Kurzpfadszenarios erweist sich das Clustering nicht zielführend, da im Rahmen dessen nicht nach gleichen oder ähnlichen Strukturen in Datensätzen gesucht wird. Der Einsatz des Dijkstra-Algorithmus ermöglicht die Bestimmung der kürzesten Wege zwischen den WPT-Systemen. In diesem Fall wird der kürzeste Weg durch die durchschnittliche Reichweite von 200 km für ein EV definiert.

In Bezug auf den Dijkstra-Algorithmus lässt sich festhalten, dass das Finden des kürzesten Weges zwischen Knoten in einem Graphen ein Minimierungsproblem darstellt [256]. Im vorliegenden Beispiel stellt der Graph das Straßennetz der gewählten Region dar. Die Knoten spiegeln die geografische Verteilung der vorhandenen Tankstellen wider, wobei die Gewichtung der Wege durch die tatsächlich zurückgelegten Entfernungen zwischen zwei Knoten in Kilometern erfolgt. Die Abbildung 6.2 präsentiert die aktuelle geografische Verteilung der Tankstellen in der Stadt Wuppertal. Die geografischen Koordinaten jeder einzelnen Tankstelle dienen hierbei als

Grundlage für die Darstellung. Die zeitgenössische Verteilung der Tankstellen ist das Resultat einer Vielzahl lokaler Gegebenheiten, darunter die geografische Region, das Straßennetz sowie die Bevölkerungsdichte.

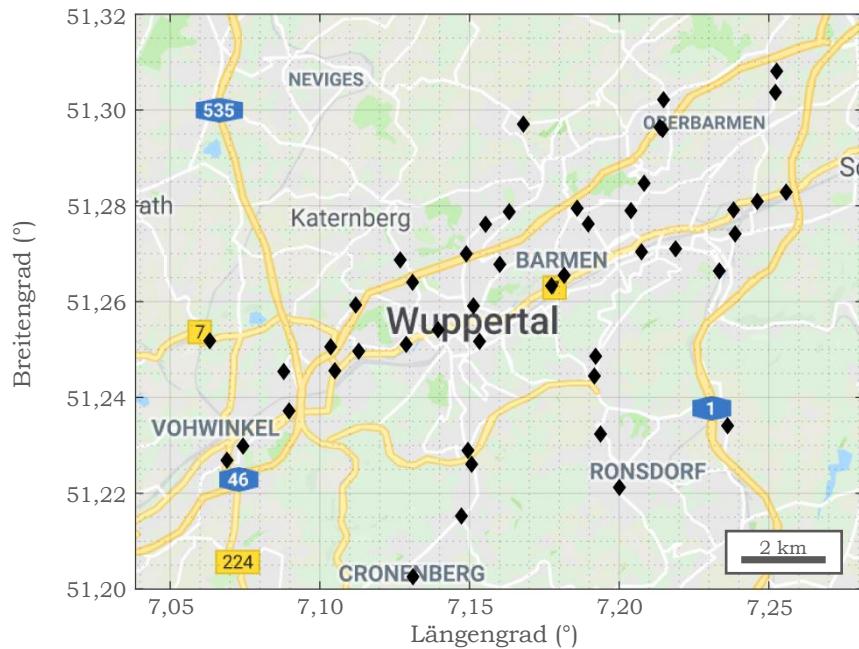


Abbildung 6.2: Geografische Verteilung der bestehenden Tankstellen in Wuppertal.

In urbanen Räumen ist die Dichte an Tankstellen besonders hoch, weshalb im Rahmen dieser Untersuchung Knoten mit einer Entfernung von weniger oder gleich 4 km berücksichtigt wurden. Einerseits ermöglicht dies die Aufrechterhaltung eines Überblicks, andererseits weist [254] darauf hin, dass Grundversorgungen innerhalb von 15 Minuten erreichbar sein müssen. Bei einer Entfernung von 4 km und einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 50 km/h (in städtischen Gebieten) könnte eine Tankstelle sogar innerhalb von ungefähr fünf Minuten erreicht werden. Die Abbildung 6.2 verdeutlicht, dass auch bei einer Entfernung von 4 km eine adäquate Verbindung zwischen den Tankstellen besteht.

Die Anwendung des Dijkstra-Algorithmus auf einen gewichteten Graphen $G = \{V, E, w\}$ mit den Knoten $v_1, v_2, \dots, v_n \in V$ und den Kanten $e_1, e_2, \dots, e_n \in E$ erfordert eine Matrix, die das Gewicht der Kanten w_{ij} beinhaltet. E ist die Menge der Kanten des Graphen, die die Knotenpaare verbinden. Wenn zwei Knoten durch eine Kante verbunden sind, erhält die Kante ein Gewicht, das der tatsächlichen Entfernung zwischen diesen beiden Knoten entspricht. Wenn keine Verbindung zwischen zwei Knoten besteht, wird das Gewicht der Kante auf null gesetzt. Dementsprechend

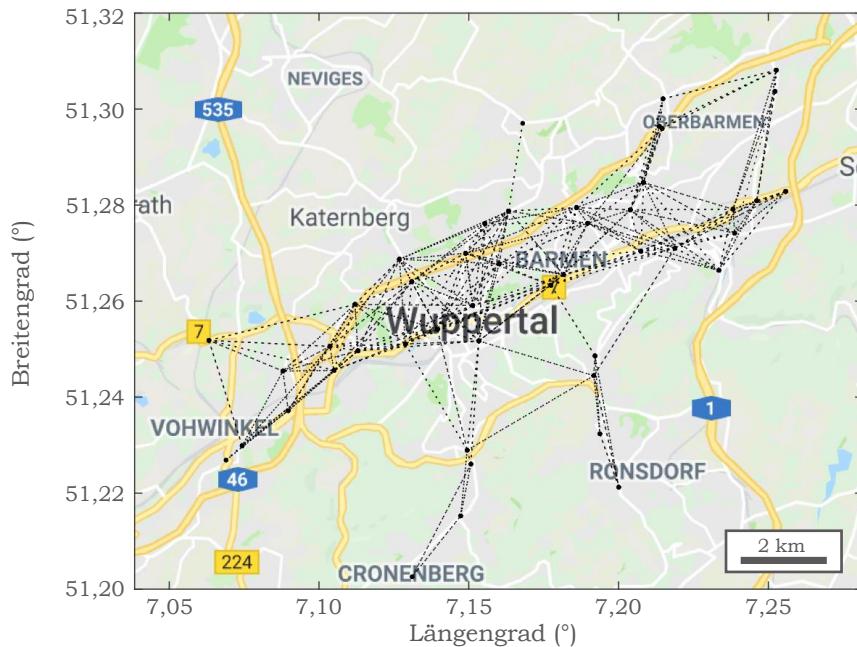


Abbildung 6.3: Verknüpfung von Tankstellen im Abstand von 4 km.

kann eine Matrix $A = [a_{ij}]$, die Adjazenzmatrix genannt wird, abgeleitet werden, die wie folgt definiert [256]:

$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij} & i, j \in E \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (6.1)$$

Im Beispiel 6.2 wird eine Adjazenzmatrix gezeigt. In diesem Fall sind die Variablen i, j gleichbedeutend mit der Gesamtzahl der Tankstellen.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 4 & 3.8 & 3.3 & 4 & \dots & a_{1j} \\ 2.8 & 0 & 1.5 & 0 & 2.9 & \dots & a_{2j} \\ 3.3 & 3.2 & 0 & 1.7 & 2 & \dots & a_{3j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ a_{i1} & a_{i2} & a_{i3} & a_{i4} & a_{i5} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix} \quad (6.2)$$

6.1.3 Ökonomische Bewertung der Umstellung auf induktive Ladestationen

Anschließend liegt der Fokus auf ökonomischen Bewertung. Daher ist es von entscheidender Bedeutung, die aktuellen Kosten von Tankstellen mit den Kosten für WPT-Systeme hinsichtlich Installation, Bau, Versorgung und Wartung zu vergleichen. Ein Vergleich ist erforderlich, der sich nicht auf lokale Aspekte beschränkt, sondern auch die Energiequellen einbezieht, die von verschiedenen Antriebstechnologien verwendet werden.

Tankstellen

Es lassen sich zwei verschiedene Arten von Tankstellen unterscheiden, nämlich Markentankstellen und unabhängige Tankstellen. Markentankstellen sind an große Ölkonzerne (z. B. Aral, Jet, Shell, Total, Esso) gebunden und setzen deren Marketingstrategien konsequent um. Im Gegensatz dazu sind unabhängige Tankstellen nicht in das Vertriebssystem der Markengesellschaften integriert. Sie verkaufen die Kraftstoffe unter ihrem eigenen Namen auf eigene Rechnung. Für den Bau von Tankstellen und eine erfolgreiche Inbetriebnahme müssen einige grundlegende Anforderungen erfüllt werden.

- Geeignetes Grundstück (z. B. gute Erreichbarkeit, an einer stark befahrenen Straße),
- Anforderungen des Gewerbeamtes (z. B. Schutz von Wasser und Umwelt, Rücksichtnahme auf Anwohner, sichere Lösungen für Einfahrten),
- Fachkenntnisse der Gefahrstoffverordnung.

Die Errichtung einer Tankstelle ist ein zeit- und kostenintensives Unterfangen. Der Bau einer Tankstelle erfordert die Umsetzung struktureller Infrastrukturmaßnahmen, zu denen die Fundamentierung, Befestigung, Installation von unterirdischen Tanks, Überdachung der Zapfsäulen sowie die Errichtung eines Containers als Kassenbüro zählen. So wird bspw. eine Verkaufsfläche nicht berücksichtigt, da diese für den Betrieb von Tankstellen nicht erforderlich ist. Die spezifische Tankstellentechnologie ist dabei abhängig vom jeweiligen Kraftstofftyp, wobei im vorliegenden Fall von einem flüssigen Kraftstoff ausgegangen wird. Die Lagerung des flüssigen Kraftstoffs erfolgt unterirdisch in Tanks, wobei eine integrierte Pumpe die Befüllung der Fahrzeuge gewährleistet.

Um eine valide Aussage über die Gesamtkosten einer Tankstelle treffen zu können, müssen zusätzlich die Betriebskosten berücksichtigt werden. Die Betriebskosten setzen sich aus den Kategorien Reparatur-, Wartungskosten und Personalkosten zusammen. Die Reparatur- und Wartungskosten entsprechen einem Anteil von 3 % der Investitionskosten der Zapfsäulen. Die Personalkosten lassen sich aus dem Mindestlohn (2015: 8,50 €/h, 2024: 12,41 €/h) sowie der durchschnittlichen Öffnungszeit

(18 h pro Tag) berechnen [255].

Diese Angaben lassen den Schluss zu, dass der Bau einer Standardtankstelle für flüssige Kraftstoffe mit sechs Zapfsäulen Kosten von ca. 384.800 € verursacht. Zusätzlich sind die jährlichen Betriebs- und Personalkosten in Höhe von ca. 99.200 € zu veranschlagen. Die Tabelle 6.2 bietet einen Überblick über die Investitionskosten pro Tankstelle.

Tabelle 6.2. Investitionskosten pro Tankstelle (Datenquelle: [255])

Investitionskosten	in €
Technik (1 Zapfsäule)	82.700
Bauarbeiten (1 Zapfsäule)	158.093
Technik (jede weitere Zapfsäule)	17.510
Bauarbeiten (jede weitere Zapfsäule)	11.284
Betriebskosten (pro Zapfsäule pro Jahr)	7.224
Personalkosten (pro Jahr)	2015: 55.845 2024: 81.534

Induktive Ladestationen

WPT-Systeme setzen sich aus einer Bodeneinheit (GA) und einer Fahrzeugeinheit (VA) zusammen. Die GA ist mit dem Stromnetz verbunden, während die VA mit der Fahrzeugbatterie verbunden ist. Die Befestigung der VA wird am Unterboden des EV stellt einen wesentlichen Aspekt in der Installation dar. Es existieren jedoch drei verschiedene Möglichkeiten zur Positionierung der GA: auf der Bodenoberfläche aufliegend, das Gehäuse der GA bündig abschließend mit der Bodenoberfläche oder das Gehäuse der GA in einiger Entfernung unter der Bodenoberfläche vergraben [35]. Die WPT-Systeme können direkt vom Fahrzeughersteller oder von externen Anbietern bezogen und anschließend installiert werden. Vorab ist zu entscheiden, wo das WPT-System platziert werden soll (z. B. Garage, Parkhaus, öffentlicher Parkplatz, Raststätte). Für eine erfolgreiche Inbetriebnahme ist eine Installation durch eine Elektrofachkraft erforderlich. Neben den Kosten für den qualifizierten Elektriker sind weitere Kostenfaktoren zu berücksichtigen:

- Kabelquerschnitt (entsprechend der Ladeleistung),
- Kabelverlegung (Entfernung zwischen Parkplatz und Sicherungskasten bzw. Netzanschluss),
- Erdarbeiten,
- Installation von Leistungs- und Fehlerstromschutzschaltern.

Des Weiteren sollte das WPT-System für Smart-Grid-Anwendungen über die folgenden Funktionen verfügen: einen Energiemanager (z. B. Anschluss von Photovoltaik-

taikanlagen), ein Lastmanagement (z. B. gleichzeitiges Laden mehrerer Autos), eine Zugangsbeschränkung (Zugang nur für autorisierte Personen). Um die Kostenschätzung zu vereinfachen, wird auf die Kabelverlegung verzichtet und angenommen, dass der elektrische Anschluss der induktiven Ladestation in der Nähe des Energienetzes liegt. Die Vorhersage der Kabelverlegung für jede Station ist mit beträchtlichen Schwierigkeiten verbunden, da die Kosten für die Kabelverlegung von einer Vielzahl von Faktoren abhängen (u. a. die Entfernung, die Pflasterung). In der Tabelle 6.3 werden die Kostenfaktoren für ein WPT-System dargelegt.

Tabelle 6.3. Investitionskosten pro 22 kW WPT-System (Datenquellen: [233, 257, 258]).

Investitionskosten	
VA	900 €
GA	2.500 €
Baumaßnahmen (Pflaster)	45 €/m ²
Kabelverlegung (Asphalt)	200 €/t
Installation	2.000 €
Betriebskosten	200 €/Jahr
Genehmigung	500 €

Unter Berücksichtigung einer täglichen Fahrleistung von 43 km und einer Reichweite von 200 km muss das EV etwa alle fünf Tage geladen werden. 70 % der Fahrzeughalter können über Nacht zu Hause laden, die anderen 30 % müssen bei der Arbeit oder auf öffentlichen Parkplätzen (z. B. Supermärkte, Krankenhäuser, Parks, Bildungseinrichtungen, Einkaufszentren, Fitnessstudios) laden. Die einmaligen Kosten für den Erwerb eines WPT-Systems belaufen sich auf schätzungsweise 5.900 €, während die jährlichen Betriebskosten bei etwa 200 € liegen dürften. Personalkosten müssen in diesem Fall nicht berücksichtigt werden.

6.1.4 Analyse und Diskussion der Ergebnisse

Der Kostenvergleich zwischen WPT-Systemen und Tankstellen basiert auf einer Gegenüberstellung verschiedener Kostenkategorien, darunter Fahrzeugkauf, Energiekosten, Investitionskosten, Wartung und Betrieb der Ladeinfrastruktur bzw. der Tankstelleninfrastruktur sowie Anschlusskosten. Ein WPT-System ist für einen Bruchteil des Preises einer Tankstelle erhältlich, jedoch ist das Betanken eines konventionellen Fahrzeugs innerhalb einer Minute möglich, während ein EV eine Ladedauer

von etwa zwei Stunden aufweist (bei einer Ladeleistung von 22 kW). Die langen Ladezeiten bedingen eine deutlich höhere Anzahl an WPT-Systemen. In der Beispielrechnung wird angenommen, dass 30 % der EV an öffentlichen Ladestationen versorgt werden müssen, was etwa 59.715 EVs in Wuppertal entspricht. Unter der Prämisse, dass ein Ladepunkt den Bedarf von zwölf Fahrzeugen deckt [255], ergibt sich ein Bedarf von insgesamt 4.594 Ladepunkten. Derzeit verfügt Wuppertal über 47 Tankstellen, was einem Hundertstel der erforderlichen Ladepunkte entspricht. Der Unterschied besteht darin, dass bestehende Parkplätze (z. B. an Supermärkten, Krankenhäusern oder Bildungseinrichtungen) für Ladepunkte genutzt werden können, ohne ein Grundstück zu erwerben. Die Parkinfrastruktur kann durch WPT-Systeme ergänzt werden, sodass Tankstellengrundstücke frei würden.

In Bezug auf die einmalige Installation von Ladestationen ist festzuhalten, dass diese mit etwa einem Drittel höheren Kosten gegenüber der Tankstelleninfrastruktur verbunden ist. Die Verkaufsfläche der Tankstellen wurde nicht berücksichtigt, wodurch sich der Gesamtpreis erhöhen würde. Mit fortschreitendem technologischem Fortschritt ist jedoch mit sinkenden Anschaffungskosten für WPT-Systeme zu rechnen. Unter Berücksichtigung der Emissionen unterschiedlicher Energiequellen wird ersichtlich, dass Ladestationen auf Basis erneuerbarer Quellen nahezu emissionsfrei sein könnten und damit zur Erreichung der internationalen Klimaziele beitragen.

Die Untersuchung verdeutlicht die Bedeutung einer adäquat entwickelten Ladeinfrastruktur für EVs. Die Etablierung ist mit Herausforderungen verbunden, die durch volatile Lasten im Stromnetz, Platzmangel für Ladestationen und Investitionen in deren Installation entstehen. Zur Lösung wird eine optimierte Ladeinfrastruktur entwickelt und eine ökonomische Analyse durchgeführt. Die geografische Verteilung erfolgt unter Nutzung der bestehenden Tankstellen. Die Ermittlung der kürzesten Wege zwischen den WPT-Systemen berücksichtigt die durchschnittliche Reichweite eines EV mittels des Algorithmus von Dijkstra. Abschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der Investitionen der Tankstellen mit der generierten Anzahl an WPT-Systemen. Die Ergebnisse münden in einer vernetzten Ladeinfrastruktur auf Basis induktiver Ladetechnologie, dargestellt am Beispiel Wuppertals. Die Umstrukturierung würde etwa ein Drittel mehr kosten als die bisherige Tankstelleninfrastruktur. In Bezug auf Emissionen ist sie nur dann sinnvoll, wenn der Strom ausschließlich aus erneuerbaren Energien stammt.

6.2 Nutzbarkeitsuntersuchung von Unterflurschränken

In diesem Kapitel erfolgt zunächst eine Darlegung der grundlegenden Anforderungen, die ein Schaltschrank zu erfüllen hat. Im Anschluss werden drei Schaltschranktypen vorgestellt, die insbesondere bei WPT-Systemen zum Einsatz kommen könnten. Abschließend erfolgt eine Untersuchung der Nutzbarkeit der vorgestellten Schaltschranktypen, insbesondere der Unterflur-Varianten, anhand des Forschungsprojektes TALAKO.

6.2.1 Anforderungen an Schaltschränke

Ein Schaltschrank erfüllt in der Regel die Funktion, die Steuerung von Maschinen bzw. Anlagen sicher, kompakt und witterungsunabhängig aufzubewahren. Diese bestehen aus einer Vielzahl an elektrischen und elektrotechnischen Komponenten. Der primäre Zweck eines Schaltschranks besteht in der Gewährleistung des Schutzes für die darin installierte Elektrotechnik bzw. Elektronik. Es sind nicht nur mögliche Einwirkungen auf die elektrischen bzw. elektronischen Komponenten im Schaltschrank zu vermeiden (u. a. eindringender Staub, Wasser, Vandalismus), sondern auch deren potenzielle Auswirkungen auf die Umgebung. Schaltschränke, die im Außenbereich installiert sind, müssen darüber hinaus auch den jahreszeitlichen Umwelteinflüssen (u. a. Regen, Schnee, Eis, Hitze, Schmutz sowie eine korrosionsfördernde Umgebung) standhalten. Die folgende Tabelle 6.4 gibt einen Überblick über die wichtigsten Funktionen, die ein Schaltschrank hinsichtlich seiner Umgebung und der zu schützenden elektrotechnischen sowie elektrischen Komponenten erfüllen sollte.

Schaltschränke unterliegen einer Vielzahl von Anforderungen, welche es zu erfüllen gilt, bevor sie in Betrieb genommen werden dürfen. Diesbezüglich existieren entsprechende Normen, welche zu berücksichtigen sind. Die Hersteller von Schaltschränken sind verpflichtet, sich regelmäßigen Kontrollen zu unterziehen, um die Produktqualität und Sicherheit gewährleisten zu können. Zudem müssen sie nachweisen, dass die Schaltschränke gemäß den anerkannten Regeln der Technik errichtet und unterhalten werden. Die im Anhang befindliche Tabelle C.6 bietet einen Überblick über die wichtigsten Normen für Schaltschränke bezüglich der Stromversorgung von EVs. Dabei wurden die Normen in zwei Kategorien untergliedert: Normen gegen äußere Einflüsse bzw. mechanische Beanspruchung und Normen hinsichtlich elektrotechnischer Aspekte wie Sicherheit, Installation sowie Inbetriebnahme.

Tabelle 6.4. Funktionen eines Schaltschranks (Datenquelle: [259]).

Einflussbereich	Funktion
Umgebung	<ul style="list-style-type: none"> • Abschirmung elektromagnetischer Emissionen • Schutz gegen das Berühren gefährlicher Spannungen • Brandschutz
Elektrotechnische bzw. elektrische Komponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Schutz vor Staub und Wasser • Schutz vor elektromagnetischer Beeinflussung • Schutz gegen mechanische Einflüsse (z. B. Vandalismus, Erdbeben) • Montagebefestigung und Strukturierung des Innenaufbaus

6.2.2 Schaltschranksvarianten

Allgemein etablierte Schaltschränke werden überflur installiert. Das heißt, der Schaltschrank befindet sich über dem Boden und ist frei zugänglich [260], siehe Abbildung 6.4 a). Hierfür wird lediglich ein Leichtbausockel einbetoniert, auf den der Schaltschrank anschließend aufgesetzt wird. Dies ist bisher die gängigste Vorgehensweise, um Anlagensteuerungen unterzubringen. Basierend auf dem zunehmenden Ausbau der Ladeinfrastruktur stoßen die Kommunen auf sowieso schon eingeschränkte Platzverhältnisse. Hinzu kommen noch Aspekte, wie eine stadtbildkonforme Architektur zu erhalten und weiterhin die Sicherheit trotz steigender Schaltschränke gewährleisten zu können. Aufgrund dessen wären Unterflurschränke eine alternative Lösung zu Schaltschränken, die überflur montiert werden. In der Abbildung 6.4 zeigen die Beispiel b) und c) zwei mögliche Varianten, die Schaltschränke unterflur zu realisieren. Das Prinzip aus Abbildung 6.4 b) wurde bereits in einer Pilotanlage für ein konduktives Ladesystem realisiert [261]. Hierfür wurde ein Schaltschrank der Firma Langmatz in den Boden eingelassen. Um bei Bedarf (z. B. Wartung, Reparaturen) problemlos an den Schaltschrank zu kommen, wird dieser über Gasdruckdämpfer hochgeföhrt. Zusätzlich schützt eine Tauchhaube vor Überflutungen, Vandalismus und unberechtigtem Zugriff. Eine weitere Möglichkeit wäre es, einen Schaltschrank zu entwickeln, der seine Öffnung nach oben ausgerichtet hat. In diesem Fall würde die Leistungselektronik unterhalb der Primärspule eingelassen. Der Vorteil dieser Variante ist, dass die Leistungselektronik leicht zugänglich wäre. Lediglich der Traglastdeckel müsste abgenommen und die Primärspule, die auf einer Halterung aufliegt, angehoben werden. Es würde jegliche Mechanik wegfallen wie bspw. in Abbildung 6.4 b), die immer auch ein Störfaktor werden kann. Des Weiteren müsste für die

Variante in Abbildung 6.4 c) nur ein Schacht ausgehoben werden und nicht wie in Abbildung 6.4 a) + b) zwei Schächte (einen für den Schaltschrank, einen für die Primärspule, siehe Abbildung 6.6).

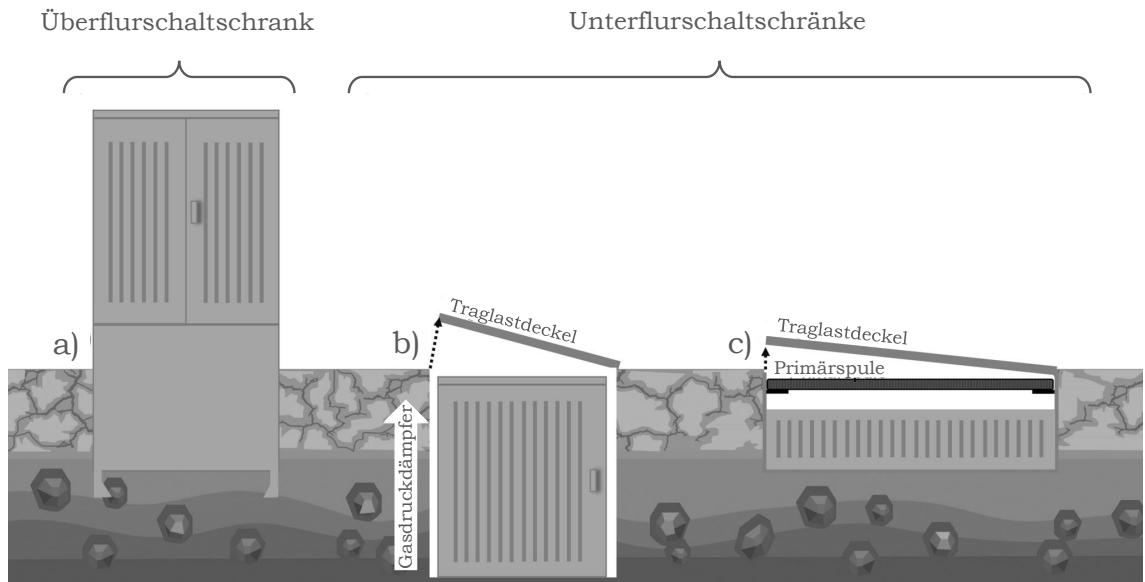


Abbildung 6.4: Verschiedene Schaltschranktypen.

6.2.3 Kosten-Nutzen-Analyse

Das Europäische Parlament hat den Beschluss gefasst, den Verkauf von Neuwagen (Personenkraftwagen und leichte Nutzfahrzeuge) mit Verbrennungsmotor ab dem Jahr 2035 zu untersagen [262]. Diese Maßnahme fördert zum einen die Elektromobilität, zum anderen verbessert sie die Luftqualität, schont fossile Ressourcen und vermeidet politische Konflikte. Die Förderung der Elektromobilität impliziert jedoch nicht nur einen technologischen Wandel mit sich, sondern auch eine Eingliederung in die urbane sowie ländliche Infrastruktur. Die Anzahl der Neuzulassungen von EVs zeigt gemäß des Kraftfahrt-Bundesamts seit 2016 eine exponentielle Wachstumstendenz, sodass sich ein steigender Bedarf an Lademöglichkeiten manifestiert [263]. Die Installation von Ladesäulen für konduktive Ladesysteme bzw. Schaltschränken bei WPT-Systemen führt zu einer nachträglichen sowie nachhaltigen Veränderung des Stadtbildes. Des Weiteren ist bei der Installation der Ladesäulen bzw. Schaltschränke darauf zu achten, dass keine Behinderung für jegliche Verkehrsteilnehmer (u. a. Fußgänger, Fahrradfahrer, Taxifahrer, Busfahrer usw.) entsteht. Zudem müssen die Standorte so gewählt werden, dass sie sich an die bereits vorhandenen Ver- und

Entsorgungseinrichtungen (wie Leitungen, Rohre, Schächte) orientieren und sich ins Stadtbild integrieren lassen. Die Suche nach einem geeigneten Standort für eine Ladesäule bzw. einen Schaltschrank gestaltet sich in Kooperation mit der Stadtverwaltung und dem Betreiber oftmals als herausfordernd. Bei den aktuellen konduktiven Ladesystemen besteht die Möglichkeit, bereits existierende Straßenlaternen oder Poller als Ladesäulen umzufunktionieren [264, 265], sodass die vorhandene Verkehrs- sowie Energieversorgungsinfrastruktur verwendet werden kann. Allerdings stellt das Ladekabel weiterhin eine Barriere – insbesondere für andere Verkehrsteilnehmer – dar und schränkt den Benutzer im Bedienungskomfort ein. Ein WPT-System hingegen ermöglicht einen vollständig automatisierten Ladevorgang und kann somit den zuvor genannten Nachteil beheben. Neben dem anwendungsspezifischen Vorteil weisen WPT-Systeme im Vergleich zu konduktiven Ladesystemen weitere Vorteile auf, wie bereits im Kapitel 2.4 erwähnt. Darüber hinaus ermöglicht das WPT-System den Einsatz von Unterflurschränken, wodurch eine Veränderung des Stadtbildes vermieden werden kann.

Die Planung der Pilotanlage im Forschungsprojekt TALAKO (siehe Abschnitt 4.3) in der Stadt Köln erforderte eine besondere Berücksichtigung der Platzierung der Schaltschränke, welche sich als Herausforderung für die Stadtverwaltung darstellte. Insgesamt sind drei Schaltschränke für die Bereitstellung von sechs Ladepunkten vorgesehen, was einer Kapazität von zwei Ladepunkten pro Schaltschrank entspricht. Die Integration eines eigenen Schaltkreises pro Ladepunkt gewährleistet die Unabhängigkeit der Ladepunkte voneinander. Im Falle einer technischen Störung fällt somit lediglich der betroffene Ladepunkt aus, ohne dass gleich mehrere Ladepunkte betroffen sind. Auf diese Weise kann eine kontinuierliche Energieversorgung für die Taxen gewährleistet werden. Die Abmessung der verwendeten Schaltschränke (1.200 mm x 1.200 mm x 500 mm) führen zu einer anspruchsvollen Aufgabe bei der Suche nach einer geeigneten Platzierung, die die vorhandenen Ent- sowie Versorgungseinrichtungen, den Fuß- bzw. Fahrverkehr und die regionalen Festivitäten berücksichtigt. Des Weiteren wurde seitens der Stadtverwaltung Kritik hinsichtlich des Einflusses der Schaltschränke auf das Stadtbild geäußert. Es wurde die Frage aufgeworfen, ob es keine Alternativlösung für dieses Problem gebe.

In dem vorgestellten Anwendungsszenario handelt es sich um ein WPT-System, für welches eine Alternative zum herkömmlichen Schaltschrank betrachtet werden soll. In den Schaltschrank werden nur die infrastrukturseitigen Komponenten (wie z. B. Gleichrichter, Wechselrichter, Netzfilter, Steuerung) integriert. Das Ersatzschaltbild in der Abbildung 6.5 zeigt beispielhaft die Funktionsblöcke eines WPT-Systems für die Elektrofahrzeug- sowie Infrastrukturseite. Die Kompensation wird zusammen mit der Primärspule in der Straße verlegt.

In der Tabelle 6.5 wird eine beispielhafte Kostenkalkulation zu den in Abbildung 6.4 vorgestellten Schaltschrankvarianten und basierend auf den entsprechenden Baustel-

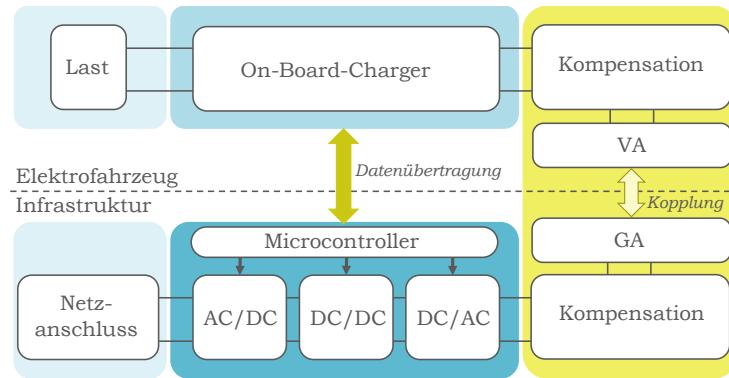


Abbildung 6.5: Funktionsblöcke eines WPT-Systems.

lenskizzen in der Abbildung 6.6 aufgeführt. Hierbei werden die Anschaffungskosten für die jeweilige Schaltschrankvariante, die Kosten für das Genehmigungsverfahren, des Tiefbaus und des Stromanschlusses berücksichtigt. Die Kosten stellen eine Schätzung dar, da die Preise von Kommune zu Kommune bzw. von Anbieter zu Anbieter variieren. Zudem ist beim Tiefbau zu betrachten, dass das Öffnen und Schließen des Bodens je nach Untergrund unterschiedlich aufwendig (z. B. Asphalt, Beton, Pflaster) und dementsprechend kostspielig. Für die Deckschicht wurden folgende Annahmen getroffen: Asphalt 120 mm, Beton 200 mm, Großpflaster 100 mm [257]. Für das Öffnen und Schließen der Straße wurden folgende Annahmen getroffen: Asphalt 200 €/t, Beton 120 €/m³, Großpflaster 45 €/m² [257]. Für die Entfernung des Bodenaushub wird mit 100 €/m³ kalkuliert [257].

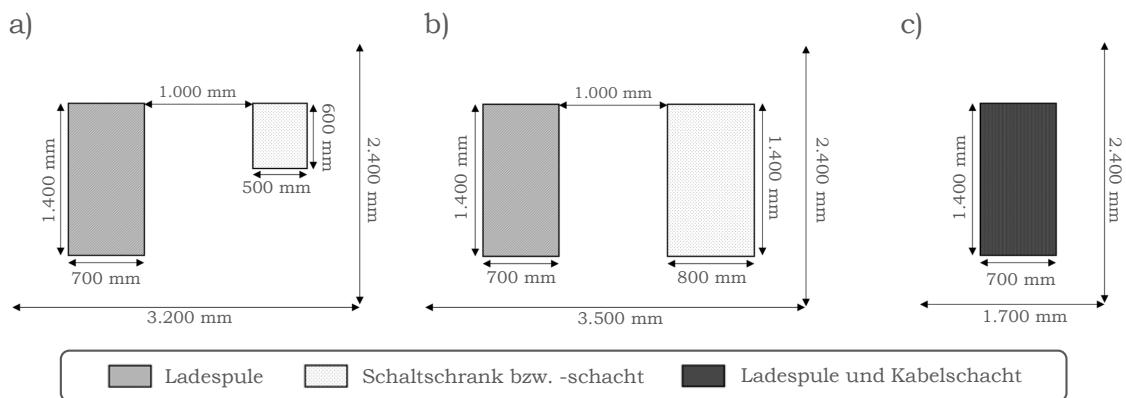


Abbildung 6.6: Baustellenskizzen zu den Schaltschrankvarianten aus Abbildung 6.4.

Im Rahmen der Evaluierung der diversen Schaltschrankvarianten wurden sowohl die jeweiligen Vor- als auch Nachteile identifiziert. Die Schaltschrankvariante 6.4 a) stellt eine etablierte und bewährte Lösung dar, die sich in der Praxis bereits vielfach

Tabelle 6.5. Kostenkalkulation zu den Schaltschrankvarianten (siehe Abbildung 6.4).

	Abb. 6.4 a)	Abb. 6.4 b)	Abb. 6.4 c)
Variante	Etablierte Lösung	Alternative Lösung	Potentielle Lösung
Installationstyp	Überflur	Unterflur	Unterflur
Schaltschrankmaße (B x H x L in mm)	600 x 1.200 x 500	800 x 1.200 x 1.400	800 x 1.400 x 700
Max. Gesamtkosten	3.098,88 €	12.741,60 €	5.702,67 €
Schaltschrank	812,16 € (inkl. Sockel)	10.445,00 € (Schacht, Abdeckung, Schränk)	3.740,55 € (Schacht, Abdeckung)
Tiefbau			
- <i>Großpflaster</i>	913,20 €	916,30 €	422,70 €
- <i>Beton</i>	586,72 €	586,60 €	262,12 €
- <i>Asphalt</i>	1.084,45 €	1.097,32 €	511,21 €
Stromanschluss	1.500,00 €	1.500,00 €	1.500,00 €
Genehmigungsverfahren	100 € bis 200 €	100 € bis 200 €	100 € bis 200 €

bewährt hat. Des Weiteren ist sie in der Anschaffung vergleichsweise günstig, was sie zu einer ökonomisch attraktiven Option macht. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass diese Variante erheblich in das Stadtbild eingreift und ein hohes Potenzial für Vandalismus aufweist. Darüber hinaus kann die genannte Schaltschrankvariante eine potenzielle Gefährdung für die Verkehrssicherheit darstellen, indem sie den Verkehr behindert. Die Planung ist mit einem hohen Aufwand verbunden und es wird viel Platz benötigt, was in dicht besiedelten Gebieten zu Schwierigkeiten führen kann. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Installationskosten relativ hoch sind, was die gesamten Kosten zusätzlich belastet.

Die Variante 6.4 b) des Schaltanlagen-Konzepts stellt eine bereits erfolgreich implementierte Lösung dar, die als Referenz dienen kann. Ein wesentlicher Vorteil besteht in der Bewahrung des Stadtbildes, da die Schränke unauffällig integriert werden können. Des Weiteren sind die Schränke vor Vandalismus geschützt, was ihre Langlebigkeit erhöht. Ein weiterer Vorteil besteht in der Überfahrbarkeit des Schachtdeckels, wodurch sich eine höhere Flexibilität bei der Platzierung ergibt. Allerdings ist für die Realisierung dieser Variante eine zusätzliche Mechanik erforderlich, was potenzielle Wartungsprobleme mit sich bringen kann. Des Weiteren ist der Planungsaufwand höher und die Anschaffungskosten sind höher als bei anderen Varianten. Die Installation ist ebenfalls mit hohen Kosten verbunden und erfordert einen beträchtlichen Platzbedarf, was die Implementierung in bestimmten Bereichen erschwert.

Die in Abbildung 6.4 c) dargestellte Lösung bietet das Potenzial, das Stadtbild zu

bewahren sowie ein sicheres Umfeld vor Vandalismus zu gewährleisten. Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass eine höhere Akzeptanz bei den Bürgern zu verzeichnen wäre und sich die Planungszeit verkürzen lässt. Die Installation ist vergleichsweise kostengünstig und der Schachtdeckel ist ebenfalls überfahrbar, was die Flexibilität in der Nutzung erhöht. Allerdings ist bei dieser Variante eine Wärmeabführung nach außen notwendig, was technische Herausforderungen mit sich bringen kann. Ein weiterer Nachteil besteht in den höheren Anschaffungskosten, was die Wirtschaftlichkeit dieser Variante beeinträchtigt.

Damit die Kommunen dem steigenden Bedarf an einer gut ausgebauten Ladeinfrastruktur nachkommen können, ohne nachhaltig und erwünscht ihr Städtebild zu verändern, müssen Alternativen zu den klassischen Ladesäulen geschaffen werden. Das WPT-System stellt nicht nur eine Ladetechnologie dar, die dem Anwender einen höheren Komfort bietet, sondern ermöglicht zudem die vollständige Integration in das Stadtbild. Dies kann durch die Nutzung eines Unterflurschranks erzielt werden. Dadurch wird das Risiko von Vandalismus minimiert, während die Sicherheit der Menschen bzw. der Technologie gewährleistet bleibt. Zudem bleibt das Stadtbild unverändert und es werden keine Hindernisse für Verkehrsteilnehmer durch Ladesäulen bzw. Schaltschränke geschaffen.

Aus diesem Grund werden drei Varianten zur Unterbringung der Leistungselektronik sowie Steuerung des WPT-Systems aufgeführt und in einer Kosten-Nutzen-Analyse gegenübergestellt. Die Varianten umfassen einen klassischen Schaltschrank, einen im Boden versenkten Schaltschrank sowie eine unter Ladespule integrierte Lösung. Unter ökonomischen Aspekten stellt der klassisch etablierte Schaltschrank die kostengünstigste Variante dar. Unter Berücksichtigung der mit dem klassischen Schaltschrank einhergehenden Nachteile erscheint die potenzielle Lösung, bei der die Ladespule und die Leistungselektronik in einem Kabelschacht integriert werden, vielversprechend. Es besteht die Möglichkeit, dass der Nutzen die Kosten aufwiegt. Eine weitere Variante stellt der im Boden versenkte Schaltschrank dar. Die Beschaffungskosten für einen Schaltschrank, die Hebemechanik, den Schacht sowie die Schachtabdeckung sind exorbitant hoch, sodass diese Variante sowohl aus ökonomischer Sicht als auch unter Berücksichtigung des Nutzens nicht in Betracht kommt. Obgleich die Kosten für die Realisierung der Lösung, bei der die Leistungselektronik und die Ladespule in einem Schacht integriert werden, höher sind, weist diese Variante ein signifikantes Potenzial auf, basierend auf der Nutzenbetrachtung. Insbesondere in Anwendungsszenarien, in denen eine Installation mehrere Ladepunkte hintereinander erforderlich ist, wie es im Rahmen des Projektes TALAKO im historischen Stadt kerns Köln der Fall ist. Hier gestaltete sich die Planung für drei Schaltschränke für sechs Ladepunkte aus zuvor besagten Gründen als komplex wie auch zeitintensiv heraus und das Stadtbild wurde nun nachhaltig durch die Schaltschränke beeinflusst.

6.3 Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel hebt die Bedeutung einer gezielt optimierten Ladeinfrastruktur für EVs hervor, um deren langfristige Etablierung zu unterstützen. Diese Infrastruktur muss Herausforderungen wie die volatilen Netzlasten und den begrenzten Zugang zu Ladestationen bewältigen. Eine geeignete Lösung sieht die Nutzung vorhandener Tankstellenstandorte für die Implementierung von WPT-Systemen vor, wobei eine optimale Verteilung basierend auf der Reichweite von EVs mithilfe des graphentheoretischen Algorithmus von Dijkstra berechnet wird. Die Untersuchung zeigt, dass eine gut vernetzte Ladeinfrastruktur für WPT-Systeme im Stadtgebiet, hier beispielhaft in Wuppertal, Nordrhein-Westfalen, umgesetzt werden könnte. Die Umstrukturierung wäre mit Kosten verbunden, die etwa ein Drittel über denen der traditionellen Tankstelleninfrastruktur liegen. Allerdings bleibt die Verkaufsfläche der Tankstellen bei der Berechnung unberücksichtigt, sodass sich der Gesamtpreis entsprechend erhöhen wird. Mit fortschreitender Zeit und technologischem Fortschritt ist jedoch mit einer Reduktion der Anschaffungskosten für WPT-Systeme zu rechnen. Unter Berücksichtigung der Emissionen unterschiedlicher Energiequellen wird ersichtlich, dass Ladestationen, welche auf EE basieren, nahezu emissionsfrei sein könnten. Dies würde es ermöglichen, die internationalen Klimaschutzziele zu erreichen.

Zusätzlich werden alternative Installationsmethoden zu klassischen Ladesäulen empfohlen, um das Stadtbild zu erhalten und den Bedarf an Ladeinfrastruktur zu decken. WPT-Systeme bieten hier durch die Integration in Unterflurschränke eine attraktive Lösung, da sie das Risiko von Vandalismus reduzieren und die optische Belastung des Stadtbildes minimieren. Die Studie vergleicht drei Varianten für die Unterbringung der Leistungselektronik und Steuerung der WPT-Systeme: den klassischen Schaltschrank, einen im Boden versenkten Schaltschrank und eine Lösung, bei der die Technik in den Kabelschacht integriert wird. Die letztgenannte Variante erscheint besonders vielversprechend, da sie trotz höherer Kosten durch eine verbesserte Nutzen-Kosten-Bilanz überzeugt. Diese Variante eignet sich insbesondere für historische Stadtzentren, wie das Projekt TALAKO in Köln zeigt, wo die Installation von drei Schaltschränken für sechs Ladepunkte komplex und stadtbildprägend war. Die Ergebnisse belegen somit, dass eine nachhaltige und effektive Ladeinfrastruktur durch technische Innovationen und eine durchdachte städtebauliche Integration erreicht werden kann.

7 Strategische Weichenstellungen in Energie, Elektromobilität und Politik

Die erfolgreiche Implementierung von Elektromobilität und deren Integration in bestehende Infrastrukturen erfordert umfassende strategische Entscheidungen in den Bereichen Energie, Elektromobilität und Politik. Diese strategischen Weichenstellungen sind entscheidend, um eine nachhaltige Transformation hin zu einem emissionsarmen Verkehrssystem zu gewährleisten und gleichzeitig die sozialen, wirtschaftlichen und ökologischen Herausforderungen zu adressieren.

Dieses Kapitel befasst sich mit den zentralen strategischen Handlungsfeldern, die notwendig sind, um die Entwicklung und Akzeptanz der Elektromobilität voranzutreiben. Zunächst werden die wichtigsten Maßnahmen zur Integration EE und zur Entwicklung von Energiespeicherlösungen im Energiebereich betrachtet. Anschließend werden die politischen Rahmenbedingungen und Anreize zur Förderung der Elektromobilität und des Ausbaus der Ladeinfrastruktur untersucht. Darüber hinaus widmet sich das Kapitel der Rolle von Forschung und Entwicklung in der Elektromobilität, insbesondere im Hinblick auf innovative Technologien wie WPT-Systeme. Abschließend wird die Bedeutung langfristiger strategischer Planungen und politischer Kooperationen beleuchtet, die notwendig sind, um ein unterstützendes Umfeld für die Elektromobilität zu schaffen und die soziale Akzeptanz zu fördern.

Im Verlauf der vergangenen Jahre wurden mehrere Studien zu den Hindernissen für die Förderung der Elektromobilität veröffentlicht. In diesem Kontext sei auf Studien verwiesen, die sich mit der Identifikation, Kategorisierung und Gewichtung der genannten Barrieren befassen. Dazu zählen bspw. die folgenden [266–268]. Zu diesem Zweck wurden sozialempirische Studien in den relevanten Regionen durchgeführt und ausgewertet. Diesbezüglich sei insbesondere auf die Studie [266] aus dem Jahr 2020 verwiesen, welche aufzeigt, dass die Themen Reichweite und Ladeinfrastruktur nach wie vor eine wesentliche Rolle hinsichtlich der sozialen Akzeptanz spielen. Eine weitere Studie [269] basiert auf den in anderen Studien identifizierten Barrieren für eine Sensitivitätsanalyse. Die hier vorgestellte Methodik zielt darauf ab, den Einfluss

von Veränderungen und Entwicklungen bei den Barrieren auf die soziale Akzeptanz im Zeitverlauf zu untersuchen. Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wird auf Studien wie [266–268] zurückgegriffen, wobei ein besonderes Augenmerk auf eine aktuelle Meinungsumfrage [266] gelegt wird.

Dieses Kapitel erörtert und beleuchtet diese Probleme, wobei besonderes Augenmerk auf die Themen Reichweite, das Phänomen der Reichweitenangst, Ladezeit und Komplexität der Ladeinfrastruktur in Deutschland gelegt wird. Schließlich wird die Entwicklung der sozialen Akzeptanz in Deutschland von 2011 bis 2020 untersucht.

Diese Betrachtung soll aufzeigen, welche politischen, wirtschaftlichen und technologischen Maßnahmen erforderlich sind, um den Übergang zu einem nachhaltigen, elektrifizierten Verkehrssystem zu unterstützen und die gesellschaftliche Akzeptanz und Marktentwicklung zu fördern. Die in diesem Kapitel dargelegten Inhalte basieren zu einem Teil auf [121, 246, 270].

7.1 Strategische Weichenstellungen im Bereich Energie

Im Folgenden soll die Relevanz der Nutzung von EE für die Ladeinfrastruktur, insbesondere für WPT-Systeme, dargelegt sowie die damit verbundenen Chancen und Herausforderungen erörtert werden. Durch eine durchdachte Integration von EE in die Ladeinfrastruktur und die Nutzung von WPT-Systemen kann ein nachhaltiges, effizientes und klimafreundliches System für die Elektromobilität geschaffen werden, das langfristig zur Erreichung von Klimazielen und zur Reduzierung der Umweltbelastung beiträgt.

7.1.1 Integration erneuerbarer Energien

Die Integration von EE wie Solar-, Wind-, Wasser- und Biomassenenergie in die Ladeinfrastruktur für EVs ist ein zentraler Baustein auf dem Weg zu einer nachhaltigen und klimafreundlichen Mobilität. Durch die Versorgung von Ladestationen, einschließlich WPT-Systeme, mit EE lässt sich die CO₂-Bilanz der Elektromobilität weiter verbessern und somit ein bedeutender Beitrag zur Erreichung der Klimaziele leisten. Dieser Ansatz fördert die Klimaneutralität, da er den CO₂-Ausstoß auf ein Minimum reduziert und die Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verringert. Gleichzeitig wird durch die Nutzung natürlicher, nahezu unbegrenzt verfügbarer Ressourcen die Nachhaltigkeit der Ladeinfrastruktur gewährleistet, was die

Umweltbelastung deutlich minimiert. Darüber hinaus erhöht diese Strategie die Unabhängigkeit von importierten fossilen Energieträgern und stärkt so die Energiesouveränität auf lokaler und nationaler Ebene.

Bei der Bewertung konventioneller und alternativer Antriebstechnologien ist der gesamte Prozess von der Rohstoffgewinnung bis zur Bereitstellung und Nutzung des Kraftstoffs zu berücksichtigen. Die gesamte Prozesskette wird in der Literatur auch als „Well-to-Wheel“ (WtW) bezeichnet. Im Rahmen der Bewertung werden direkte und indirekte Emissionen berücksichtigt, wobei ein besonderes Augenmerk auf klimaschädlichen Gasen wie Kohlendioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Stickstoffdioxid (NO₂) liegt. WtW-Analysen lassen sich in zwei Teilprozesse untergliedern: „Well-to-Tank“ (WtT) und „Tank-to-Wheel“ (TtW).

Der Begriff „Well-to-Tank“ bezeichnet den Teil der Energiekette, welcher die gesamte Energie- und Emissionsbilanz von der Rohstoffgewinnung bis zur Bereitstellung im Tank eines Fahrzeugs umfasst. Dabei werden alle Schritte berücksichtigt, die erforderlich sind, um den jeweiligen Kraftstoff oder die Energie zu produzieren, zu verarbeiten, zu transportieren und bereitzustellen.

1. Rohstoffgewinnung:

Der Abbau oder die Gewinnung von Primärenergieträgern (wie Öl, Gas, Kohle, Biomasse) oder Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Quellen (wie Wind, Solar, Wasserkraft).

2. Transport und Verarbeitung:

Der Transport der Rohstoffe zur Raffinerie oder Verarbeitungsanlage, Verarbeitung und Raffination, Transport des fertigen Kraftstoffs oder der Energie zum Endverbrauchsort.

3. Verteilungsinfrastruktur:

Umfasst die Energiekosten und Emissionen für die Lagerung und Verteilung des Kraftstoffs oder der Energie bis zur Zapfsäule oder Ladesäule.

Die Bewertung der ökologischen und ökonomischen Vorteile verschiedener Energiequellen und Kraftstoffe im Vergleich erfordert eine Analyse der Auswirkungen auf die Umwelt sowie der Gesamteffizienz der Energieproduktion und -bereitstellung. Dabei stellt die WtT-Betrachtung ein entscheidendes Instrument dar, da sie die ökologischen und ökonomischen Faktoren integriert und somit eine ganzheitliche Bewertung ermöglicht.

Der Begriff „Tank-to-Wheel“ bezeichnet denjenigen Teil der Energiekette, welcher die Effizienz und Emissionen bei der Umwandlung des gespeicherten Kraftstoffs oder der Energie in Antriebsleistung eines Fahrzeugs umfasst. Der Begriff bezieht sich auf den Energieverbrauch und die Emissionen, die während des Betriebs eines Fahrzeugs entstehen, vom Tank oder der Batterie bis zu den Rädern.

1. Fahrzeugbetrieb:

Umfasst den Kraftstoffverbrauch und die Emissionen, die direkt durch den Motor oder die Antriebseinheit des Fahrzeugs während der Fahrt entstehen. Für Verbrennungsmotoren (Benzin, Diesel) sind dies in erster Linie CO₂, NO₂, Ruß sowie weitere Abgase. Im Falle von Elektrofahrzeugen sind keine direkten Emissionen während des Betriebs zu verzeichnen.

2. Energieumwandlung:

Im Falle eines Verbrennungsmotors erfolgt die Umwandlung chemischer in mechanische Energie, während bei einem EV elektrische Energie unmittelbar in Antriebsleistung umgesetzt wird. Die Effizienz dieser Umwandlung ist von entscheidender Bedeutung für die TtW-Bewertung.

3. Fahrzeugtyp und Technologie:

In Abhängigkeit von der Art des Fahrzeugs sowie der implementierten Antriebstechnologie zeigt sich eine signifikante Variation des TtW-Wirkungsgrads. Der TtW-Wirkungsgrad von EVs ist bspw. höher als der von herkömmlichen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor, da bei Letzteren ein größerer Teil der Energie als Wärme verloren geht.

Da TtW sich auf den Fahrzeugbetrieb konzentriert, wird hier gemessen, wie umweltfreundlich oder effizient ein Fahrzeug in der Nutzung ist. Bspw. werden EVs als emissionsfrei im TtW-Bereich betrachtet, da keine direkten Abgase entstehen.

Die vorliegende Abbildung 7.1 bietet eine grafische Darstellung der gesamten Prozesskette der Well-to-Wheel-Analyse.

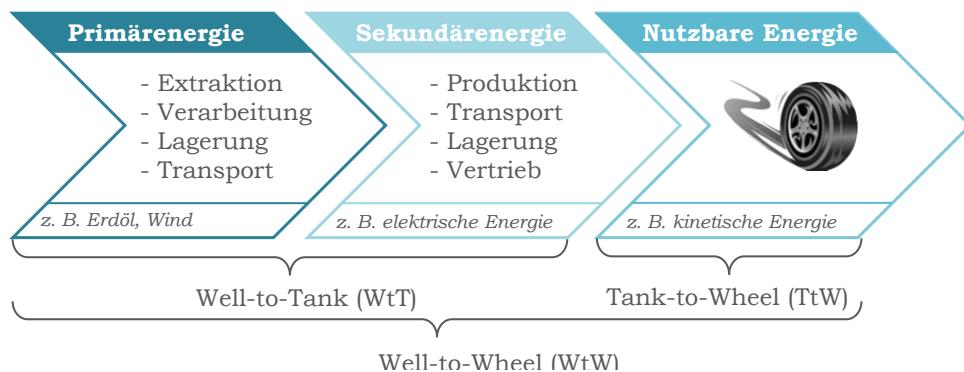


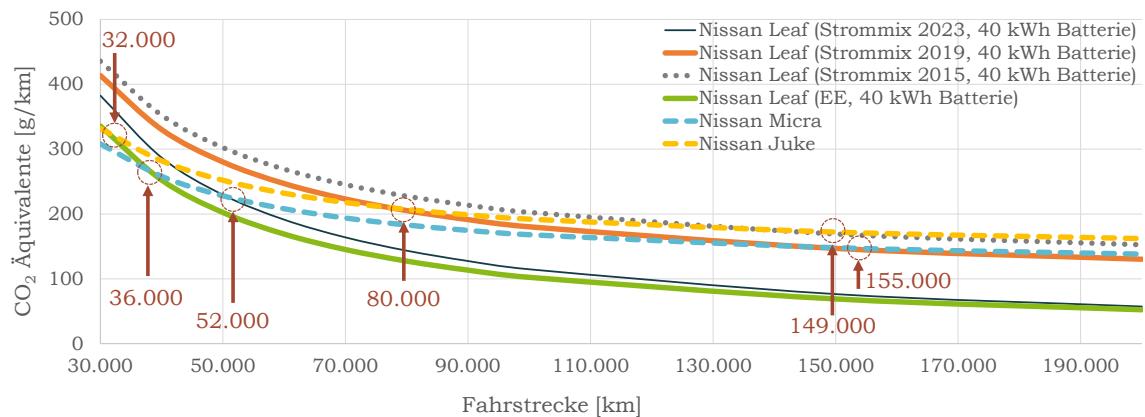
Abbildung 7.1: Prozesskette "Well-to-Wheel".

Im Gegensatz zu Kraftstoffen, die ausschließlich aus fossilen Ölquellen gewonnen werden können, besteht die Möglichkeit, Strom aus einer Vielzahl von Quellen (z. B. Wasser, Biomasse, Wind, Solar, Kohle, Gas, Kernkraft) zu beziehen. Insofern ist die Wahl des jeweils angewendeten Strommixes für EVs von essentieller Bedeutung für die Höhe der Fahrzeugemissionen.

Die Verwendung von Strom aus erneuerbaren Energiequellen ist eine grundlegende Voraussetzung für die tatsächliche Nachhaltigkeit der Elektromobilität. Das anspruchsvolle Ziel ist jedoch noch nicht erreicht. Im Jahr 2023 wurde die im Verkehrssektor genutzte Energie hauptsächlich aus nicht erneuerbaren Ressourcen gewonnen, wobei fossile Brennstoffe mit einem Anteil von 92,8 % und Gas mit einem Anteil von 0,9 % dominierten. Der Anteil erneuerbarer Ressourcen belief sich auf lediglich 6,3 % [271]. Dieses Verhältnis hat sich bis heute nicht wesentlich geändert. Der Anteil von Hybrid- und rein elektrischen Fahrzeugen an der Gesamtzahl der in Deutschland zugelassenen Fahrzeuge beträgt lediglich 3 % [204]. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Produktion von EVs mit einer hohen CO₂-Intensität einhergeht. Die Umweltbelastung durch CO₂-Emissionen ist bei der Produktion von EVs aufgrund der Art und Weise der Herstellung der Batterien um zwei Drittel höher als bei herkömmlichen Fahrzeugen [272]. Nach ihrer Produktion weisen EVs das Potenzial auf, nahezu emissionsfrei zu sein, sofern der Strom aus EE stammt. Eine Lebenszyklusanalyse zeigt jedoch, dass die Emissionen von EVs ohne Nutzung von EE mit denen herkömmlicher Fahrzeuge vergleichbar sind.

Die Abbildung 7.2 zeigt beispielhaft die Auswirkungen verschiedener Energiequellen auf die CO₂-Emissionen. Ein rein elektrisch betriebener Nissan Leaf mit zwei verschiedenen Energiequellen (deutscher Strommix: 2015, 2019, 2023; deutsche erneuerbare Energie: 2019) wird mit zwei konventionellen Nissan-Fahrzeugen (Nissan Juke und Nissan Micra) verglichen [273]. Die in Abbildung 7.2 dargestellten Fahrzeuge wurden ausgewählt, um einen einfachen Vergleich verschiedener Fahrzeuge eines Herstellers zu ermöglichen. Die Fahrzeuge sind in ihrer Größe und Ausstattung vergleichbar. Die Berechnungen basieren auf dem weltweit harmonisierten Testverfahren für Leichtfahrzeuge (WLTP) und [274]. Es wurde das Worst-Case-Szenario betrachtet, bei dem davon ausgegangen wird, dass die Produktion des Nissan Leaf insgesamt 10 t CO₂ verursacht (im Vergleich zu einem herkömmlichen Nissan-Fahrzeug mit 6 t CO₂). Die Batterieproduktion macht einen großen Teil des gesamten CO₂ aus und variiert je nach Kapazität der installierten Batterie.

Unter der Prämisse, dass der Nissan Leaf im Jahr 2023 mit dem deutschen Strommix betrieben wird, zeigt sich, dass die Klimabilanz des Nissan Leaf nach einer Fahrleistung von etwa 40.000 km besser ist als die des Nissan Juke und nach etwa 52.000 km besser als die des Nissan Micra. Bei einer jährlichen Fahrleistung von weniger als 5.000 km bietet der Kauf eines Nissan Leaf vor einem Fahrzeugalter von 10 Jahren keinen signifikanten Vorteil gegenüber dem Nissan Micra. Erst nach mehr als 10,4 Jahren wäre die Klimabilanz besser (siehe Tabelle 7.1). Andererseits würde sich die Anschaffung eines Nissan Leaf im Vergleich zum Nissan Juke bereits ab einer jährlichen Fahrleistung von 5.000 km lohnen. Folglich führt eine höhere jährliche Fahrleistung zu einer verbesserten CO₂-Bilanz. Der Unterschied wird noch deutlicher, wenn der Betrieb des Nissan Leaf mit EE erfolgt. Nach einer Fahrleis-


 Abbildung 7.2: CO₂-Fußabdruck verschiedener Nissan-Fahrzeugtypen.

tung von lediglich 32.000 km weist das Fahrzeug eine bessere Klimabilanz auf als ein konventioneller Nissan Juke, nach 36.000 km sogar eine bessere Klimabilanz als ein Nissan Micra. Die in Tabelle 7.2 dargestellte jährliche Durchschnittsfahrleistung der Bevölkerung in Deutschland dient der Verdeutlichung des prozentualen Anteils der Bevölkerung, für den sich der Kauf eines Nissan Leaf im Vergleich zu einem Nissan Juke oder Nissan Micra lohnen würde. Ein EV-Besitzer, der jährlich 20.000 km zurücklegt, hätte bereits nach 1,6 (Nissan Juke) bis 1,8 (Nissan Micra) Jahren eine besser Klimabilanz, wobei berücksichtigt wird, dass das Fahrzeug mit erneuerbarem Strom aufgeladen wird (siehe Tabelle 7.1).

Tabelle 7.1. Ökobilanz-Vergleich: Nissan Leaf vs. konventionelle Modelle nach Stromquelle und Fahrleistung.

Jährliche Fahrleistung [km]	Stommix 2023 Stommix 2019		Erneuerbare Energie	
	Nissan Micra [a]	Nissan Juke [a]	Nissan Micra [a]	Nissan Juke [a]
5.001 – 10.000	5,2 – 10,4 16,5 – 33	4 – 8 6,5 – 13	3,6 – 7,2	3,2 – 6,4
10.001 – 15.000	3,7 – 5,2 11 – 16,5	2,7 – 4 4,3 – 6,5	2,4 – 3,6	2,1 – 3,2
15.001 – 20.000	2,6 – 3,7 8,3 – 11	2 – 2,7 3,3 – 4,3	1,8 – 2,4	1,6 – 2,1

Tabelle 7.2. Prozentsatz der Bevölkerung nach jährlicher Fahrleistung für 2019 und 2021 (Datenquelle: [275]).

Jährliche Fahrleistung [km]	Bevölkerung [%]	
	2019	2021
0 - 5.000	12,97	14,61
5.001 - 10.000	29,06	27,72
10.001 - 15.000	29,53	27,60
15.001 - 20.000	15,06	14,91
>20.000	13,37	9,60

7.1.2 Entwicklung von Energiespeicherlösungen

Die Nutzung von Energiespeicherlösungen stellt eine wesentliche Strategie zur Unterstützung der Ladeinfrastruktur für EVs dar. Energiespeicher sind von entscheidender Bedeutung, um eine kontinuierliche Energieversorgung sicherzustellen und Schwankungen im Stromnetz auszugleichen, die durch die variable Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und den ungleichmäßigen Strombedarf von Ladeeinrichtungen entstehen.

Energiespeicherlösungen sind von entscheidender Bedeutung für die Stabilisierung der Stromversorgung von Ladeinfrastrukturen. Sie dienen der Speicherung von überschüssiger Energie und deren Freigabe bei Bedarf. Dies erlangt insbesondere Relevanz bei der Verwendung erneuerbarer Energiequellen wie Solar- oder Windenergie, welche durch ihre intermittierende Verfügbarkeit gekennzeichnet sind. Batteriespeicher, bspw. in Form von Lithium-Ionen-Batterien, können in Zeiten von Energieüberschuss (z. B. bei starkem Wind oder hoher Sonneneinstrahlung) geladen werden und Energie während der Spitzenzeiten oder bei geringer Erzeugung bereitstellen. Der Einsatz von Energiespeichern ermöglicht eine flexiblere Reaktion der Ladeinfrastruktur auf die jeweilige Nachfrage. Bei einer simultanen Ladung zahlreicher Fahrzeuge können Batteriespeicher eine zusätzliche Energiezufuhr bereitstellen, ohne dabei das Stromnetz zu überlasten. Bei WPT-Systemen, die in vielen Fällen eine kontinuierliche Energiezufuhr erfordern, können Energiespeicher eine wesentliche Pufferfunktion übernehmen. Die effiziente Nutzung des Stromnetzes kann durch den Einsatz von Energiespeichern gewährleistet werden. Diese federn die durch das gleichzeitige Laden vieler EVs entstehenden Lastspitzen ab und tragen somit zu einer Verringerung des Bedarfs an kostspieligen Netzausbaumaßnahmen bei. Zudem können Netzbetreiber durch die Integration von Speichern Kapazitätsengpässe vermeiden und die Stabilität des Netzes erhöhen.

Lithium-Ionen-Batterien stellen derzeit die am weitesten verbreitete Art von Speicher dar. Ihre hohe Energiedichte, lange Lebensdauer sowie schnelle Reaktionszeit machen sie zu einer bevorzugten Wahl für die stationäre Speicherung von Energie an Ladepunkten sowie für die mobile Speicherung in EVs.

7.1.3 Netzausbau und -integration

Die effektive Integration von EE in die Ladeinfrastruktur erfordert die Berücksichtigung mehrerer strategischer Ansätze. Es ist empfehlenswert, Ladeinfrastrukturen direkt an Quellen für EE anzuschließen. Dies könnte bspw. durch die Installation von Solarpaneelen auf Parkplätzen oder an Ladestationen erfolgen, sodass der erzeugte Strom unmittelbar für das Laden der Fahrzeuge genutzt werden kann. Um den Einsatz erneuerbarer Energiequellen zu optimieren, ist die Implementierung eines intelligenten Energie- und Lastmanagements unerlässlich. Die Systeme sind in der Lage, die Verfügbarkeit EE, den Energiebedarf von Ladestationen sowie die Netzbelaustung in Echtzeit zu überwachen und zu optimieren. Des Weiteren besteht die Möglichkeit der Kombination mit Energiespeichern, um überschüssige EE zu speichern und bei Bedarf freizugeben. Die Ladeinfrastruktur ist als integraler Bestandteil von Smart Grids zu betrachten, welche auf eine effiziente Nutzung von EE abzielen. Die Steuerung der Erzeugung, Speicherung und Verteilung von Energie erfolgt durch Smart Grids in Echtzeit, wodurch eine optimierte und flexible Nutzung erneuerbarer Energiequellen gewährleistet werden kann. Die Nutzung von V2G-Technologien erlaubt die Verwendung von EVs als mobile Energiespeicher. Diese können überschüssige Energie aus erneuerbaren Quellen aufnehmen und bei Bedarf wieder ins Netz einspeisen. Dies könnte insbesondere in Verbindung mit WPT-Systemen von Interesse sein, da das Laden und Entladen ohne physische Verbindung zum Netz erfolgen kann.

7.2 Strategische Weichenstellungen im Bereich Elektromobilität

Die Förderung der Elektromobilität stellt ein zentrales Anliegen zur Erreichung der Klimaziele sowie zur Reduzierung von Emissionen im Verkehrssektor dar. Zu den erforderlichen umfassenden strategischen Weichenstellungen gehören die Stimulation des Marktes für EVs, die Gewährleistung einer flächendeckenden und effizienten Ladeinfrastruktur sowie die Förderung von Innovationen im Bereich der Ladetechnologien, insbesondere WPT-Systeme.

7.2.1 Förderung und Anreize für Elektrofahrzeuge

Um den Kauf und die Nutzung von EVs zu fördern, bieten Regierungen und politische Entscheidungsträger finanzielle Anreize. Die Förderung des Marktes für EVs erfolgt u. a. durch die Gewährung von Steuernachlässen, Prämien (bspw. Umweltbonus) oder direkten Subventionen beim Kauf dieser Fahrzeuge [276,277]. Die finanziellen Erleichterungen zielen darauf ab, die Anschaffungskosten für Verbraucher sowie Unternehmen zu reduzieren und die Attraktivität von EVs im Vergleich zu Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren zu erhöhen. Neben den Anreizen für Fahrzeuge werden seitens einiger Regierungen zudem Förderprogramme für die Installation von Ladeinfrastrukturen in Privathaushalten, Unternehmen sowie öffentlichen Räumen bereitgestellt.

Neben monetären Anreizen stellen Regierungen auch diverse nicht-monetäre Vorteile bereit, um die Attraktivität der Nutzung von EVs zu erhöhen [278, 279]. Zu den Privilegien, welche EV-Nutzern in einigen Städten und Kommunen eingeräumt werden, zählen u. a. die Nutzung spezieller Fahrspuren, ermäßigte oder kostenlose Parkplätze, sowie eine Befreiung von Zufahrtsbeschränkungen in städtischen Gebieten. Diese Privilegien sind darauf ausgerichtet, die Attraktivität der Nutzung von Elektromobilität zu fördern. Im Hinblick auf die Vorbildfunktion von Regierungen sowie öffentlichen Einrichtungen lässt sich eine Zunahme der Nutzung von EVs in deren Flotten beobachten. Dies dient nicht zuletzt der Stimulierung des Marktes für EVs selbst.

Des Weiteren ist die Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsinitiativen für innovative Ladesysteme, einschließlich WPT-Systeme, ein wichtiger Fokus. Die Förderung dieser Initiativen zielt darauf ab, die Verfügbarkeit, Effizienz und Kosteneffizienz solcher Technologien zu erhöhen. Dies soll durch Forschungsförderung, die Förderung von Partnerschaften zwischen Universitäten und der Industrie sowie die Förderung von Innovationsnetzwerken erreicht werden.

7.2.2 Ausbau der Ladeinfrastruktur

Die Schaffung einer umfassenden Ladeinfrastruktur, die sowohl kabelgebundene als auch zukünftig induktive Lademethoden berücksichtigt, ist ein wesentlicher Aspekt bei der Gestaltung zukunftsweisender Mobilität [262, 280, 281]. Um eine signifikante Steigerung der Akzeptanz und Nutzung von EVs zu erreichen, ist es erforderlich, Ladeinfrastrukturen zu etablieren, welche den Kriterien genügen.

Die Installation von Ladestationen in städtischen, suburbanen und ländlichen Gebieten zielt darauf ab, die Ladeinfrastruktur für alle Bevölkerungsgruppen gleichermaßen zugänglich zu machen. Die Bildung öffentlich-privater Partnerschaften, bspw.

zwischen Gemeinden und Energieunternehmen, ist von entscheidender Bedeutung, um die finanziellen Lasten zu teilen und Investitionen zu beschleunigen.

Die Förderung von Schnellladesystemen und -technologien, welche das Laden von EVs in kurzer Zeit ermöglichen, sowie die Weiterentwicklung von WPT-Systemen, die eine bequeme und flexible Nutzung insbesondere in hochfrequentierten städtischen Bereichen oder an Verkehrsknotenpunkten wie Flughäfen und Bahnhöfen erlauben, stellen dabei zentrale Elemente dar.

Die Politik ist dazu aufgerufen, Maßnahmen zur Standardisierung und Interoperabilität der Ladesysteme zu fördern. Dadurch kann die Kompatibilität zwischen verschiedenen Fahrzeugen, Ladeanbietern und Netzwerken gewährleistet werden. Dies gilt ebenfalls für WPT-Systeme. Das Ziel besteht in der Schaffung einheitlicher technischer Standards für die induktive Ladetechnologie. Dadurch soll die Interoperabilität zwischen den verschiedenen Herstellern und Anbietern gewährleistet werden. Die Einführung von einfachen und einheitlichen Abrechnungssystemen für die Nutzung von Ladeinfrastruktur ist erforderlich, um eine problemlose Bezahlung für die Nutzer zu gewährleisten, unabhängig davon, welcher Anbieter die Ladeinfrastruktur bereitstellt (siehe Kapitel 5.5).

7.2.3 Forschung und Entwicklung für induktive Ladetechnologie

Die Forschung und Entwicklung im Bereich der WPT-Systeme spielt eine zentrale Rolle, um die Effizienz und Akzeptanz dieser Technologie weiter zu steigern. Die derzeitigen Forschungsinitiativen konzentrieren sich auf mehrere Schlüsselbereiche. Ein Schwerpunkt liegt auf der Steigerung der Energieeffizienz. Hier wird daran gearbeitet, Energieverluste während der induktiven Übertragung zu minimieren und die Ladezeiten zu verkürzen, um den Ladevorgang effizienter zu gestalten. Ein weiterer Fokus ist die Erhöhung der Sicherheit. Dazu zählt die Entwicklung von Sicherheitsstandards und Technologien, die potenzielle Gesundheitsrisiken, wie die Exposition gegenüber EMF, verringern und die Betriebssicherheit der Ladesysteme gewährleisten [81, 82]. Schließlich wird auch die Zuverlässigkeit und Langlebigkeit der Systeme optimiert. Durch den Einsatz robuster Materialien und intelligenter Steuerungssysteme soll sichergestellt werden, dass die Ladestationen auch unter unterschiedlichen Umweltbedingungen zuverlässig und langlebig bleiben [95–97].

Die strategische Investition in Pilotprojekte und Tests zur Implementierung und Validierung induktiver Ladetechnologien unter realen Bedingungen ist eine wichtige Maßnahme. Die Effektivität, Usability und die Akzeptanz von WPT-Systemen werden anhand von Tests in statischen Umgebungen wie Parkplätzen, Garagen oder

dedizierten Ladezonen evaluiert. Dynamisches Laden, wie etwa das induktive Laden während der Fahrt auf bestimmten Straßenabschnitten oder in städtischen Gebieten, wird in Pilotprojekten erforscht. Dabei werden sowohl die technische Realisierbarkeit als auch die potenziellen Vorteile aus wirtschaftlicher und infrastruktureller Sicht untersucht [81, 82, 109, 112].

7.2.4 Langfristige strategische Planung und Marktentwicklung

Die Förderung von WPT-Systeme erfordert eine langfristig orientierte, strategische Planung durch die Politik. Der Schwerpunkt liegt auf der Erstellung von Entwicklungsplänen für die Ladeinfrastruktur, wobei sowohl kurzfristige als auch langfristige Ziele berücksichtigt werden. Bei der Erstellung der Entwicklungspläne ist darauf zu achten, dass verschiedene Ladearten berücksichtigt werden, d. h. sowohl kabelgebundenes als auch induktives Laden. Zudem ist eine Anpassung der Infrastruktur erforderlich, um der jeweiligen Nachfrage sowie technologischen Entwicklungen Rechnung zu tragen. Die Einbindung privater Investoren kann durch öffentliche Ausschreibungen erfolgen. Zudem können finanzielle Anreize wie Steuererleichterungen, Subventionen und Zuschüsse für die Errichtung und den Betrieb von Ladeinfrastrukturen bereitgestellt werden.

Es ist empfehlenswert, politische Strategien so zu gestalten, dass das Bewusstsein und die Akzeptanz der Öffentlichkeit für die Elektromobilität und neue Ladesysteme erhöht werden. Die Durchführung von Informationskampagnen stellt ein geeignetes Instrument dar, um die Öffentlichkeit über die Vorteile der Elektromobilität sowie die Möglichkeiten neuer Ladesysteme, wie bspw. die induktive Ladetechnologie, zu informieren. Die Einführung spezifischer Anreize oder Sonderregelungen, welche die Nutzung neuer Ladearten fördern, wird empfohlen. Dies kann bspw. durch Preisnachlässe oder vergünstigte Tarife für deren Nutzung erfolgen.

7.3 Strategische Weichenstellungen im Bereich Politik

Die Förderung der Elektromobilität sowie die Entwicklung einer zukunftsfähigen Ladeinfrastruktur sind wesentliche politische Aufgabenfelder. Um den Übergang zu nachhaltigen Mobilitätslösungen zu beschleunigen, sind strategische Weichenstellungen erforderlich, die regulatorische Maßnahmen, nationale und europäische Strategien als auch die Förderung von Kooperationen zwischen öffentlichen und privaten Akteuren umfassen.

7.3.1 Regulierungsrahmen und Normen

Die Einführung und fortlaufende Anpassung von Regulierungen und technischen Standards für Ladeinfrastrukturen, einschließlich WPT-Systeme, sind entscheidende politische Maßnahmen, um Sicherheit, Effizienz und Umweltfreundlichkeit dieser Systeme zu gewährleisten. Ein wichtiger Bestandteil dabei sind Sicherheitsstandards, die die Sicherheit der Nutzer und der Infrastruktur selbst sicherstellen. Besonders relevant sind hier Normen, die den Strahlungsschutz und den Schutz vor EMF bei WPT-Systemen betreffen (siehe Tabellen C.3 und C.4). Ein weiteres Ziel ist die Interoperabilität von Ladetechnologien [55]. Durch Standards, die eine Kompatibilität verschiedener EVs mit Ladesäulen unterschiedlicher Hersteller sicherstellen, wird die Nutzerfreundlichkeit erhöht und der Zugang zur Ladeinfrastruktur weltweit erleichtert. Dies fördert die Akzeptanz und den komfortablen Einsatz von EVs. Schließlich spielen auch Umweltvorgaben eine zentrale Rolle. Durch Normen, die Umweltstandards bei der Produktion, Installation und dem Betrieb von Ladesystemen festlegen, wird eine nachhaltige Entwicklung gefördert [227]. Hierzu zählen Maßnahmen zur Reduzierung des Materialverbrauchs sowie zur Förderung recyclingfähiger Komponenten, die die Umweltbelastung minimieren und die Ressourcenschonung unterstützen [282].

Um die Integration von Ladeinfrastrukturen zu erleichtern, ist eine Anpassung der Bauvorschriften und Stadtplanungsrichtlinien erforderlich. Die Einführung von vereinfachten und beschleunigten Genehmigungsverfahren zielt darauf ab, die Installation von Ladeinfrastrukturen an öffentlich zugänglichen Orten wie Parkplätzen sowie an und in Gebäuden zu erleichtern und somit den Ausbau der Ladeinfrastrukturen zu beschleunigen (siehe Kapitel 5.6). Die Einbindung von Ladeinfrastrukturen als integraler Bestandteil in die Stadtentwicklungspläne ist von essentieller Bedeutung, um sicherzustellen, dass neue Wohngebiete, Gewerbegebiete und städtische Räume mit adäquater Ladeinfrastruktur ausgestattet sind. Die Einführung von Richtlinien zur

Bereitstellung einer ausreichenden Anzahl an öffentlichen Ladeplätzen, einschließlich der Möglichkeit des induktiven Ladens, ist ein wesentlicher Bestandteil der Planung in stark frequentierten städtischen Gebieten und an wichtigen Verkehrsknotenpunkten [200].

7.3.2 Nationale und europäische Strategien

Es obliegt der Politik, Strategien und Zielvorgaben für den Ausbau der Elektromobilität und der Ladeinfrastruktur zu entwickeln. U. a. stellen detaillierte Roadmaps ein wesentliches Instrument zur zeitlichen und geografischen Koordination des Ausbaus der Ladeinfrastruktur dar. Diese Pläne sollten spezifische Ziele für die Anzahl und Verteilung von Ladestationen (inkl. WPT-Systeme) bis zu einem bestimmten Zeitpunkt beinhalten [200–202]. Die Bereitstellung finanzieller Mittel durch nationale und europäische Förderprogramme bilden eine weitere wesentliche Säule zur Unterstützung des Ausbaus der Ladeinfrastruktur [202, 203]. Zu den Maßnahmen zählen die Gewährung von Subventionen für die Errichtung von Ladestationen, die Bereitstellung von finanziellen Anreizen für Forschung und Entwicklung im Bereich der WPT-Systeme sowie die Gewährung steuerlicher Erleichterungen für Investoren und Betreiber. Die Entwicklung von Richtlinien, welche die Integration von Ladeinfrastrukturen in das Stromnetz erleichtern, stellt ein wesentliches Element zur Förderung der Marktdurchdringung von EVs dar. Dabei ist die Einführung von Smart-Grid-Technologien, dynamischer Preisgestaltung sowie Anreizen für die Nutzung von V2G-Technologien von besonderer Relevanz [281, 283].

Um technologische Fortschritte zu ermöglichen und den Markt für induktive Lade-technologien zu fördern, sind gezielte politische Maßnahmen unerlässlich. Ein we-sentlicher Bereich ist die Forschungsförderung. Durch die Bereitstellung von finan-ziellen Mitteln für Universitäten, Forschungseinrichtungen und Unternehmen wird die Entwicklungen von Innovationen in der Batterietechnologie, im Energiemanagement und in der Ladetechnologie unterstützt. Ebenso wichtig sind Innovationsnetzwerke und Cluster, in denen Forschungseinrichtungen, Unternehmen und staatliche Stellen kooperieren und Wissen austauschen [284]. Diese Netzwerke bilden eine Grundlage für den kontinuierlichen Wissensfluss und die gemeinsame Entwicklung neuer Tech-nologien und sind ein zentrales Instrument der Innovationspolitik. Schließlich tragen Pilotprojekte und Testfelder entscheidend dazu bei, WPT-Systeme unter realen Be-dingungen zu erproben [81, 82, 109, 112]. Sie bieten die Möglichkeit, Effizienz, Sicher-heit und Benutzerfreundlichkeit dieser Technologien zu prüfen und somit wertvolle Erkenntnisse für ihre breite Einführung zu gewinnen.

7.3.3 Förderung öffentlicher und privater Kooperationen

Die Realisierung einer effektiven Ladeinfrastruktur erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen verschiedenen öffentlichen und privaten Akteurinnen und Akteuren. Diese interorganisationale Kooperation zielt darauf ab, Investitionen effizient zu koordinieren, Fachwissen zu bündeln und die Umsetzung von Projekten zu beschleunigen. Ein zentrales Instrument in diesem Prozess sind öffentlich-private Partnerschaften. Durch gezielte Anreize wird die Zusammenarbeit zwischen Städten, Gemeinden und öffentlichen Verkehrsbehörden mit privaten Unternehmen gefördert [280]. Energieversorger, Automobilhersteller und Technologieanbieter arbeiten hierbei Hand in Hand, um gemeinsam die Ladeinfrastruktur für EVs aufzubauen und zu betreiben. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Entwicklung gemeinsamer Geschäftsmodelle. Innovative Modelle, die auf Kooperation und Kostenteilung basieren, bieten vielfältige Möglichkeiten. Dazu zählen bspw. die gemeinsame Nutzung von Infrastruktur, die Implementierung integrierter Abrechnungssysteme oder Sharing-Modelle für Ladepunkte. Diese Ansätze tragen dazu bei, den Zugang zur Ladeinfrastruktur zu erleichtern und die Elektromobilität insgesamt zu fördern.

Es liegt in der politischen Verantwortung, Maßnahmen zur Intensivierung der Zusammenarbeit zwischen Forschungsinstitutionen und der Industrie zu initiieren, um technologische Innovationen voranzutreiben und die Marktreife neuer Lösungen schneller zu erreichen. Ein zentraler Ansatzpunkt ist die Förderung von Technologietransfer und Wissensaustausch. Durch gezielte Programme und Initiativen wird der Austausch zwischen akademischen Einrichtungen und der Industrie unterstützt. Dies kann beispielsweise durch gemeinsame Forschungsprojekte, die Vergabe von Stipendien oder die Organisation von Workshops realisiert werden, um das Innovationspotenzial beider Seiten optimal zu nutzen [284]. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist der Zugang zu Daten und Infrastruktur [205]. Die Bereitstellung von öffentlichen Daten und Infrastrukturen für Forschungseinrichtungen und Start-ups erleichtert die Entwicklung und Erprobung neuer Technologien erheblich. So wird der Zugang zu wertvollen Ressourcen ermöglicht, die für die Umsetzung neuer Ideen und die Weiterentwicklung innovativer Ansätze unerlässlich sind.

7.3.4 Schaffung eines unterstützenden politischen Umfeldes

Der Erfolg der Elektromobilität sowie der induktiven Ladetechnologie ist maßgeblich von einer konsistenten und langfristig orientierten politischen Strategie abhängig. Es obliegt der Politik, langfristige Ziele zu definieren und stabile Rahmenbedingungen zu etablieren, welche Investitionen und Innovationen fördern. Die Förderung der

öffentlichen Wahrnehmung der Vorteile der Elektromobilität und innovativer Lade-technologien sollte eine Priorität für politische Entscheidungsträger sein. Diesbezüg-lich sind Informationskampagnen, die Bereitstellung öffentlicher Demonstrationspro-jekte sowie die Förderung des Dialogs zwischen verschiedenen Interessengruppen als Maßnahmen zu nennen.

7.4 Entwicklung der sozialen Akzeptanz

EVs bergen ein beträchtliches Potenzial für eine nachhaltigere Mobilität, sehen sich jedoch mit einer Reihe technischer Herausforderungen konfrontiert, welche die Marktdurchdringung derzeit noch einschränken. Zu den zentralen Barrieren zäh-len die hohen Kosten für die Energiespeicher, welche den Fahrzeugpreis erhöhen, sowie die sogenannte Reichweitenangst, welche Zweifel an der Alltagstauglichkeit weckt. Des Weiteren stellt die im Vergleich zu konventionellen Fahrzeugen längere Ladedauer eine Herausforderung dar, die den Komfort beeinträchtigen kann. Als weitere Barriere kann die Unsicherheit bezüglich der Sicherheit von Lithium-Ionen (Li-Ion)-Batterien identifiziert werden, welche die Akzeptanz der Technologie wei-ter schmälert. Im Folgenden werden die genannten Herausforderungen sowie deren Einfluss auf die Akzeptanz von EVs näher beleuchtet.

7.4.1 Energiespeicherkosten

Die These, dass EVs vor einigen Jahren deutlich kostspieliger waren als konventionel-le Fahrzeuge, kann nicht länger als allgemeingültig betrachtet werden. Im Rahmen einer Kostenvergleichsanalyse aus dem Jahr 2024 konnte festgestellt werden, dass sich die Anschaffungspreise der beiden Fahrzeugtypen angenähert haben. In Abhän-gigkeit vom jeweiligen Hersteller und Fahrzeugmodell kann ein EV sogar kosten-günstiger sein [285]. Die Energiespeichersysteme setzen sich aus einer Vielzahl von einzelnen Li-Ion-Batteriepacks zusammen. Der Preis pro Paket lag im Jahr 2013 bei etwa 780 \$. In der Zwischenzeit ist ein Rückgang des Preises um 82,2 % bis 2023 zu verzeichnen [286], wobei die Prognosen für die Zukunft vielversprechend sind. Es ist zu erwarten, dass der Preis pro Paket weiter sinken wird, da die Länder da-zu verpflichtet sind, den Anteil an EVs auf den Straßen zu erhöhen. Die steigende Nachfrage nach EVs führt zu einer erhöhten Nachfrage nach Batterien, was wieder-um zu einer Verringerung der Kosten für Energiespeicher führt [287]. Die Forschung in diesem Bereich zielt darauf ab, verschiedene Eigenschaften von Batterien zu optimieren, darunter die Größe, die chemische Zusammensetzung, die Qualität und das

Format der Zellen. Diese Faktoren beeinflussen die Kosten des gesamten Batteriepakets (siehe Abschnitt 7.4.3). Die nachfolgende Abbildung 7.3 veranschaulicht die Entwicklung der Kosten für Batteriepakete seit dem Jahr 2013.

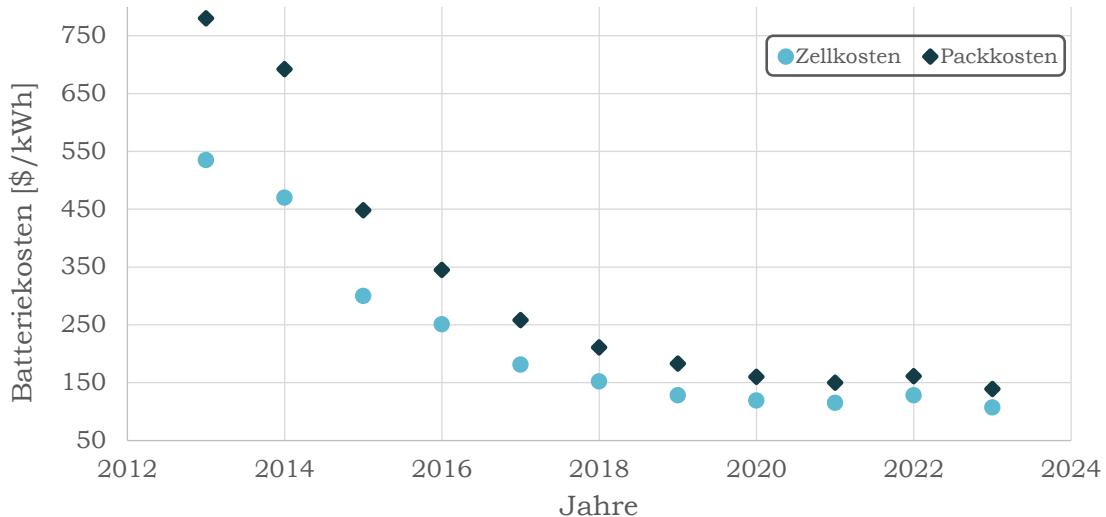


Abbildung 7.3: Kostenentwicklung von Li-Ion-Batteriepacks und -zellen für EVs (von 2013 bis 2023) (Datenquelle: [286]).

Bei Betrachtung der WtW-Analyse, welche die gesamte Prozesskette von der Bereitstellung der Antriebsenergie (Strom, Benzin, Diesel) bis zur Umwandlung in kinetische Energie umfasst (siehe Kapitel 7.1.1), wird ersichtlich, dass EVs auf Autobahnen (über 100 km/h) mit konventionellen Fahrzeugen vergleichbar sind. Im städtischen Verkehr (bis 30 km/h) sowie auf Überlandstrecken (bis 80 km/h) werden der Verbrauch und die Emissionen um mehr als die Hälfte reduziert [288]. Die Ergebnisse von [288] zeigen darüber hinaus, dass EVs im Vergleich zu herkömmlichen Verbrennungsfahrzeugen eine hohe Effizienz aufweisen. Der durchschnittliche Energieverbrauch von EVs beträgt lediglich 0,47 MJ/km, während herkömmliche Fahrzeuge einen Verbrauch von 2,46 MJ/km an Kraftstoff aufweisen. Zudem wird bei der Produktion, dem Transport, der Umwandlung und der Verteilung von Strom, welcher für den Betrieb von EVs erforderlich ist, lediglich eine geringe Menge an nicht erneuerbaren Primärenergien verbraucht, während die Erzeugung von Treibhausgasemissionen minimiert wird. Der Verbrauch an nicht erneuerbaren Primärenergien und die Erzeugung von Treibhausgasemissionen sind bei EVs während der Produktion, des Transports, der Umwandlung und der Verteilung von Strom jedoch dennoch von Bedeutung. So werden bspw. beim Laden eines EVs mit einem Ladegerät (3 kW bis 50 kW) 0,26 MJ/km bis 0,28 MJ/km verbraucht, während ein Benzin- oder Dieselmotor beim Tanken 0,86 MJ/km benötigt.

Dennoch ist die Entwicklung einer angemessenen Ladeinfrastruktur erforderlich, um

EVs zu einer tatsächlich praktikablen Option für den häufigen Gebrauch zu machen. Daher basiert die Verbreitung und Nachhaltigkeit von EVs nicht auf einer weiteren Verbesserung des Fahrzeugs selbst (derzeit ist dieses Problem lediglich mit Kosten verbunden), sondern auf der Entwicklung geeigneter Infrastrukturen, der Effizienz und Nutzung von EE bei der Stromerzeugung.

7.4.2 Sicherheitsrisiken bei Bränden von Elektrofahrzeugen

Die Energiespeicher in EVs bergen im Falle eines Verkehrsunfalls ein bislang ungelöstes Gefahrenpotenzial [289]. Eine Batterie setzt sich aus vielen einzelnen Zellen zusammen. Eine Beschädigung einer einzigen Zelle kann eine Kettenreaktion von elektrischen Kurzschlüssen zur Folge haben, was zu einer Überhitzung führt. In der Konsequenz würde ein durch den Unfall verursachter Brand kontinuierlich wieder entfacht werden, ein Phänomen, das als thermisches Durchgehen bezeichnet wird [290]. Die Lösung eines derartigen Feuers könnte sich über einen Zeitraum von mehreren Stunden erstrecken und den Einsatz von mehreren tausend Litern Wasser vonnöten machen. Des Weiteren wäre die Verwendung einer Wärmebildkamera oder eines Rauchmelders erforderlich, um eine vollständige Lösung des Feuers zu überprüfen [291]. Ein durch ein EV verursachtes Feuer ist nicht per se als gefährlicher einzustufen als ein Feuer in einem herkömmlichen Fahrzeug. Eine andersartige Behandlung ist lediglich aufgrund der involvierten chemischen Reaktionen notwendig. Während der ersten 24 h ist nach dem Brand besondere Vorsicht geboten, da eine erneute Entzündung der Zellen jederzeit möglich ist. Die zusätzliche Vorsichtsmaßnahme impliziert, dass Wracks von EVs separat gelagert werden müssen [292].

7.4.3 Reichweite aktueller Elektrofahrzeuge

Der Wechsel von konventionellen Fahrzeugen zu EVs ist mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden, die es zu überwinden gilt. Dazu zählen bspw. die Anschaffungskosten, die Ladeinfrastruktur und die Ladezeit. Ein weiteres vielzitiertes Hindernis für die Verbreitung der Elektromobilität ist die Reichweite aktueller EVs. Diese These wird durch die Studie [293] bestätigt, in der aufgezeigt wird, dass die Reichweite von EVs eine der wesentlichen Barrieren für deren Marktdurchdringung darstellt. So wird in der Studie [293] ersichtlich, dass für 35 % der Befragten in Deutschland die Reichweite ein Hindernis beim Kauf eines EVs darstellt. Allerdings ist die Reichweite heutiger EVs deutlich größer als die von EVs, die vor einigen Jahren auf dem Markt erhältlich waren. Des Weiteren kommt die im Jahr 2016 veröffentlichte Studie [294] zu dem Schluss, dass die durchschnittliche tägliche Fahrstrecke

amerikanischer Bürger im Jahr 2016 50,7 km betrug (blaue Linie in Abbildung 7.4). In Deutschland betrug die durchschnittliche tägliche Fahrstrecke im Jahr 2017 46 km (schwarze Linie in Abbildung 7.4) Eine weitere Erkenntnis der Studie [295] ist, dass Vollzeitbeschäftigte im Durchschnitt täglich eine Distanz von 65 km zurücklegten. Die durchschnittliche Fahrstrecke bei Wochenendausflügen betrug 52 km pro Tag. Des Weiteren werden in der Studie [295] Unterschiede zwischen ländlichen und städtischen Gebieten aufgezeigt. Im Jahr 2017 wurden von deutschen Staatsbürgern, die in ländlichen Gebieten lebten, durchschnittliche Fahrstrecken von 52 km und von Menschen, die in städtischen Gebieten lebten, von durchschnittlich 42 km zurückgelegt [295]. Die in [295] genannten Durchschnittswerte für die täglichen Fahrstrecken stehen in starkem Kontrast zu den Ergebnissen der [293]. Letztere zeigt, dass moderne EVs von ihren Nutzern mitunter als nicht ausreichend wahrgenommen werden. Dieser Widerspruch muss weiter untersucht werden.

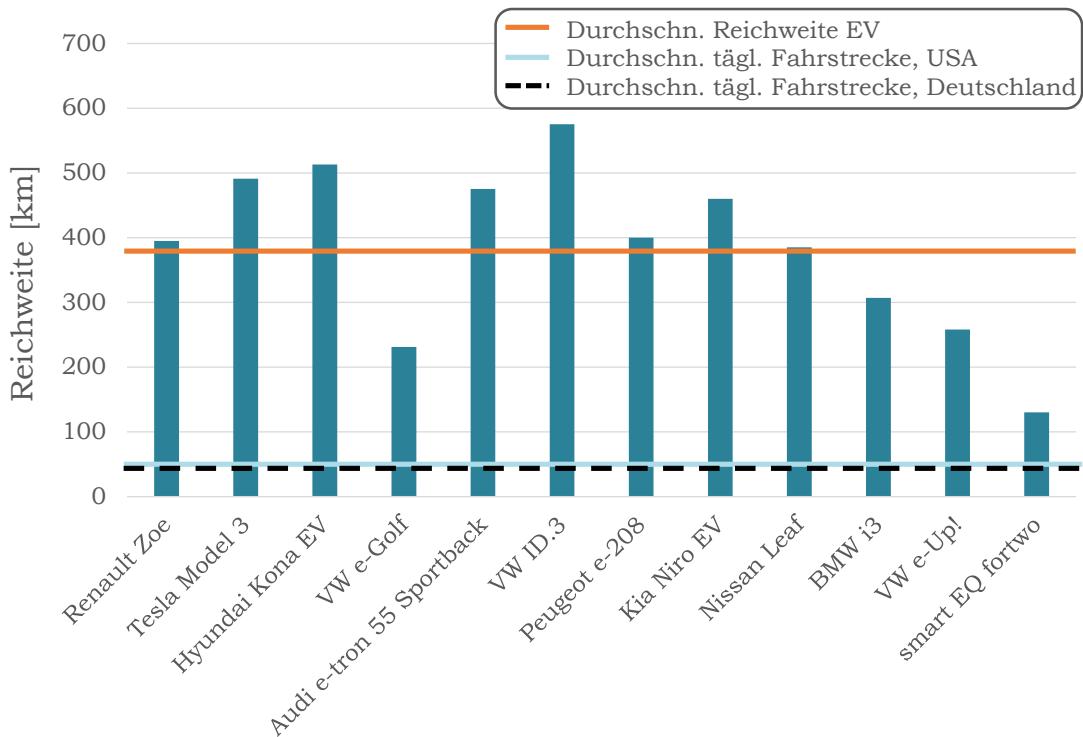


Abbildung 7.4: Reichweite aktueller EVs im Vergleich zur durchschnittlichen Tagesreichweite amerikanischer und deutscher Autofahrer.

Die Abbildung 7.4 veranschaulicht die signifikante Steigerung der Reichweite von EVs in den vergangenen Jahren. Im Jahr 2014 wies die Mehrheit der kleinen EVs eine Reichweite von weniger als 150 km auf [296]. Im Vergleich zu den Daten aus dem Jahr 2014 ist für die gleiche Fahrzeugklasse im Jahr 2019 eine durchschnittliche Reichweite

von 220 km zu verzeichnen [296]. Dies impliziert eine Steigerung der Reichweite um etwa 46,67 % innerhalb eines Zeitraums von fünf Jahren.

Die Autoren der Studie [297] führten eine eigenständige Datenanalyse durch, um weitere Belege für den dargestellten Trend zu erbringen. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurden Daten zu zwölf derzeit auf dem Markt verfügbaren EVs analysiert. Die Auswahl der EVs erfolgte auf Basis ihres Verkaufsvolumen in Europa im Zeitraum von Januar bis November 2020 (siehe Tabelle 7.3). In Bezugnahme auf die von [298] für den Zeitraum von Januar bis November 2020 veröffentlichten Zahlen (BEV: 338.918, PHEV: 346.112) lässt sich konstatieren, dass das gesamte Verkaufsvolumen aller Neuzulassungen in der EU im selben Zeitraum 11,96 Millionen Fahrzeugen lag [299]. Des Weiteren wurden im Jahr 2020 in Deutschland 194.163 EVs und insgesamt 2,2 Millionen Pkw mit Verbrennungsmotor registriert [300]. Folglich stellen EVs nach wie vor einen geringen Anteil an den gesamten Fahrzeugzulassungen in der EU und Deutschland dar.

Tabelle 7.3. EV-Modelle zur Analyse der Reichweite (Datenquelle: [270, 297]).

Fahrzeugmodell	Verkaufsvolumen	Batteriekapazität [kWh]
Renault Zoe	83.356	41
Tesla Model 3	63.086	55
Hyundai Kona EV	37.202	64
VW e-Golf	31.326	35,8
Audi e-tron 55 Sportback quattro	30.181	86,5
VW ID.3	28.839	62
Peugeot 208 EV	28.137	50
Kia Niro EV	27.049	64
Nissan Leaf	26.366	40
BMW i3	20.647	42,2
VW e-Up!	18.176	36,8
smart EQ fortwo	16.226	17,6

Aufgrund der in den vergangenen Jahren zu verzeichnenden Zunahme an Modellvarianten von EVs ist zu erwarten, dass künftige Veröffentlichungen eine größere Anzahl von EVs berücksichtigen werden. Die ausgewählten EVs weisen eine Reichweite zwischen 130 km (Smart EQ fortwo) und 575 km (VW ID.3) gemäß WLTP auf (vgl. Abbildung 7.4). Die durchschnittliche Reichweite der EVs beträgt 385 km (orangefarbene Linie in Abbildung 7.4), was deutlich über der in [296] dargestellten

Reichweite von 220 km liegt. Letztere beruht auf den größeren Batteriekapazitäten moderner EVs (siehe Tabelle 7.3).

Einer der Haupttreiber dieser positiven Entwicklung ist die zunehmende Energiedichte von Li-Ion-Batterien. Die Batterietechnologie hat einen erheblichen Einfluss auf die Reichweite von EVs. Einerseits ermöglicht mehr gespeicherte Energie bei gleichem Batteriegewicht längere Fahrstrecken und andererseits ermöglicht eine höhere Energiedichte geringere Batterie- und Fahrzeuggewichte [301]. Dies kann den Energieverbrauch durch ein geringeres Fahrzeuggewicht reduzieren, was auf seinen Einfluss auf die verschiedenen Fahrwiderstände zurückzuführen ist [302]. Eine höhere Energiedichte bedeutet eine größere Reichweite bei gleichem Batteriegewicht. Im Jahr 2018 lag die volumetrische Energiedichte von Li-Ion-Batterien zwischen 200 Wh L^{-1} bis 300 Wh L^{-1} [303] und auf Zellebene zwischen 400 Wh L^{-1} bis 450 Wh L^{-1} [304]. Die Autoren von [304] prognostizieren eine Energiedichte von 650 Wh L^{-1} bis 700 Wh L^{-1} für 2023 durch Verbesserungen im Produktionsprozess und den verwendeten chemischen Materialien.

Zusätzlich liegt die gravimetrische Energiedichte moderner Li-Ion-Batterien im Bereich von 90 Wh kg^{-1} bis 250 Wh kg^{-1} [305]. Tesla verwendet bspw. Lithium-Nickel-Cobalt-Aluminium-Oxid-Batterien (NCA) [305], die im Vergleich zu anderen Li-Ion-Batterien (z. B. Lithium-Mangan-Oxid: 100 Wh kg^{-1} bis 140 Wh kg^{-1}) eine höhere gravimetrische Energiedichte haben (200 Wh kg^{-1} bis 250 Wh kg^{-1}) [305, 306].

Festkörperbatterien sind eine vielversprechende Technologie für eine Verbesserung der Energiedichte und Reichweite. Diese Technologie hat das Potenzial, die Energiedichte um bis zu 40 % [307] und 70 % [308] im Vergleich zu den aktuellen Li-Ion-Batterien zu erhöhen. Weitere Vorteile von Festkörperbatterien sind die reduzierte Entflammbarkeit und eine längere Lebensdauer im Vergleich zu Batterien mit flüssigem Elektrolyt [308].

Der Preis für Li-Ion-Batteriepakete zeigt ebenfalls eine positive Entwicklung. Im Jahr 2018 lag er unter $200 \text{ \$/kWh}$ und Bloomberg prognostiziert einen Preis von $94 \text{ \$/kWh}$ für 2024 und $62 \text{ \$/kWh}$ für 2030 [309]. Somit können sinkende Kosten und steigende Energiedichten zu einer größeren Reichweite zukünftiger EVs führen. Die Abbildung 7.3 zeigt auch die Preisentwicklung der Batteriepakete.

Trotz aller Fakten, die jegliche Bedenken in dieser Hinsicht zerstreuen sollten, existiert das psychologische Phänomen der „Reichweitenangst“ weiterhin [310–312]. Dies ist überraschend angesichts der Reichweite moderner EVs und des tatsächlichen Mobilitätsverhaltens potenzieller Nutzer von EVs, wie in Abbildung 7.4 zu sehen ist. Darüber hinaus wird die Theorie der Reichweitenangst vorgestellt, um zu klären, ob diese Kaufbarriere gerechtfertigt ist oder nicht.

Reichweitenangst ist kein neues Phänomen. Bereits im Jahr 2011 präsentierten die

Autoren von [313] eine Analyse der Reichweitenangst, die durch die begrenzte Reichweite von EVs verursacht wird. Zu dieser Zeit waren weltweit nur 14.590 EVs im Einsatz [296], und ihre Reichweite war im Vergleich zu heutigen EVs deutlich kürzer. Dies kann das Vorhandensein und die Verbreitung der Reichweitenangst erklären. Bspw. konnte der Mitsubishi i-MiEV von 2012 unter idealen Bedingungen etwa 155 km fahren [314]. Somit war der Unterschied zwischen der Reichweite von EVs und der Reichweite von konventionellen Fahrzeugen bemerkbar. In den letzten Jahren ist der Anteil der EVs auf den Straßen schnell gewachsen und im Jahr 2018 wurde weltweit die Schwelle von fünf Millionen batterieelektrischen Fahrzeugen und Plug-in-Hybriden überschritten [296]. Die durchschnittliche Reichweite der analysierten aktuellen Fahrzeuge beträgt 343,67 km, wie bereits erwähnt. Darüber hinaus zeigt Tabelle 7.4, dass die Reichweite eines EVs u. a. mit den Anschaffungskosten korreliert.

Tabelle 7.4. Korrelation zwischen Kaufpreis und Reichweite.

Kategorie	Preisspanne [€]	Durchschnittliche Reichweite [km]
1	20.000 - 29.999	245
2	30.000 - 39.999	374
3	>40.000	438

Z. B. hat der Audi e-tron 55 Sportback eine Reichweite von 446 km und einen Kaufpreis von 83.750 \$. Im Vergleich zum Audi e-tron 55 Sportback hat der Smart EQ fortwo eine Reichweite von etwa 159 km und einen Preis von 21.387 \$. Darüber hinaus unterstreichen die Kategorien in Tabelle 7.4 die Korrelation. Die ausgewählten EVs der Kategorie 1 haben eine durchschnittliche Reichweite von 245 km im Vergleich zu den EVs der Kategorie 3 (438 km). Diese Beispiele unterstreichen die Korrelation zwischen Anschaffungskosten und Reichweite. Trotz des reichhaltigen Angebots an EVs mit großer Reichweite bleibt die Reichweitenangst jedoch ein Forschungsgegenstand in aktuellen wissenschaftlichen Publikationen [315, 316].

In seiner Doktorarbeit [317] analysiert T. Franke nachhaltige Mobilität im Kontext begrenzter Ressourcen. Eine interessante Erkenntnis ist, dass Fahrer von EVs einen theoretischen Sicherheitsabstand von 20 % bis 25 % der Reichweite im Kopf haben. Mit anderen Worten, 20 % bis 25 % der verfügbaren Reichweite werden nicht genutzt. Bspw. denkt der Fahrer bei einer Reichweite von 100 km, dass die Reichweite nur zwischen 75 km und 80 km beträgt. Der Sicherheitsabstand wird durch eine falsche Wahrnehmung der tatsächlichen Reichweite verursacht [317, 318].

Eine weitere Studie [319] kommt zu dem Schluss, dass die Reichweitenangst mit dem Erfahrungs niveau der Fahrer von EVs korreliert. Mehr Erfahrung im Fahren

eines EVs führt zu weniger Reichweitenangst [319]. Diese Korrelation wurde auch in [313] festgestellt. Basierend auf den Ergebnissen von [313, 319] wurde 2017 eine Umfrage mit 179 Befragten für diese Studie durchgeführt, um die Verbreitung der Reichweitenangst zu analysieren. 52 der Befragten waren Besitzer von EV und 127 Befragte besaßen ein konventionell angetriebenes Fahrzeug. Nur 28 % der Besitzer von EVs gaben an, dass sie Reichweitenangst haben, wie in Abbildung 7.5 gezeigt. Im Vergleich zu den Besitzern von EVs haben 62% der Befragten, die kein EV besitzen, Reichweitenangst. Diese Ergebnisse unterstreichen die Ergebnisse von [319] und zeigen, dass die Reichweitenangst ein psychologisches Phänomen ist, das insbesondere bei Menschen verbreitet ist, die keine vorherige Erfahrung mit der Nutzung von EVs haben.

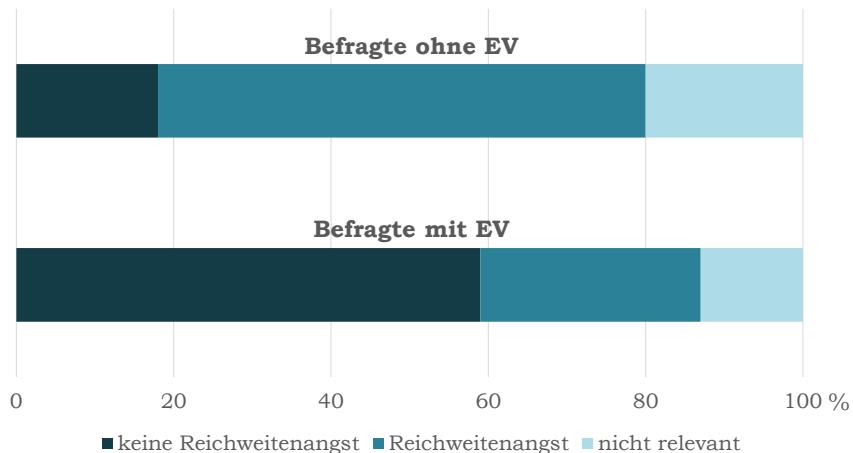


Abbildung 7.5: Umfrageergebnisse zur Reichweitenangst (Datenquelle: [320]).

Neben den psychologischen Aspekten gibt es auch technische Lösungen zur Bekämpfung der Reichweitenangst. Z. B. kann die Optimierung der Reichweitenvorhersage die Reichweitenangst verringern. In früheren Veröffentlichungen [320, 321] wird ein System vorgestellt, das in der Lage ist, Nutzlaständerungen des Fahrzeugs durch die Reifendrucküberwachung zu erkennen. Durch Kenntnis der aktuellen Fahrzeugmasse und Bestimmung der Nutzlast kann der Energieverbrauch und die verfügbare Reichweite entlang der Route optimiert werden. Eine weitere technische Lösung ist die Integration von Reichweitenverlängerern zur Erhöhung der Reichweite [322]. Alternativ kann auch die Entwicklung von Softwarelösungen hilfreich sein, bspw. um dem Fahrer Informationen über nahegelegene Ladestationen bereitzustellen [323]. Eine Vielzahl von Parametern (Fahrzeuggewicht, Batteriekapazität, Verkehrsaufkommen, meteorologische Daten usw.) muss berücksichtigt werden, um die Reichweite von EVs genau vorherzusagen [324]. Die Autoren von [324] empfehlen z. B. die Entwicklung

einer fortschrittlichen Softwarelösung, die bspw. künstliche Intelligenz zur Reichweitenvorhersage nutzt, um alle notwendigen Einflussparameter zu analysieren und zu berücksichtigen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Reichweitenvorhersage software in den letzten Jahren verbessert wurde, die aktuellen Systeme jedoch noch ein großes Verbesserungspotenzial hinsichtlich der Integration von künstlicher Intelligenz aufweisen.

Plug-in-Hybrid-Elektrofahrzeuge (PHEV) sind eine weitere vielversprechende Lösung zur Überwindung der Reichweitenangst. Durch das Fahren von PHEVs kommen potenzielle Käufer von EVs mit elektrisch betriebenen Fahrzeugen in Kontakt. Diese wachsende Erfahrung mit EVs, die durch das Fahren von PHEVs ermöglicht wird, kann zu einer Verringerung der Reichweitenangst führen, obwohl weitere Untersuchungen erforderlich sind, um detailliertere Aussagen in dieser Hinsicht zu treffen, wie bereits in [319] und in Übereinstimmung mit den Ergebnissen unserer eigenen Umfrage festgestellt wurde.

Die Einführung von Schnellladetechnologien, wie dem Tesla Supercharger, kann ebenfalls dazu beitragen, die Reichweitenangst zu überwinden [325]. Daher wird im nächsten Abschnitt die Ladezeit aktueller EVs analysiert, um das Verbesserungspotenzial zu verdeutlichen.

7.4.4 Ladedauer von modernen Elektrofahrzeugen

Die Beziehung zwischen Reichweitenangst und der verfügbaren Ladeinfrastruktur wird in [315, 325] behandelt und diskutiert. In diesen Studien betonten die Autoren, dass eine zunehmende Anzahl von Ladestationen und die Integration von Schnellladesystemen in die Ladeinfrastruktur dazu beitragen können, die Reichweitenangst zu verringern. Die Konsequenz dieser Beziehung ist, dass die Erhöhung der Batteriekapazitäten und die Entwicklung sowie Integration der für das Schnellladen notwendigen elektronischen Komponenten wichtige Themen für Automobilhersteller sind. Ein weiteres wichtiges Thema ist die Gewährleistung der Wirtschaftlichkeit von Schnellladesystemen. Abschnitt 5.4.2 bietet weitere Details zu den wirtschaftlichen Aspekten der Ladeinfrastruktur.

Die Ladezeiten von EVs hängen von der Batteriekapazität und der Art des Netzschlusses ab. Z. B. kann das Laden mit einem DC-Anschluss nur wenige Minuten dauern, während das Laden mit einem AC-Anschluss mehrere Stunden in Anspruch nimmt. Beim Laden mit Wechselstrom erhält das bordeigene Ladegerät des Fahrzeugs Wechselstrom, den es dann in Gleichstrom umwandelt, der schließlich an die Fahrzeughalterie gesendet wird. Das Laden des EVs mit Gleichstrom erfolgt über eine DC-Ladestation, die den aus dem Stromnetz kommenden Wechselstrom in Gleichstrom umwandeln kann. Dieser Ladestrom umgeht dann das bordeigene

Ladegerät des EV und wird über ein Batteriemanagementsystem (BMS) gemäß den Anweisungen des Ladesteuerungssystems des EVs an die Batterie gesendet. Dies bedeutet im Wesentlichen, dass die Ladezeit nicht durch die Leistung des bordeigenen Ladegeräts begrenzt ist, was ein großes Potenzial zur Reduzierung der Ladezeit eröffnet.

Am Beispiel eines Nissan Leaf mit einer Batteriekapazität von 40 kWh zeigt Tabelle 7.5 mögliche Ladezeiten in Abhängigkeit von der Ladeleistung. Dies stellt jedoch nur einen Idealzustand von 100 % Effizienz dar und vernachlässigt jegliche Verluste. In der Studie [326] wurden die Verluste eines konduktiven Ladesystems detailliert untersucht, indem sowohl die ausgewählten Fahrzeug- als auch die Ladestationskomponenten analysiert wurden. Die Verluste hängen offensichtlich vom Wechselstrom (10 A, Verluste: 17%; 40 A, Verluste: 12%) ab. Hohe Verluste treten auf, wenn die Transformatoren unterhalb ihrer Nennleistung arbeiten. Im besten Fall benötigt ein mit Wechselstrom geladener Nissan Leaf 3,6 h für eine vollständige Ladung. Dies ist für lange Reisen aufgrund der extrem verlängerten Ladezeit inakzeptabel. Daher bleibt nur das DC-Laden. Mit einer möglichen Ladeleistung von 50 kW wäre ein Nissan Leaf innerhalb von 40 min geladen [273].

Tabelle 7.5. Ladezeit eines Nissan Leaf mit 40 kWh Batterie in Abhängigkeit von Ladeleistung und -kapazität (Datenquelle: [273]).

Ladeleistung	DC		AC		
	50 kW	22 kW	11 kW	3,7 kW	2,3 kW
Ladezeit [h]	0,8	1,8	3,6	10,8	17,4

Die Alterung von Batterien hängt unter anderem von der Ladeleistung ab. Die Mehrheit der modernen EVs ist auf eine C-Rate zwischen 1 C und 1,5 C begrenzt [312]. Die C-Rate definiert den maximalen Lade- und Entladestrom in Bezug auf die Batteriekapazität. Höhere Ladegeschwindigkeiten (z. B. zwischen 1 C und 4 C) können Lithium-Plating verursachen, den Innenwiderstand erhöhen und eine Verringerung der Zellkapazitäten fördern [312, 327]. Infolgedessen können Li-Ion-Batterien schneller altern [327]. Zusätzlich ist die Batterietemperatur ein weiterer wichtiger Faktor, der die Alterung von Batterien beeinflusst und berücksichtigt werden muss [312].

Die Ladetechnologie von sieben modernen EVs wird analysiert, um einen Überblick über die Ladezeiten von EVs zu erhalten. Die nachfolgend dargestellten Ladezeiten beziehen sich auf einen Ladevorgang bis zu einem Ladezustand von 80 %. Bei Ladeleistungen zwischen 3,6 kW und 50 kW variieren die Ladezeiten von 36 min (VW

e-Golf, 50 kW) bis etwa 27,5 min (Audi e-tron Sportback 55 quattro, 3,6 kW), siehe Abbildung 9. Im Vergleich zu den ausgewählten Fahrzeugen kann der Porsche Taycan z. B. mit höheren C-Raten geladen werden, etwa 3 C, bei einem Spannungsniveau von 800 V [312, 328], was bedeutet, dass der Porsche Taycan mit einer maximalen Ladeleistung von 270 kW geladen werden kann. Dies führt zu einer signifikanten Reduzierung der Ladezeit, sodass der Porsche Taycan unter idealen Bedingungen von 5 % bis 80 % SoC in 22,5 min geladen werden kann. Mit anderen Worten, ausreichend Energie für 100 km kann innerhalb von 5 min geladen werden. Die Auswirkungen des Schnellladens auf die Batteriealterung des Porsche Taycan und anderer EVs müssen in Zukunft beobachtet und analysiert werden.

Um potenzielle Käufer von EVs zu gewinnen, müssen die Ladezeiten für EVs im besten Fall nahe an die Zeit herankommen, die zum Betanken konventioneller Fahrzeuge erforderlich ist. In [329] betonen die Autoren, dass der Betankungsvorgang von Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen etwa 2 min bis 3 min dauert. Dieser schnelle Betankungsvorgang ermöglicht es aktuellen Brennstoffzellen-Elektrofahrzeugen, mit konventionellen Fahrzeugen hinsichtlich der Betankungszeit zu konkurrieren. Im Vergleich zu konventionellen und Brennstoffzellenfahrzeugen beträgt die durchschnittliche Ladezeit der analysierten modernen Elektrofahrzeuge 45,6 min bei einer Ladeleistung von 50 kW (siehe Abbildung 7.6). Daher kann zusammengefasst werden, dass schnelleres Laden und eine größere Verfügbarkeit von Schnellladestationen das Potenzial haben, die öffentliche Akzeptanz von Elektrofahrzeugen zu erhöhen. Basierend auf dieser Schlussfolgerung werden in den folgenden Abschnitten die Bedeutung der Ladeinfrastruktur für die zunehmende Verbreitung von EVs untersucht.

7.4.5 Wandel der Wahrnehmung

Die soziale Akzeptanz ist unerlässlich, um die Elektromobilität erfolgreich auf dem Automobilmarkt zu etablieren. Derzeit ist die öffentliche Meinung zu den folgenden Aspekten von EVs sehr kritisch: hohe Anschaffungskosten, Sicherheitsbedenken, begrenzte Reichweite, lange Ladezeiten und schlecht ausgebauten Ladeinfrastruktur. Abbildung 7.7 zeigt eine grafische Darstellung der Entwicklung der sozialen Akzeptanz von EVs in Deutschland von 2011 bis 2020. Die Daten basieren auf zwei verschiedenen Studien: einer aktuellen Studie [330] und einer Studie aus dem Jahr 2011 [331]. Beide Studien verwendeten Umfragen zu den oben genannten kritischen Aspekten. In der neueren Studie wurden bis zu 1000 Personen befragt, in der Studie von 2011 wurden etwa 700 Personen befragt. Die Studien repräsentieren nur die allgemeine Meinung der Bevölkerung zu EVs. Verständlicherweise können die Datensätze grundsätzlich nicht miteinander verglichen werden. Dennoch ist ein grund-

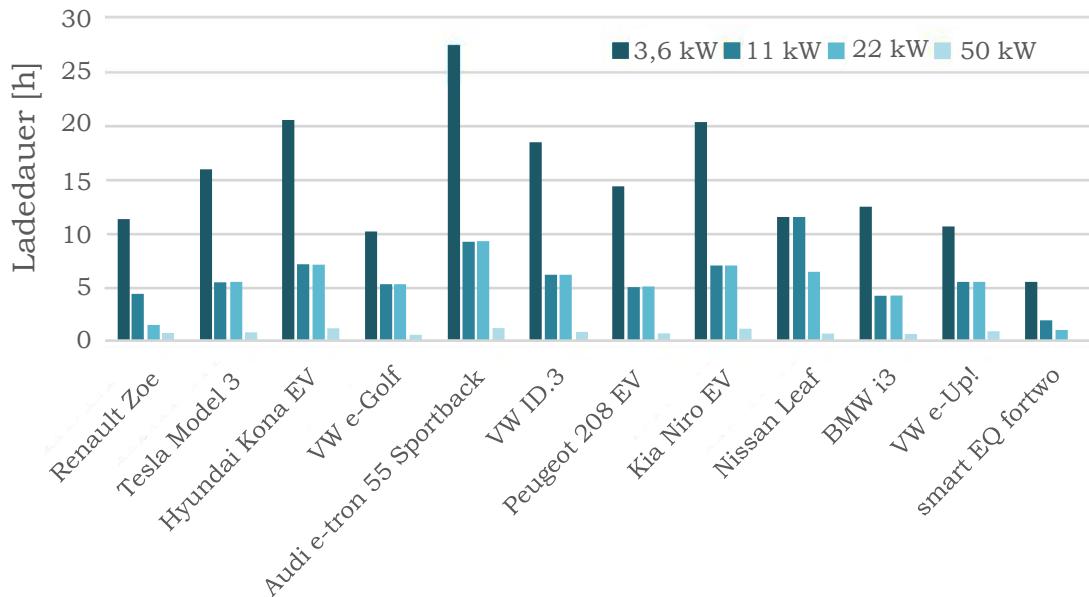


Abbildung 7.6: Ladezeit aktueller EVs in Abhängigkeit von der Ladeleistung.

legender Wandel in der Ansicht über EVs innerhalb von neun Jahren erkennbar. In Abbildung 7.7 spiegelt die orangefarbene Linie die Aussagen und Stimmungen von 2011 wider und verläuft weit außerhalb der blauen Linie von 2020, was bedeutet, dass die Menschen damals viel skeptischer und weniger bereit waren, in neue Technologie zu investieren und dieser zu vertrauen. 100 % bedeutet eine hohe Gewichtung (außergewöhnliche Bedeutung) und 0 % bedeutet keine Gewichtung (keine Bedeutung). Besonders auffällig ist die starke Abweichung im Aspekt der Sicherheit. 83 % der Teilnehmer haben die Sicherheit direkt hinter dem Aspekt der Umweltfreundlichkeit eingeordnet. 87 % der Teilnehmer waren 2011 gegen EVs, da sie glaubten, dass EVs insgesamt umweltschädlicher sind als konventionelle Fahrzeuge. Beide Ansichten haben sich grundlegend geändert. Heute sind nur noch 8 % besorgt über die Sicherheit, und 38 % glauben, dass EVs umweltschädlicher sind als konventionelle Fahrzeuge. Aus diesem Grund wurde der Aspekt der Umweltfreundlichkeit auch in Abbildung 7.7 aufgenommen. Anschaffungskosten (70 %), Reichweite (67 %), Ladezeit (72 %) und Ladeinfrastruktur (62 %) wurden 2011 ebenfalls als sehr problematisch bewertet. Diese Erkenntnis wird auch durch die Studie [332] gestützt. Technologischer Fortschritt, insbesondere im Bereich der Batterien, hat zu einer verbesserten Akzeptanz geführt. Diese Akzeptanz resultiert zum mindesten teilweise daraus, dass Batterien einen großen Einfluss auf die Fahrzeugpreise haben (siehe Abschnitt 7.4.1), dass längere Strecken zurückgelegt werden können (siehe Abschnitt 7.4.3) und durch die Verbesserung der Reichweitenvorhersage (siehe Abschnitt 7.4.1). Darüber hinaus wurden auch Ladestationen weiterentwickelt, sodass EVs mit hohen Ladeleistungen

von 150 kW (DC) innerhalb weniger Minuten geladen werden können (je nach Batteriekapazität) (siehe Abschnitte 7.4.4, 5.4). Dementsprechend zeigen die Umfrageergebnisse, dass die Anschaffungskosten und die Reichweite im Vergleich zu 2011 um 20 % niedriger bewertet werden, während die Ladezeit um 30 % niedriger bewertet wird. Auch die Wahrnehmung der Ladeinfrastruktur hat sich in diesen neun Jahren merklich verändert, was durch die staatlichen Förderprogramme zum Ausbau der Ladeinfrastruktur erklärt werden kann (siehe Abschnitt 5.1). Hier besteht die Herausforderung darin, sicherzustellen, dass die Ladeinfrastruktur nicht willkürlich und unausgewogen wächst. Die optimale Verteilung ist ein komplexes Thema und umfasst viele Einflussfaktoren (siehe Abschnitt 5).

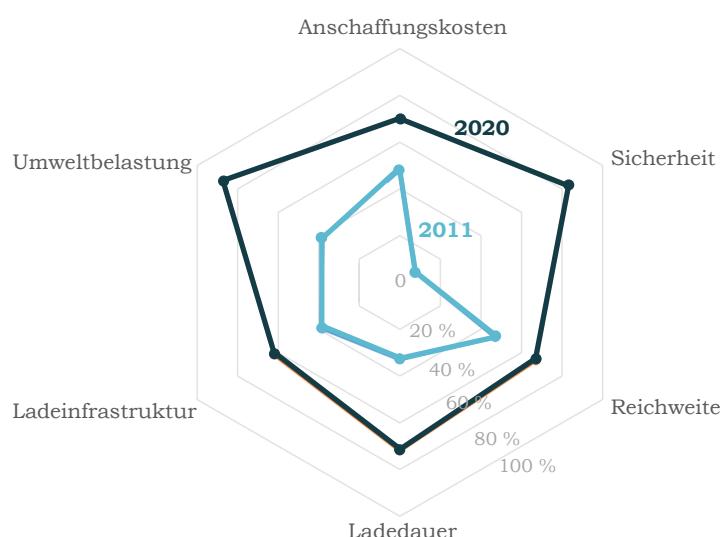


Abbildung 7.7: Vergleich der sozialen Akzeptanz von EVs in 2011 und 2020.

7.5 Zusammenfassung

Das vorliegende Kapitel widmet sich den strategischen Weichenstellungen in den Bereichen Energie, Elektromobilität und Politik. Zudem erfolgt eine Analyse der Entwicklung der sozialen Akzeptanz von EVs, welche als wichtiger Faktor für deren erfolgreiche Einführung auf dem Markt identifiziert wird. Ein wesentlicher Aspekt ist die soziale Akzeptanz, die durch hohe Anschaffungskosten, Sicherheitsbedenken, begrenzte Reichweite, lange Ladezeiten sowie eine unzureichende Infrastruktur für die Energieversorgung beeinflusst wird. Die Entwicklung der öffentlichen Meinung in Deutschland hinsichtlich EVs wird in einer grafischen Analyse dargestellt, wobei die Daten aus Umfragen stammen, in denen die Sichtweise der Bevölkerung zu diesem

Thema erfasst wurde. Der Zeitraum der Analyse erstreckt sich von 2011 bis 2020. Die Ergebnisse der Untersuchung legen einen signifikanten Wandel in der öffentlichen Meinung zu EVs nahe. Während im Jahr 2011 noch 87 % der Befragten eine skeptische Haltung gegenüber EVs einnahmen, hat sich diese Einstellung bis zum Jahr 2020 erheblich verbessert. Die Bedenken hinsichtlich der Umweltfreundlichkeit und Sicherheit haben sich reduziert, was auf technologische Fortschritte sowie eine optimierte öffentliche Infrastruktur zurückzuführen ist. Diese Arbeit demonstriert, dass technologische Innovationen, wie die Entwicklung leistungsfähigerer Batterien und schneller Ladeoptionen, einen positiven Einfluss auf die Akzeptanz von EVs ausüben. Die Ladeinfrastruktur hat sich weiterentwickelt, und staatliche Förderprogramme unterstützen den Ausbau. Eine Herausforderung besteht jedoch darin, den Ausbau strategisch zu planen, um eine ausgewogene und effektive Abdeckung zu gewährleisten. Schließlich wird herausgestellt, dass neben technologischen Fortschritten auch politische und infrastrukturelle Maßnahmen erforderlich sind, um die Elektromobilität nachhaltig in die Gesellschaft zu integrieren.

8 Schlussfolgerung

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der Dissertation zusammengefasst und in den entsprechenden Forschungskontext eingeordnet. Zunächst werden die wichtigsten Erkenntnisse, die im Verlauf der Arbeit gewonnen wurden, dargestellt. Im darauffolgenden wissenschaftlichen Beitrag wird der konkrete Mehrwert für das betreffende Forschungsfeld hervorgehoben. Abschließend werden mögliche zukünftige Entwicklungen aufgezeigt, die auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbauen, sowie Forschungsansätze skizziert, die zur Weiterentwicklung von WPT-Systemen beitragen können.

8.1 Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation liefert einen umfassenden Beitrag zur Entwicklung sicherer und effizienter WPT-Systeme für EVs sowie zur Verbesserung der Akzeptanz dieser Technologien. Der Fokus liegt dabei auf der Einhaltung strenger Sicherheitsanforderungen für die Nutzung von WPT-Systemen im öffentlichen Raum und der Optimierung der Ladeinfrastruktur für eine breite Anwendung.

Im Bereich der EMF konnten im Rahmen des TALAKO-Projekts wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Die entwickelten Simulations- und Messkonzepte ermöglichen eine detaillierte Bewertung der Magnetfeldexposition von WPT-Systemen in verschiedenen realitätsnahen Szenarien. Die Kombination von Mess- und Simulationsdaten zeigt, dass das untersuchte WPT-System den aktuellen EMF-Richtlinien entspricht und keine gesundheitsschädlichen Auswirkungen auf die Bevölkerung hat. Zudem wurde festgestellt, dass einfache Spulendesigns ein hohes Potenzial für die Anwendung in urbanen Stop-and-Go-Ladeszenarien aufweisen. Die Ergebnisse dieser Studie können als Referenz für ähnliche Anwendungen dienen, auch wenn sie aufgrund variierender Rahmenbedingungen nicht direkt auf andere Szenarien übertragen werden können.

Die Planung der Ladeinfrastruktur für EVs erwies sich als komplexes Unterfangen, das geografische und demografische Faktoren berücksichtigt. Mithilfe eines Dijkstra-Algorithmus wurde ein Modell zur optimalen Verteilung von Ladestationen entwi-

ckelt. Die Untersuchung von „vollintegrierten/unsichtbaren“ Lademöglichkeiten, wie Unterflurschalschränken, zeigte, dass solche Konzepte eine praktikable Ergänzung zu konventionellen Schalschränken darstellen könnten. Ergänzend wurde die Entwicklung der sozialen Akzeptanz der Elektromobilität von 2011 bis 2020 analysiert und eine positive Entwicklung durch technologische Fortschritte und Fördermaßnahmen festgestellt.

Trotz dieser Fortschritte bleiben kritische Akzeptanzhürden bestehen, wie Reichweitenangst und hohe Anschaffungskosten. Die Reichweitenangst könnte durch hybride Modelle und technologische Optimierungen, wie Vorhersagen der Reichweiten und Reichweiten-Extender, reduziert werden. Die Preisprognosen für Batterien zeigen eine vielversprechende Kostenentwicklung, die EVs für eine breitere Käuferschaft attraktiver machen dürfte. Zukünftige Forschungsansätze sollten sich auf die Erhöhung der Kundenzufriedenheit und die Verstärkung der privaten Ladeinfrastruktur konzentrieren, da viele Nutzer das Laden zu Hause bevorzugen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Einführung einer neuen Technologie wie der Elektromobilität eine Balance zwischen technologischem Fortschritt und sozialer Akzeptanz erfordert. Nur durch die Überwindung des sogenannten „Teufelskreises“ – fehlende Nachfrage bei unausgereifter Technik und geringe Investitionsbereitschaft bei Unsicherheit – kann die Elektromobilität ihr volles Potenzial entfalten und einen Beitrag zur Senkung der Verkehrsemissionen leisten.

8.2 Wissenschaftlicher Beitrag

Diese Dissertation leistet einen wesentlichen Beitrag zur Weiterentwicklung und Optimierung von WPT-Systemen für EVs sowie zur Planung und Gestaltung einer zukunftsfähigen Ladeinfrastruktur. Die Arbeit fokussiert sich auf zwei Kernaspekte: die Reduzierung elektromagnetischer Belastungen und die strategische Planung nachhaltiger Ladeinfrastrukturen.

Der wissenschaftliche Beitrag im Bereich der WPT-Systeme liegt in der Entwicklung eines innovativen Simulations- und Messkonzepts zur präzisen Bewertung der EMF im öffentlichen Raum. Das Konzept berücksichtigt aktuelle Sicherheitsanforderungen und definiert neue Maßstäbe für die Beurteilung der Exposition. Die aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse fließen in ein umfassendes Sicherheitskonzept ein, welches auf strenge Richtlinien im öffentlichen Raum abgestimmt ist und somit die Grundlage für weiterführende Forschungsarbeiten und technische Entwicklungen bildet.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dargelegt, dass – in Abgrenzung zu den bisherigen Veröffentlichungen – Messungen nicht ausschließlich unter Laborbedingungen, sondern auch im realen Umfeld durchgeführt wurden. Trotz der höheren Komplexität und potenzieller Störeinflüsse weisen diese Messungen eine hohe Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen auf, die auf einem stark vereinfachten Fahrzeugmodell basieren. Dies veranschaulicht, dass selbst mit diesem reduzierten Modell belastbare und übertragbare Ergebnisse erzielt werden können. Darüber hinaus wurde das bestehende Messkonzept über den Stand der Wissenschaft hinaus erweitert, um Messungen an mehreren gleichzeitig ladenden Fahrzeugen zu ermöglichen.

Im Bereich der Ladeinfrastruktur präsentiert die Arbeit praxisnahe Ansätze zur Optimierung der räumlichen Verteilung von Ladestationen. Die Entwicklung eines Modells mithilfe eines Dijkstra-Algorithmus ermöglicht die Simulation der optimalen Platzierung von WPT-Systemen unter Berücksichtigung vorhandener Netzwerke und geografischer Besonderheiten. Die Untersuchung von Unterflurschaltsschränken erlaubt eine umfassende Analyse des Potenzials „voll integrierter bzw. unsichtbarer“ Lademöglichkeiten, was zur Schaffung ästhetisch und praktisch vorteilhafter Ladeoptionen beitragen kann.

Zusätzlich trägt die Dissertation zur strategischen Diskussion rund um die Themen Energiespeicherung, Elektromobilität, Politik und soziale Akzeptanz bei. Durch die Analyse der Akzeptanzentwicklung im Zeitraum von 2011 bis 2020 werden wertvolle Erkenntnisse darüber gewonnen, welche Faktoren die gesellschaftliche Zustimmung zu neuen Technologien fördern oder behindern können. Diese Informationen unterstützen zukünftige Planungen und politische Entscheidungsprozesse, um die Akzeptanz und Nachhaltigkeit von Ladesystemen langfristig zu sichern.

Einige der in dieser Arbeit erzielten Resultate wurden in 17 begutachteten Publikationen, von denen neun als Erstautorin verfasst wurden, sowie in renommierten internationalen Fachzeitschriften (u. a. Institute of Electrical and Electronics (IEEE) Transactions on Magnetics) veröffentlicht und auf bedeutenden Konferenzen (u. a. IEEE Compumag) präsentiert. Eine Auflistung der Veröffentlichungen befindet sich im Anhang E.

8.3 Ausblick

Die technologische Entwicklung von WPT-Systemen für EVs hat bereits bedeutende Fortschritte gemacht. Dennoch lassen sich für die Zukunft zahlreiche weitere spannende Entwicklungen prognostizieren. In Bezug auf die genannten Aspek-

te ist davon auszugehen, dass eine signifikante Steigerung der Effizienz, Leistung, Benutzerfreundlichkeit sowie eine verbesserte Integration der Systeme in den Alltag möglich ist. Im Folgenden erfolgt eine Beleuchtung der Aspekte sowie eine Darlegung eines Überblicks über die jüngsten sowie laufenden technologischen Bemühungen.

Die Weiterentwicklung von WPT-Systemen verdeutlicht, dass künftige Forschungsarbeiten und Innovationsbestrebungen auf die Optimierung von Kompensationsnetzwerken, Kopplungsstrukturen, Umrichtern und Regelungstechniken abzielen. Die genannten Elemente sind von entscheidender Bedeutung für die Steigerung der Effizienz, der Toleranz bei Fehlausrichtungen sowie der Stabilität der Leistung.

Die **Kompensationsnetzwerke**, welche die Resonanz zwischen den Spulen herstellen, sind von entscheidender Bedeutung, um die Energieübertragung zu optimieren. Durch Konfigurationen, wie bspw. die Serien- oder Parallelkompensation, kann eine lastunabhängige Ausgangsleistung sowie eine hohe Effizienz gewährleistet werden. Höherwertige Topologien, wie LCL und LCC, werden zunehmend untersucht, da sie die Schaltverluste minimieren und die Bereitstellung konstanter Strom- und Spannungsquellen ermöglichen.

Die Ausgestaltung der **Spulendesigns** ist ein wesentlicher Faktor zur Erzielung einer homogenen Magnetfeldverteilung sowie zur Optimierung der Fehlausrichtungstoleranz. Multi- und asymmetrische Spulenstrukturen bieten Lösungen für größere Ladebereiche und minimieren den Energieverlust bei Fehlausrichtungen. Neue Designs, wie kugelförmige Spulenanordnungen, könnten die Energieübertragung in drei Dimensionen ermöglichen, was insbesondere für mobile Geräte von Bedeutung ist. In Bezug auf die **Leistungselektronik** erweisen sich Halb- und Vollbrücken-Spannungsquellen-Resonanzwandler als vorteilhaft, um den hohen Leistungsbedarf zu decken. Durch den Einsatz mehrphasiger Inverter sowie innovativer Steuerungstechniken, wie bspw. asymmetrische Spannungskompensation und Phasenverschiebung, besteht die Möglichkeit einer Effizienzsteigerung des Gesamtsystems sowie einer Optimierung der Leistungsregelung.

Die künftige Forschung wird sich weiterhin auf die Optimierung der Systemeffizienz, die Adaption an variable Lastbedingungen sowie die Minimierung von Störungen fokussieren. Die Entwicklung mehrstufiger Kompensationsnetzwerke und fortschrittlicher Kopplungsstrukturen wird von entscheidender Bedeutung sein, um die praktische Anwendung von induktiven WPT-Systemen in einer Vielzahl von Anwendungen voranzutreiben, darunter EVs, IoT-Geräte und medizinische Systeme.

Dynamisches Laden für EVs birgt das Potenzial, die Zukunft der Mobilität zu revolutionieren. Hierbei werden EVs während der Fahrt kabellos über in die Straßen integrierte Ladestrecken aufgeladen. Dies würde die Verwendung von kleineren, leichteren und kostengünstigeren Batterien ermöglichen, da die EVs kontinuierlich mit Strom versorgt werden. Die als vielversprechend betrachteten RPEVs (Roadway-

Powered Electric Vehicles) werden derzeit durch hohe Anfangskosten behindert, so dass eine breite Kommerzialisierung noch nicht zu beobachten ist. Gegenwärtige Fortschritte zielen auf eine Senkung der Kosten und Erhöhung der Sicherheit, indem lange Stromschienen in kürzere Abschnitte unterteilt werden. Dadurch kann das EMF reduziert und Energieverluste minimiert werden. In Kombination mit autonomen EVs könnte das Laden zudem nahtlos erfolgen, was den Bedarf an großen stationären Ladesystemen verringert. Langfristig birgt das dynamische Laden ein beträchtliches Potenzial zur Erweiterung der Reichweite von EVs sowie zur Steigerung der Effizienz und Benutzerfreundlichkeit des Ladevorgangs.

Der Ausblick für **bidirektionale WPT-Systeme** im Kontext von **V2G und Smart Grids** ist vielversprechend. In Zukunft könnte die Funktionalität von EVs über die reine Ladung hinausgehen, sodass diese auch als mobile Energiespeicher und Rückspeisepunkte ins Stromnetz dienen könnten. Dies würde dazu beitragen, die Netzstabilität zu erhöhen und die Integration von EE zu verbessern, da EVs bevorzugt dann geladen werden könnten, wenn Solar- oder Windenergie im Überfluss vorhanden ist. Eine intelligente Ladeinfrastruktur, die mit dem Stromnetz kommuniziert, könnte die Ladezeiten optimieren, Netzbelastrungen reduzieren und Kosten senken. Die Nutzung bidirektionaler WPT-Systeme würde demnach nicht nur die Effizienz der Nutzung von EE steigern, sondern auch zur Flexibilität und Effizienz zukünftiger Energiesysteme beitragen und eine Schlüsselrolle in der Entwicklung von Smart Grids einnehmen.

Metamaterialien bergen ein beträchtliches Optimierungspotenzial für die Weiterentwicklung von WPT-Systemen. Ihre Fähigkeit, Permittivität und Permeabilität flexibel anzupassen, erlaubt eine Optimierung der Effizienz, eine Vergrößerung der Betriebsabstände sowie eine Erhöhung der Toleranz gegenüber Fehlausrichtungen in Nahfeld-WPT-Systemen. Des Weiteren könnten Metaflächen, eine kompakte Version von Metamaterialien, zu einer Platzersparnis und einer Steigerung der Effizienz führen. Obgleich die Fertigung von Metamaterialien mit Schwierigkeiten verbunden ist, bieten diese innovative Lösungsansätze zur Optimierung von WPT-Systemen, insbesondere im Kontext der Elektromobilität und mobiler Endgeräte. Die umfassende Nutzung der genannten Vorteile erfordert jedoch weitere Anstrengungen und technologische Fortschritte.

Bei der Entwicklung zukünftiger WPT-Systeme für EVs wird ein besonderes Augenmerk auf die Minimierung der **Exposition gegenüber EMF** gelegt. Der Einsatz fortschrittlicher Abschirmtechnologien sowie intelligenter Steuerungssysteme wird dazu beitragen, die Belastung durch EMF zu reduzieren. Dies erfolgt durch eine Übertragung der Energie lediglich bei korrekter Positionierung des Fahrzeugs. Mit einer Steigerung der Leistungsanforderungen sowie einer Zunahme der Vernetzung erfährt die EMV eine stetige Relevanzsteigerung. Um EMI zu unterdrücken und die

Sicherheit zu gewährleisten, werden optimierte Designs sowie moderne Materialien wie nanokristalline Kerne und Metamaterialien eingesetzt. Dies ist insbesondere von Bedeutung, um die Sicherheit von EVs zu gewährleisten, ohne dabei die Ladeeffizienz zu beeinträchtigen.

Der Ausblick auf die **Fremdkörpererkennung** bei WPT-Systemen für EVs verdeutlicht, dass die Sicherheit durch die Erkennung von Metallgegenständen und Lebewesen im Magnetfeld maßgeblich zu optimieren ist. Während des Ladevorgangs besteht ein potenzielles Risiko, dass Metallgegenstände oder Lebewesen in das Magnetfeld des Kopplers gelangen, was unerwünschte Effekte und Sicherheitsprobleme zur Folge haben kann. In künftigen Systemen werden fortschrittliche Sensoren und Erkennungsspulen zum Einsatz kommen, um Fremdkörper präzise und in Echtzeit zu identifizieren und bei Gefahr ein automatisches Unterbrechen des Ladevorgangs zu gewährleisten. Diese Entwicklungen sind von entscheidender Bedeutung, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit induktiver Ladesysteme weiter zu erhöhen und deren breite Markteinführung zu unterstützen.

Mit der forcierten Implementierung von WPT-Systemen erfährt die Fragestellung der **Umweltverträglichkeit und Nachhaltigkeit** eine signifikante Aufwertung. Es ist zu erwarten, dass zukünftige Entwicklungen den Fokus auf den Einsatz umweltschonender Materialien sowie auf verbesserte Recyclingprozesse für Ladesystemkomponenten legen werden. Die Entwicklung nachhaltiger Lösungen zielt nicht nur darauf ab, die Produktion dieser Systeme umweltfreundlicher zu gestalten. Es ist ebenfalls von entscheidender Bedeutung, zukünftige Designs so zu optimieren, dass die Lebensdauer der Komponenten maximiert wird. Dies kann bspw. durch ein optimiertes Wärmemanagement erreicht werden. WPT-Systeme könnten somit langfristig zu einer ressourcenschonenderen und ökologisch verantwortungsvoller Elektromobilität beitragen.

Es lässt sich prognostizieren, dass die Zukunft von WPT-Systemen maßgeblich durch eine Kombination aus technologischen Fortschritten, einer optimierten Benutzerfreundlichkeit sowie einer engen Integration in intelligente Energienetze geprägt sein wird. Die dargelegten Entwicklungen lassen die Prognose zu, dass WPT-Systemen nicht nur in puncto Komfort und Sicherheit optimiert werden, sondern auch einen essenziellen Beitrag zur Förderung nachhaltiger Elektromobilität leisten können.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt, „25 % des EU-Energieverbrauchs aus erneuerbaren Energien“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Umwelt-Energie/Ausbau_ErneuerbareEnergien.html, [Zugriff am: 19.08.2024].
- [2] F. D. Kanellos, E. Grigoroudis, C. Hope, V. S. Kouikoglou, und Y. A. Phillis, „Optimal GHG Emission Abatement and Aggregate Economic Damages of Global Warming“, *IEEE Systems Journal*, Vol. 11, Nr. 4, SS. 2784–2793, 2017.
- [3] European Environment Agency (EEA), „Greenhouse Gas Emissions from Transport“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/transport-and-mobility>, [Zugriff am: 12.07.2024].
- [4] Umweltbundesamt, „Rolle des Verkehrs bei den Treibhausgasemissionen in Deutschland“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/klimaschutz-im-verkehr#rolle>, [Zugriff am: 19.08.2024].
- [5] International Renewable Energy Agency (IRENA), *World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway*. International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023.
- [6] H.-J. Kim, H. Hirayama, S. Kim, K. J. Han, R. Zhang, und J.-W. Choi, „Review of Near-Field Wireless Power and Communication for Biomedical Applications“, *IEEE Access*, Vol. 5, SS. 21 264–21 285, 2017.
- [7] S. Kisseleff, X. Chen, I. F. Akyildiz, und W. H. Gerstacker, „Efficient Charging of Access Limited Wireless Underground Sensor Networks“, *IEEE Transactions on Communications*, Vol. 64, Nr. 5, SS. 2130–2142, 2016.
- [8] T. Orekan, P. Zhang, und C. Shih, „Analysis, Design, and Maximum Power-Efficiency Tracking for Undersea Wireless Power Transfer“, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 6, Nr. 2, SS. 843–854, 2018.

- [9] S. Niu, H. Xu, Z. Sun, Z. Shao, und L. Jian, „The State-of-the-Arts of Wireless Electric Vehicle Charging via Magnetic Resonance: Principles, Standards and Core Technologies“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 114, S. 109302, 2019.
- [10] A. Kurs, A. Karalis, R. Moffatt, J. D. Joannopoulos, P. Fisher, und M. Soljačić, „Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances“, *Science*, Vol. 317, Nr. 5834, SS. 83–86, 2007.
- [11] M. Budhia, J. T. Boys, G. A. Covic, und C.-Y. Huang, „Development of a Single-Sided Flux Magnetic Coupler for Electric Vehicle IPT Charging Systems“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, Nr. 1, SS. 318–328, 2013.
- [12] D.-W. Seo, J.-H. Lee, und H.-S. Lee, „Optimal Coupling to Achieve Maximum Output Power in a WPT System“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 31, Nr. 6, SS. 3994–3998, 2016.
- [13] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, und M. Feliziani, „Magnetic Field during Wireless Charging in an Electric Vehicle According to Standard SAE J2954“, *Energies*, Vol. 12, Nr. 9, 2019.
- [14] A. Mahesh, B. Chokkalingam, und L. Mihet-Popa, „Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review“, *IEEE Access*, Vol. 9, SS. 137667–137713, 2021.
- [15] A. Triviño, J. M. González-González, und J. A. Aguado, „Wireless Power Transfer Technologies Applied to Electric Vehicles: A Review“, *Energies*, Vol. 14, Nr. 6, 2021.
- [16] J.-R. Sibué, G. Kwimang, J.-P. Ferrieux, G. Meunier, J. Roudet, und R. Périot, „A Global Study of a Contactless Energy Transfer System: Analytical Design, Virtual Prototyping, and Experimental Validation“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, Nr. 10, SS. 4690–4699, 2013.
- [17] M. Kiani und M. Ghovanloo, „A Figure-of-Merit for Designing High-Performance Inductive Power Transmission Links“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, Nr. 11, SS. 5292–5305, 2013.
- [18] W. Zhang und C. C. Mi, „Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 65, Nr. 6, SS. 4768–4778, 2016.
- [19] C.-S. Wang, G. Covic, und O. Stielau, „Power transfer capability and bifurcation phenomena of loosely coupled inductive power transfer systems“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 51, Nr. 1, SS. 148–157, 2004.

- [20] G. A. Covic und J. T. Boys, „Inductive Power Transfer“, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 101, Nr. 6, SS. 1276–1289, 2013.
- [21] J. Lu, G. Zhu, D. Lin, Y. Zhang, H. Wang, und C. C. Mi, „Realizing Constant Current and Constant Voltage Outputs and Input Zero Phase Angle of Wireless Power Transfer Systems With Minimum Component Counts“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 22, Nr. 1, SS. 600–610, 2021.
- [22] J. Deng, S. Li, S. Hu, C. C. Mi, und R. Ma, „Design Methodology of LLC Resonant Converters for Electric Vehicle Battery Chargers“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 63, Nr. 4, SS. 1581–1592, 2014.
- [23] S.-Y. Cho, I.-O. Lee, S. Moon, G.-W. Moon, B.-C. Kim, und K. Y. Kim, „Series-Series Compensated Wireless Power Transfer at Two Different Resonant Frequencies“, in *2013 IEEE ECCE Asia Downunder*, 2013, SS. 1052–1058.
- [24] W. Zhang, S.-C. Wong, C. K. Tse, und Q. Chen, „Analysis and Comparison of Secondary Series- and Parallel-Compensated Inductive Power Transfer Systems Operating for Optimal Efficiency and Load-Independent Voltage-Transfer Ratio“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, Nr. 6, SS. 2979–2990, 2014.
- [25] S. Li und C. C. Mi, „Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications“, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, Nr. 1, SS. 4–17, 2015.
- [26] B. Esteban, M. Sid-Ahmed, und N. C. Kar, „A Comparative Study of Power Supply Architectures in Wireless EV Charging Systems“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 30, Nr. 11, SS. 6408–6422, 2015.
- [27] D. J. Thrimawithana und U. K. Madawala, „A Primary Side Controller for Inductive Power Transfer Systems“, in *2010 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2010, SS. 661–666.
- [28] A. El Aroudi, J. Huang, M. S. Al-Numay, und Z. Li, „On the Coexistence of Multiple Limit Cycles in H-Bridge Wireless Power Transfer Systems With Zero Current Switching Control“, *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, Vol. 67, Nr. 5, SS. 1729–1739, 2020.
- [29] M. Feliziani, T. Campi, S. Cruciani, und F. Maradei, *Wireless Power Transfer for E-Mobility - Fundamentals and Design Guidelines for Wireless Charging of Electric Vehicles*, 1. Aufl. Academic Press, 2023.

- [30] M. Fan, L. Shi, Z. Yin, L. Jiang, und F. Zhang, „Improved Pulse Density Modulation for Semi-bridgeless Active Rectifier in Inductive Power Transfer System“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, Nr. 6, SS. 5893–5902, 2019.
- [31] N. Mohan, T. M. Undeland, und W. P. Robbins, *Power Electronics - Converters, Applications, and Design*, 3. Aufl. Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [32] A. Laha und P. Jain, „Maximizing Efficiency while maintaining Voltage Regulation of Wireless Power Transfer Systems using a Buck-Boost Converter“, in *2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2021, SS. 700–705.
- [33] A. T. L. Lee, W. Jin, S.-C. Tan, und S. Y. Hui, „Buck-Boost Single-Inductor Multiple-Output High-Frequency Inverters for Medium-Power Wireless Power Transfer“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, Nr. 4, SS. 3457–3473, 2019.
- [34] J. M. Miller, O. C. Onar, und M. Chinthavali, „Primary-Side Power Flow Control of Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging“, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, Nr. 1, SS. 147–162, 2015.
- [35] Society of Automotive Engineers, „SAE J2954:2020, Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/ Electric Vehicles and Alignment Methodology“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.sae.org/standards/content/j2954_202010/, [Zugriff am: 03.07.2024].
- [36] A. A. S. Mohamed, S. An, und O. Mohammed, „Coil Design Optimization of Power Pad in IPT System for Electric Vehicle Applications“, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 54, Nr. 4, SS. 1–5, 2018.
- [37] G. Ke, Q. Chen, L. Xu, S.-C. Wong, und C. K. Tse, „A Model for Coupling Under Coil Misalignment for DD Pads and Circular Pads of WPT System“, in *2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2016, SS. 1–6.
- [38] K. Umetani, S. Kawahara, J. Acero, H. Sarnago, Ó. Lucía, und E. Hiraki, „Analytical Formulation of Copper Loss of Litz Wire With Multiple Levels of Twisting Using Measurable Parameters“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 57, Nr. 3, SS. 2407–2420, 2021.
- [39] T. Campi, S. Cruciani, und M. Feliziani, „Magnetic Shielding of Wireless Power Transfer Systems“, in *2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Tokyo*, 2014, SS. 422–425.

- [40] M. Budhia, G. A. Covic, und J. T. Boys, „Design and Optimization of Circular Magnetic Structures for Lumped Inductive Power Transfer Systems“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 26, Nr. 11, SS. 3096–3108, 2011.
- [41] J. Kim, J. Kim, S. Kong, H. Kim, I.-S. Suh, N. P. Suh, D.-H. Cho, J. Kim, und S. Ahn, „Coil Design and Shielding Methods for a Magnetic Resonant Wireless Power Transfer System“, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 101, Nr. 6, SS. 1332–1342, 2013.
- [42] M. Mohammad, E. T. Wodajo, S. Choi, und M. E. Elbuluk, „Modeling and Design of Passive Shield to Limit EMF Emission and to Minimize Shield Loss in Unipolar Wireless Charging System for EV“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, Nr. 12, SS. 12 235–12 245, 2019.
- [43] I. Laakso, S. Tsuchida, A. Hirata, und Y. Kamimura, „Evaluation of SAR in a Human Body Model due to Wireless Power Transmission in the 10 MHz Band“, *Physics in Medicine and Biology*, Vol. 57, SS. 4991–5002, 07 2012.
- [44] A. Christ, M. G. Douglas, J. M. Roman, E. B. Cooper, A. P. Sample, B. H. Waters, J. R. Smith, und N. Kuster, „Evaluation of Wireless Resonant Power Transfer Systems With Human Electromagnetic Exposure Limits“, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 55, Nr. 2, SS. 265–274, 2013.
- [45] J. Chakarothai, K. Wake, T. Arima, S. Watanabe, und T. Uno, „Exposure Evaluation of an Actual Wireless Power Transfer System for an Electric Vehicle With Near-Field Measurement“, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 66, Nr. 3, SS. 1543–1552, 2018.
- [46] E. Asa, M. Mohammad, O. C. Onar, J. Pries, V. Galigekere, und G.-J. Su, „Review of Safety and Exposure Limits of Electromagnetic Fields (EMF) in Wireless Electric Vehicle Charging (WEVC) Applications“, in *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 2020, SS. 17–24.
- [47] L. Pichon, „Electromagnetic Analysis and Simulation Aspects of Wireless Power Transfer in the Domain of Inductive Power Transmission Technology“, *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 34, Nr. 13, SS. 1719–1755, 2020.
- [48] M. Kim, S. Ahn, und H. Kim, „Magnetic Design of a Three-Phase Wireless Power Transfer System for EMF Reduction“, in *2014 IEEE Wireless Power Transfer Conference*, 2014, SS. 17–20.

- [49] T. Campi, S. Cruciani, V. De Santis, F. Maradei, und M. Feliziani, „Magnetic Field Behavior in a Carbon-Fiber Electrical Vehicle Charged by a Wireless Power Transfer System“, in *2017 International Symposium on Electromagnetic Compatibility - EMC EUROPE*, 2017, SS. 1–6.
- [50] IEEE Standard, „IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields, 0 Hz to 300 GHz“, *IEEE Std C95.1-2019*, SS. 1–312, 2019.
- [51] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)“, SS. 494–522, 1998.
- [52] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), „Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz - 100 kHz)“, SS. 818–836, 2010.
- [53] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), „Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)“, SS. 483–524, 2020.
- [54] Nationale Plattform Elektromobilität (NPE), „Die Deutsche Normungs-Roadmap Elektromobilität 2020 - AG 4 – Normung, Standardisierung und Zertifizierung“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.din.de/resource/blob/235248/600bb90a4d09f8ed9ccd4ec4ea7acdc/roadmap-2020-data.pdf>, [Zugriff am: 16.07.2024].
- [55] International Organization for Standardization (ISO), „ISO 19363:2020, Electrically Propelled Road Vehicles — Magnetic Field Wireless Power Transfer — Safety and Interoperability Requirements“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/73547.html>, [Zugriff am: 03.07.2024].
- [56] International Electrotechnical Commission (IEC), „IEC 61980-1:2020, Electric Vehicle Wireless Power Transfer (WPT) Systems - Part 1: General Requirements“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/249358/iec-61980-1-2020.html>, [Zugriff am: 03.07.2024].
- [57] International Organization for Standardization (ISO), „ISO 15118-20:2022 - Road Vehicles - Vehicle to Grid Communication Interface - Part 20: Network and Application Protocol Requirements“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/250868/iso-15118-20-2022.html>, [Zugriff am: 16.07.2024].

- [58] Europäische Union, „Regelung Nr. 10 der Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UN/ECE) — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit“, [Online]. Verfügbar unter: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42012X0920\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:42012X0920(01)), [Zugriff am: 08.09.2024].
- [59] Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR), „Industrial, Scientific and Medical Equipment Radio-Frequency Disturbance Characteristics – Limits and Methods of Measurement; (CISPR 11:2015, Modified); German Version EN 55011:2016“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/standards/0800391/din-en-55011-vde-0875-11-2017-03.html>, [Zugriff am: 11.07.2024].
- [60] International Electrotechnical Commission (IEC), „DIN EN IEC 62764-1 - Verfahren für die Messung von magnetischen Feldern, die von elektrischen und elektronischen Geräten und Einrichtungen in der Straßenfahrzeugumgebung erzeugt werden, in Bezug auf die Exposition von Personen - Teil 1: Niederfrequente magnetische Felder“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/bs-en-iec-62764-1/367134996>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [61] N. Tesla, „Apparatus for Transmitting Electrical Energy“, U.S. Patent 1 119 732, Dezember, 1914.
- [62] W. C. Brown, „The History of Wireless Power Transmission“, *Solar Energy*, Vol. 56, Nr. 1, SS. 3–21, 1996.
- [63] A. Foote und O. C. Onar, „A Review of High-Power Wireless Power Transfer“, in *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2017, SS. 234–240.
- [64] Y. Zhang, S. Chen, X. Li, und Y. Tang, „Design of High-Power Static Wireless Power Transfer via Magnetic Induction: An Overview“, *CPSS Transactions on Power Electronics and Applications*, Vol. 6, Nr. 4, SS. 281–297, 2021.
- [65] N. Suh, D. Cho, und C. Rim, „Design of On-Line Electric Vehicle (OLEV)“, in *Global Product Development*, A. Bernard, Hrsg. Springer Berlin Heidelberg, 2011, SS. 3–8.
- [66] Y. D. Ko und Y. J. Jang, „The Optimal System Design of the Online Electric Vehicle Utilizing Wireless Power Transmission Technology“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 14, Nr. 3, SS. 1255–1265, 2013.

- [67] D. Patil, M. K. McDonough, J. M. Miller, B. Fahimi, und P. T. Balsara, „Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 4, Nr. 1, SS. 3–37, 2018.
- [68] A. Brecher und D. Arthur, „FTA Report No. 0060 - Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications“, Federal Transit Administration, Tech. Rep. 0060, August 2014.
- [69] Chevrolet/Geo Communications, „Inductive Technology to Charge GM’s New Electric Vehicles“, [Online]. Verfügbar unter: https://web.archive.org/web/20030114191415/http://media.gm.com/division/chevrolet/products/archive_prod_info/97chevy/selec/induc.htm, [Zugriff am: 15.09.2024].
- [70] Q. Li, M. A. E. Andersen, und O. C. Thomsen, „Conduction Losses and Common Mode EMI Analysis on Bridgeless Power Factor Correction“, in *2009 International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2009, SS. 1255–1260.
- [71] Green Car Congress, „ELIX Wireless introduces MDC-based 10kW wireless charging solution“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.greencarcongress.com/2015/07/20150715-elix.html>, [Zugriff am: 15.09.2024].
- [72] Conductix Wampfler, „Charging electric buses quickly and efficiently: bus stops fitted with modular components make “Charge & Go” simple to implement“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.conductix.com/en/news/2013-05-29/charging-electric-buses-quickly-and-efficiently-bus-stops-fitted-modular-components-make-charge-go>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [73] G. Ombach, „Design and Safety Considerations of Interoperable Wireless Charging System for Automotive“, in *2014 Ninth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2014, SS. 1–4.
- [74] A. Westlake, „Qualcomm Reveals BMW i8 Formula E Safety Car With Wireless Charging“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.slashgear.com/qualcomm-reveals-bmw-i8-formula-e-safety-car-with-wireless-charging-25399244/>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [75] K. Woronowicz, R. Czainski, D. Anders, und A. Safaee, „A Method of Operating a Three Phase Primary Winding Structure and a Primary Unit“, United Kingdom Patent GB2520348A, Mai 20, 2015.

- [76] J. Schönberg, „Bombardier’s PRIMOVE Technology Enters Service on Scandinavia’s First Inductively Charged Bus Line“, [Online]. Verfügbar unter: <https://masstransit.network/mass-transit-news/bombardier-transportation-gmbh/primove-inductively-charged-bus>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [77] K. Byrne, „WiTricity Collaborating with Nissan on Wireless Charging for Electric Vehicles“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.businesswire.com/news/home/20170209005093/en/WiTricity-Collaborating-with-Nissan-on-Wireless-Charging-for-Electric-Vehicles>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [78] WiTricity Corporation, „WiTricity acquires Qualcomm Halo“, [Online]. Verfügbar unter: <https://witricity.com/media/press-releases/witricity-acquires-qualcomm-halo>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [79] S. Schaal, „Momentum Dynamics zeigt induktives Ladesystem mit zwei Leistungsklassen“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.electrive.net/2022/05/06/momentum-dynamics-zeigt-induktives-ladesystem-mit-zwei-leistungsklassen/>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [80] EV Charging Stations, „Tesla Is Developing a Wireless Charging System“, [Online]. Verfügbar unter: <https://evchargingstations.com/chargingnews/tesla-is-developing-a-wireless-charging-system/>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [81] Lehrstuhl für Allgemeine Betriebswirtschaftslehre und Internationales Automobilmanagement, „TALAKO - Taxi-Lade-Konzept für den öffentlichen Raum“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.uni-due.de/iam/talako.php>, [Zugriff am: 06.09.2024].
- [82] M. Böhm, „MILAS - Modulare intelligente induktive Ladesysteme für autonome Shuttles“, [Online]. Verfügbar unter: <https://milas-ladesystem.de/>, [Zugriff am: 08.09.2024].
- [83] Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme (ISE), „BiLawE – Bidirektionale, induktive Ladesysteme wirtschaftlich im Energienetz“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/bilawe.html>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [84] TU Braunschweig - Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme, „LISA4CL - Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tu-braunschweig.de/elenia/forschung/forschungsprojekte/lisa4cl>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [85] Friedrich-Alexander-Universität - Lehrstuhl für Automatisierungs-technik und mechatronische Systeme, „E|Profil – Effiziente Prozesse zur Fertigung induktiver Ladesysteme“, [Online]. Verfügbar unter:

- <https://www.faps.fau.de/curforsch/eprofil-effiziente-prozesse-zur-fertigung-induktiver-ladesysteme/>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [86] A. Barzdukas, „Wired vs Wireless Charging Efficiency for EVs: A Comparison“, [Online]. Verfügbar unter: <https://witicity.com/media/blog/what-is-efficiency-how-do-you-measure-it-and-why-should-you-care>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [87] S. Chopra und P. Bauer, „Driving Range Extension of EV With On-Road Contactless Power Transfer — A Case Study“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 60, Nr. 1, SS. 329–338, 2013.
- [88] A. A. S. Mohamed, C. R. Lashway, und O. Mohammed, „Modeling and Feasibility Analysis of Quasi-Dynamic WPT System for EV Applications“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 3, Nr. 2, SS. 343–353, 2017.
- [89] NOW GmbH, „Lane-Charge - Innovationen für eine nachhaltige Mobilität: Semi-dynamische induktive Ladung von E-Fahrzeugen“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.now-gmbh.de/projektfinder/lanecharge/>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [90] Friedrich-Alexander-Universität - Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und mechatronische Systeme, „E|MPower – Automatisierte Fertigungsprozesse für Electric Road Systems zur Elektrifizierung des Schwerlastverkehrs“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.faps.fau.de/curforsch/empower-automatisierte-fertigungsprozesse-fuer-electric-road-systems-zur-elektrifizierung-des-schwerlastverkehrs/>, [Zugriff am: 16.09.2024].
- [91] A. A. Mohamed, A. A. Shaier, H. Metwally, und S. I. Selem, „A Comprehensive Overview of Inductive Pad in Electric Vehicles Stationary Charging“, *Applied Energy*, Vol. 262, S. 114584, 2020.
- [92] M. Mohammad, J. Pries, O. Onar, V. P. Galigekere, G.-J. Su, S. Anwar, J. Wilkins, U. D. Kavimandan, und D. Patil, „Design of an EMF Suppressing Magnetic Shield for a 100-kW DD-Coil Wireless Charging System for Electric Vehicles“, in *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2019, SS. 1521–1527.
- [93] J. Zhou, Y. Gao, C. Zhou, J. Ma, X. Huang, und Y. Fang, „Optimal Power Transfer with Aluminum Shielding for Wireless Power Transfer Systems“, in *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, 2017, SS. 1–4.

- [94] L. Tan, J. Li, C. Chen, C. Yan, J. Guo, und X. Huang, „Analysis and Performance Improvement of WPT Systems in the Environment of Single Non-Ferromagnetic Metal Plates“, *Energies*, Vol. 9, Nr. 8, 2016.
- [95] L. Tan, K. E. I. Elnail, M. Ju, und X. Huang, „Comparative Analysis and Design of the Shielding Techniques in WPT Systems for Charging EVs“, *Energies*, Vol. 12, Nr. 11, 2019.
- [96] S. Kim, H.-H. Park, J. Kim, J. Kim, und S. Ahn, „Design and Analysis of a Resonant Reactive Shield for a Wireless Power Electric Vehicle“, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 62, Nr. 4, SS. 1057–1066, 2014.
- [97] F. Y. Lin, A. Zaheer, M. Budhia, und G. A. Covic, „Reducing Leakage Flux in IPT Systems by Modifying Pad Ferrite Structures“, in *2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2014, SS. 1770–1777.
- [98] T. Campi, S. Cruciani, F. Maradei, und M. Feliziani, „Active Coil System for Magnetic Field Reduction in an Automotive Wireless Power Transfer System“, in *2019 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI)*, 2019, SS. 189–192.
- [99] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. W. Lee, W. Y. Lee, J. Huh, und C. T. Rim, „Generalized Active EMF Cancel Methods for Wireless Electric Vehicles“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, Nr. 11, SS. 5770–5783, 2014.
- [100] M.-H. Park, J. Baek, Y. Jeong, und G.-W. Moon, „An Interleaved Totem-Pole Bridgeless Boost PFC Converter with Soft-Switching Capability Adopting Phase-Shifting Control“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 34, Nr. 11, SS. 10 610–10 618, 2019.
- [101] C. Liang, G. Yang, F. Yuan, X. Huang, Y. Sun, J. Li, und K. Song, „Modeling and Analysis of Thermal Characteristics of Magnetic Coupler for Wireless Electric Vehicle Charging System“, *IEEE Access*, Vol. 8, SS. 173 177–173 185, 2020.
- [102] C. Wen, Q. Xu, M. Chen, Z. Xiao, J. Wen, Y. Luo, X. Zhao, Y. Liang, und K. Liang, „Thermal Analysis of Coupled Resonant Coils for an Electric Vehicle Wireless Charging System“, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 13, Nr. 8, 2022.
- [103] M. Tiemann, M. Clemens, und B. Schmuelling, „Model Order Reduction for Thermal Analysis of Wireless Power Transfer Systems Considering Radiation“, in *2022 23rd International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMPUMAG)*, 2022, SS. 1–4.

- [104] H. Allamehzadeh, „Wireless Power Transfer (WPT) Fundamentals with Resonant Frequency-Dependent Parameters, Energy Transfer Efficiency, and Green Technology Applications“, in *2021 IEEE 48th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2021, SS. 0036–0040.
- [105] C. Zhao, Z. Wang, J. Du, J. Wu, S. Zong, und X. He, „Active Resonance Wireless Power Transfer System Using Phase Shift Control Strategy“, in *2014 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition - APEC 2014*, 2014, SS. 1336–1341.
- [106] H. Ben Sassi, F. Errahimi, N. Essbai, und C. Alaoui, „V2G and Wireless V2G concepts: State of the Art and Current Challenges“, in *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*, 2019, SS. 1–5.
- [107] D. Ahmad, S. Z. Hassan, A. Zahoor, T. Kamal, T. Murtaza, A. Irfan, A. Abbas, und M. A. Khan, „A Bidirectional Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Charging in V2G System“, in *2019 International Conference on Electrical, Communication, and Computer Engineering (ICECCE)*, 2019, SS. 1–6.
- [108] Electreon, „Arena del Futuro“, [Online]. Verfügbar unter: <https://electreon.com/projects/arena-of-the-future>, [Zugriff am: 06.09.2024].
- [109] H. Sundelin, M. Kasskawo, und P. Carlenarson, „SmartRoad Gotland“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.smartroadgotland.com/>, [Zugriff am: 09.09.2024].
- [110] Y. Vassiliou, „FABRIC - FeAsiBility analysis and development of on-Road chargIng solutions for future electric vehiCles“, [Online]. Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/605405/reporting>, [Zugriff am: 09.09.2024].
- [111] Centre of Excellence for Low Carbon and Fuel Cell Technologies (cenex), „WiCET - Wireless Charging of Electric Taxis“, [Online]. Verfügbar unter: <https://wicet.co.uk/>, [Zugriff am: 09.09.2024].
- [112] B. Pierce, „Electric Taxis in Sweden Charge With Innovative Wireless EV Charging from InductEV“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.inductev.com/blog/electric-taxis-in-sweden-charge-with-innovative-wireless-ev-charging-from-inductev-bkhsf>, [Zugriff am: 09.09.2024].
- [113] Conductix-Wampfler GmbH, „WirelessCharger 3.0 – Induktives, kontaktloses Laden“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.conductix.de/de/produkte/inductive-power-transfer/wirelesscharger-30-induktives-kontaktloses-laden>, [Zugriff am: 10.09.2024].

- [114] Wiferion PULS GmbH, „Induktives Laden von FTS / AGV“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wiferion.com/anwendungen/induktives-laden-agv-fts-fahrerlosen-transportssystemen/>, [Zugriff am: 10.09.2024].
- [115] INTIS - Integrated Infrastructure Solutions GmbH, „INTIS easyCharge - die induktive Ladelösung für jeden E-Scooter“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.intis.de/mikromobilitaet.html>, [Zugriff am: 09.09.2024].
- [116] J. Skorvaga, M. Frivaldsky, und M. Pavelek, „Design of a Wireless Charging System for e-Scooter“, *Elektronika ir Elektrotechnika*, Vol. 27, Nr. 2, SS. 40–48, 2021.
- [117] Oak Ridge National Laboratory, „Wireless Charging - Get on the Bus“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ornl.gov/news/wireless-charging-get-bus>, [Zugriff am: 15.09.2024].
- [118] N. Suh, „Fundamentals of Design and Deployment of Large Complex Systems: OLEV, MH, and Mixalloy“, *Journal of Integrated Design & Process Science*, Vol. 16, SS. 7–28, 07 2012.
- [119] X. Wang, C. Jiang, und S. Wang, „Research on Interoperability of Coupling Structure for UAV-WPT System“, in *2020 8th International Conference on Power Electronics Systems and Applications (PESA)*, 2020, SS. 1–5.
- [120] S. Aldhaher, P. D. Mitcheson, J. M. Arteaga, G. Kkelis, und D. C. Yates, „Light-Weight Wireless Power Transfer for Mid-Air Charging of Drones“, in *2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)*, 2017, SS. 336–340.
- [121] A. Burkert und B. Schmülling, „Challenges of Conceiving a Charging Infrastructure for Electric Vehicles - An Overview“, in *2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2019, SS. 1–5.
- [122] H. Proff, M. Clemens, P. J. Marrón, und B. Schmülling, *Induktive Taxiladung für den öffentlichen Raum - Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*, 1. Aufl. Springer Gabler Wiesbaden, 2023.
- [123] S. Jeschke, M. Maarleveld, J. Bärenfänger, B. Schmülling, und A. Burkert, „Challenges in EMC Testing of EV and EVSE Equipment for Inductive Charging“, in *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*, 2018, SS. 967–971.
- [124] Bundesamt für Strahlenschutz (BfS), „Rechtliche Regelungen und Grenzwerte für den Bereich der niederfrequenten Felder im europäischen Vergleich“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/netzausbau/>

- schutz/grenzwerte-europa/grenzwerte-europa_node.html, [Zugriff am: 25.07.2024].
- [125] J. C. Maxwell, *A Treatise On Electricity And Magnetism*. University of Oxford, 1873.
 - [126] F. Gustrau, *Electromagnetic Design - Theorie und Simulation elektromagnetischer Felder*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2023.
 - [127] A. J. Schwab, *Begriffswelt der Feldtheorie - Elektromagnetische Felder, Maxwell-Gleichungen, Gradient, Rotation, Divergenz*. Springer Vieweg Berlin, 2019, Nr. 8.
 - [128] S. Blume, *Theorie Elektromagnetische Felder*. Heidelberg: Hüthig, 1988.
 - [129] Europäisches Parlament und der Rat, „Richtlinie 2014/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit“, [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0030>, [Zugriff am: 28.09.2024].
 - [130] N. Borges Carvalho, A. Georgiadis, A. Costanzo, H. Rogier, A. Collado, J. A. García, S. Lucyszyn, P. Mezzanotte, J. Kracek, D. Masotti, A. J. S. Boaventura, M. de las Nieves Ruíz Lavin, M. Piñuela, D. C. Yates, P. D. Mitcheson, M. Mazanek, und V. Pankrac, „Wireless Power Transmission: R & D Activities Within Europe“, *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Vol. 62, Nr. 4, SS. 1031–1045, 2014.
 - [131] A. Costanzo, M. Dionigi, D. Masotti, M. Mongiardo, G. Monti, L. Tarricone, und R. Sorrentino, „Electromagnetic Energy Harvesting and Wireless Power Transmission: A Unified Approach“, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 102, Nr. 11, SS. 1692–1711, 2014.
 - [132] J. H. Kim, B.-S. Lee, J.-H. Lee, S.-H. Lee, C.-B. Park, S.-M. Jung, S.-G. Lee, K.-P. Yi, und J. Baek, „Development of 1-MW Inductive Power Transfer System for a High-Speed Train“, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 62, Nr. 10, SS. 6242–6250, 2015.
 - [133] C. T. Rim und C. Mi, *Wireless Power Transfer for Electric Vehicles and Mobile Devices*. Wiley-IEEE Press, 2017.
 - [134] International Organization for Standardization (ISO), „ISO 14117:2019 - Active Implantable Medical Devices — Electromagnetic Compatibility — EMC Test Protocols for Implantable Cardiac Pacemakers, Implantable Cardioverter Defibrillators and Cardiac Resynchronization Devices“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iso.org/standard/73915.html>, [Zugriff am: 16.07.2024].

- [135] International Electrotechnical Commission (IEC), „IEC 61000-4-6:2023 - Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-6: Testing and Measurement Techniques - Immunity to Conducted Disturbances, Induced by Radio-Frequency Fields“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/251917/iec-61000-4-6-2023.html>, [Zugriff am: 11.07.2024].
- [136] D. Kuerschner, G. Ombach, L. Percebon, und S. Mathar, „Magnetic Leakage Field Study of a 7 kW Wireless Electric Vehicle Charging System“, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 8, Nr. 2, SS. 501–510, 2016.
- [137] A. Burkert und B. Schmülling, „Comparison of Two Power Factor Correction Topologies on Conducted Emissions in Wireless Power Transfer Systems for Electric Vehicles“, in *2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2021, SS. 1–6.
- [138] World Health Organization (WHO), „The International EMF Project“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.who.int/initiatives/the-international-emf-project>, [Zugriff am: 18.09.2024].
- [139] P. Vecchia, „Exposure of Humans to Electromagnetic Fields. Standards and Regulations“, *Ann Ist Super Sanita*, Vol. 43, Nr. 3, SS. 260–267, 2007, PMID: 17938457.
- [140] R. D. Saunders und J. G. Jefferys, „A Neurobiological Basis for ELF Guidelines“, *Health Physics*, Vol. 92, Nr. 6, SS. 596–603, 2007, PMID: 17495661.
- [141] International Agency for Research on Cancer (IARC), „Non-ionizing Radiation, Part 1: Static and Extremely Low-frequency (ELF) Electric and Magnetic Fields“, *IARC Monographs on the Identification of Carcinogenic Hazards to Humans*, Vol. 80, 2002.
- [142] A. Ahlbom, N. Day, M. Feychting, E. Roman, J. Skinner, J. Dockerty, M. Linet, M. McBride, J. Michaelis, J. H. Olsen, T. Tynes, und P. K. Verkasalo, „A Pooled Analysis of Magnetic Fields and Childhood Leukaemia“, *Br J Cancer*, Vol. 83, Nr. 5, SS. 692–698, 2000, PMID: 10944614.
- [143] S. Greenland, A. R. Sheppard, W. T. Kaune, C. Poole, und M. A. Kelsh, „A Pooled Analysis of Magnetic Fields, Wire Codes, and Childhood Leukemia. Childhood Leukemia-EMF Study Group“, *Epidemiology*, Vol. 11, Nr. 6, SS. 624–634, 2000.
- [144] International Agency for Research on Cancer (IARC), *Non-Ionizing Radiation, Part 2: Radiofrequency Electromagnetic Fields*, Serie IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Lyon, France: IARC Press, 2013, Vol. 102.

- [145] World Health Organization, *Electromagnetic Fields (300 Hz to 300 GHz)*. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2000.
- [146] A. Hirata, Y. Diao, T. Onishi, K. Sasaki, S. Ahn, D. Colombi, V. De Santis, I. Laakso, L. Giaccone, W. Joseph, E. A. Rashed, W. Kainz, und J. Chen, „Assessment of Human Exposure to Electromagnetic Fields: Review and Future Directions“, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 63, Nr. 5, SS. 1619–1630, 2021.
- [147] K. H. Mild und M. Sandström, „Electromagnetic Fields in Working Life - A Guide to Risk Assessment“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.etui.org/sites/default/files/Guide%20EMF%20up-dated%20version%2019%20June%202015.pdf>, [Zugriff am: 25.07.2024].
- [148] Europäischer Rat, „1999/519/EG - Empfehlung des Rates zur Begrenzung der Exposition der Bevölkerung gegenüber elektromagnetischen Feldern (0 Hz — 300 GHz)“, [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:31999H0519>, [Zugriff am: 25.07.2024].
- [149] Europäisches Parlament und der Rat, „Richtlinie 2013/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (elektromagnetische Felder)“, [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:179:0001:0021:de:PDF>, [Zugriff am: 25.07.2024].
- [150] Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchV), „26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder - 26. BImSchV)“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_26/26._BImSchV.pdf, [Zugriff am: 08.07.2024].
- [151] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, „DGUV Vorschrift 15 (BGV B11): Elektromagnetische Felder“, [Online]. Verfügbar unter: <https://medien.bgetem.de/medienportal/artikel/REdVVbWMTU->, [Zugriff am: 26.07.2024].
- [152] A. David, M. Tiemann, N. Haussmann, S. Stroka, M. Clemens, und B. Schmülling, „Electromagnetic Compatibility Evaluation of Wireless Charging Systems for Public Spaces: Wireless Power Transfer for Taxis“, *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 30, Nr. 1, SS. 59–67, 2024.
- [153] A. David, M. Tiemann, B. Schmülling, N. Haussmann, S. Stroka, und M. Clemens, „Electromagnetic Compatibility Evaluation of Wireless Charging Systems for Public Spaces“, in *2022 Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART)*, 2022, SS. 1–6.

- [154] A. David, M. Tiemann, M. Clemens, und B. Schmülling, „Magnetic Field Analysis of 50 kW Wireless Power Transfer System for Heavy Duty Vehicles“, in *IEEE 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMUPMAG 2023)*, 2023.
- [155] A. David, M. Tiemann, M. Clemens, und B. Schmülling, „Magnetic Field Analysis of 50 kW Wireless Power Transfer System for Heavy Duty Vehicles“, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. PP, SS. 1–1, 01 2023.
- [156] S. Kim, G. A. Covic, und J. T. Boys, „Tripolar Pad for Inductive Power Transfer Systems for EV Charging“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 32, Nr. 7, SS. 5045–5057, 2017.
- [157] H. Feng, R. Tavakoli, O. C. Onar, und Z. Pantic, „Advances in High-Power Wireless Charging Systems: Overview and Design Considerations“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 6, Nr. 3, SS. 886–919, 2020.
- [158] TRIDELTA Weichferrite GmbH, „Manifer - Werkstoffe für hohe Aussteuerung“, [Online]. Verfügbar unter: <https://tridelta-weichferrite.de/media/37/download/Manifer-Werkstoffe%20f%C3%BCr%20Leistungsanwendungen.pdf?v=1&inline=1>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [159] Rudolf Pack GmbH & Co. KG, „Rupalit Classic Plus“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.packlitzwire.de/produkte/hochfrequenzlitzen/rupalit-classic-plus/>, [Zugriff am: 25.09.2024].
- [160] LEVC - London Electric Vehicle Company, „TX Electric Taxi“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.levc.com/new-models/tx-taxi-overview/>, [Zugriff am: 07.07.2024].
- [161] O. P. Gandhi und J.-Y. Chen, „Numerical Dosimetry at Power-Line Frequencies Using Anatomically-Based Models“, in *Bioelectromagnetics Suppl. I*, 1992, SS. 43–60.
- [162] A. Taflove und S. C. Hagness, „Finite-Difference Time-Domain Solution of Maxwell’s Equations“, in *John Wiley and Sons Inc.*, 2016, SS. 1–33.
- [163] Narda Safety Test Solutions, „Breitband Messgeräte - ELT-400“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.narda-sts.com/de/produkte/emf-breitband-messgeraete/elt-400/>, [Zugriff am: 03.07.2024].
- [164] S. W. Park, B. J. Choi, J. H. Cho, und J. W. Kim, „Magnetic Field Measurement of Wireless Charging System According to State of Charge“, in *32nd International Union of Radio Science (U.R.S.I) General Assembly and Scientific Symposium (GASS)*, 2017.

- [165] A. Ruddle, L. Low, R. Armstrong, L. Dawson, und A. Rowell, „Investigation of Human Exposure to Magnetic Fields From Electrical Powertrains: Measured Exposure Levels and Simulated Impact on Human Body“, in *5th IET Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2014)*, 11 2014.
- [166] J. Li, Z. Xu, L. Haiming, Z. Yue, und M. Junjie, „Magnetic Field Exposure Evaluation for Wireless Charging System of Vehicles“, *DEStech Transactions on Engineering and Technology Research*, 2017.
- [167] INTIS - Integrated Infrastructure Solutions GmbH, „Induktive Energieübertragung“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.intis.de/induktive-energieuebertragung.html>, [Zugriff am: 07.07.2024].
- [168] Deutsches Institut für Normen e.V. (DIN), „Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren medizinischen Geräten (AIMD) gegenüber elektromagnetischen Feldern - Teil 2-1: Besondere Beurteilung für Arbeitnehmer mit Herzschrittmachern; Deutsche Fassung EN 50527-2-1:2016“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dinmedia.de/de/norm/din-en-50527-2-1/279308133>, [Zugriff am: 07.07.2024].
- [169] M. Zang, C. Cimala, M. Clemens, J. Dutiné, T. Timm, und B. Schmülling, „A Co-Simulation Scalar-Potential Finite Difference Method for the Numerical Analysis of Human Exposure to Magneto-Quasi-Static Fields“, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, Nr. 6, SS. 1–4, 2017.
- [170] M. Zang, M. Clemens, C. Cimala, J. Streckert, und B. Schmülling, „Simulation of Inductive Power Transfer Systems Exposing a Human Body With Two-Step Scaled-Frequency FDTD Methods“, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 53, Nr. 6, SS. 1–4, 2017.
- [171] A. Christ, W. Kainz, und et al., „The Virtual Family–Development of Surface-Based Anatomical Models of Two Adults and Two Children for Dosimetric Simulations“, in *Physics in medicine and biology*, Vol. 55, Nr. 2, 2010, SS. N23–38.
- [172] A. A. S. Mohamed, A. Meintz, P. Schrafel, und A. Calabro, „In-Vehicle Assessment of Human Exposure to EMFs from 25-kW WPT System Based on Near-Field Analysis“, in *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2018, SS. 1–6.
- [173] M. Suzuki, K. Ogawa, F. Moritsuka, T. Shijo, H. Ishihara, Y. Kanekiyo, K. Ogura, S. Obayashi, und M. Ishida, „Design Method for Low Radiated Emission of 85 kHz Band 44 kW Rapid Charger for Electric Bus“, in *2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2017, SS. 3695–3701.

- [174] A. U. Ibrahim, W. Zhong, und M. D. Xu, „A 50-kW Three-Channel Wireless Power Transfer System With Low Stray Magnetic Field“, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 36, Nr. 9, SS. 9941–9954, 2021.
- [175] M. Mohammad, J. Pries, O. Onar, V. P. Galigekere, G.-J. Su, S. Anwar, J. Wilkins, U. D. Kavimandan, und D. Patil, „Design of an EMF Suppressing Magnetic Shield for a 100-kW DD-Coil Wireless Charging System for Electric Vehicles“, in *2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 2019, SS. 1521–1527.
- [176] J. M. Miller und A. Daga, „Elements of Wireless Power Transfer Essential to High Power Charging of Heavy Duty Vehicles“, *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, Vol. 1, Nr. 1, SS. 26–39, 2015.
- [177] M. Mohammad, J. L. Pries, O. C. Onar, V. P. Galigekere, G.-J. Su, und J. Wilkins, „Comparison of Magnetic Field Emission from Unipolar and Bipolar Coil-Based Wireless Charging Systems“, in *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 2020, SS. 1201–1207.
- [178] M. S. A. Chowdhury und X. Liang, „Design and Performance Evaluation for a New Power Pad in Electric Vehicles Wireless Charging Systems“, *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, Vol. 43, Nr. 3, SS. 146–156, 2020.
- [179] B. Kroposki, B. Johnson, Y. Zhang, V. Gevorgian, P. Denholm, B.-M. Hodge, und B. Hannegan, „Achieving a 100% Renewable Grid: Operating Electric Power Systems with Extremely High Levels of Variable Renewable Energy“, *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 15, Nr. 2, SS. 61–73, 2017.
- [180] M. Williamson, „Air Power the Rise of Electric Aircraft“, *Engineering & Technology*, Vol. 9, Nr. 10, SS. 77–79, 2014.
- [181] F. M. Bhutta, „Application of Smart Energy Technologies in Building Sector — Future Prospects“, in *2017 International Conference on Energy Conservation and Efficiency (ICECE)*, 2017, SS. 7–10.
- [182] S. Habib, M. M. Khan, F. Abbas, L. Sang, M. U. Shahid, und H. Tang, „A Comprehensive Study of Implemented International Standards, Technical Challenges, Impacts and Prospects for Electric Vehicles“, *IEEE Access*, Vol. 6, SS. 13 866–13 890, 2018.
- [183] S. Li und C. C. Mi, „Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications“, *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, Vol. 3, Nr. 1, SS. 4–17, 2015.

- [184] Z. Jiang, H. Tian, M. J. Beshir, R. Sibagatullin, und A. Mazloomzadeh, „Statistical Analysis of Electric Vehicles Charging, Station Usage and Impact on the Grid“, in *2016 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 2016, SS. 1–5.
- [185] R. Faria, P. Moura, J. Delgado, und A. T. de Almeida, „Managing the Charging of Electrical Vehicles: Impacts on the Electrical Grid and on the Environment“, *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, Vol. 6, Nr. 3, SS. 54–65, 2014.
- [186] G. Celli, F. Pilo, G. Monni, und G. G. Soma, „Optimal Multi-Objective Allocation of Fast Charging Stations“, in *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2018.
- [187] F. Hausler, E. Crisostomi, A. Schlote, I. Radusch, und R. Shorten, „Stochastic Park-and-Charge Balancing for Fully Electric and Plug-in Hybrid Vehicles“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 15, Nr. 2, SS. 895–901, 2014.
- [188] M. Brenna, F. Foiadelli, M. Longo, und D. Zaninelli, „e-Mobility Forecast for the Transnational e-Corridor Planning“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 17, Nr. 3, SS. 680–689, 2016.
- [189] A. Shukla, K. Verma, und R. Kumar, „Consumer Perspective Based Placement of Electric Vehicle Charging Stations by Clustering Techniques“, in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, 2016, SS. 1–6.
- [190] J. Zhang, H. Zhou, H. Li, H. Liu, B. Li, C. Liu, und J. Yan, „Multi-Objective Planning of Charging Stations Considering Vehicle Arrival Hot Map“, in *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, 2017, SS. 1–6.
- [191] X. Chen, T. Jiang, M. Bi, Y. Wang, und H. Gao, „A Review of Condition Assessment of Charging Infrastructure for Electrical Vehicles“, in *IET International Conference on Intelligent and Connected Vehicles (ICV 2016)*, 2016, SS. 1–4.
- [192] H. Hirsch, S. Jeschke, L. Wei, M. Trautmann, J. Bärenfänger, M. Maarleveld, J. Heyen, und A. Darrat, „Latest Development of the National and International EMC-Standards for Electric Vehicles and Their Charging Infrastructure“, in *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2015, SS. 708–713.

- [193] M. House und D. Wright, „Funding an Electric Vehicle Charging Infrastructure from Associated Health Benefits“, in *2016 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)*, 2016, SS. 1–5.
- [194] T. Ma und O. A. Mohammed, „Optimal Charging of Plug-in Electric Vehicles for a Car-Park Infrastructure“, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, Nr. 4, SS. 2323–2330, 2014.
- [195] B. Ferguson, V. Nagaraj, E. C. Kara, und M. Alizadeh, „Optimal Planning of Workplace Electric Vehicle Charging Infrastructure with Smart Charging Opportunities“, in *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, 2018, SS. 1149–1154.
- [196] M. Porru, A. Serpi, M. Mureddu, und A. Damiano, „A Combined Planning and Design Approach of a Public Charging Infrastructure for Electric Vehicles“, in *2018 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2018, SS. 1–5.
- [197] K. van Montfort, G. Van Der Poel, J. Visser, und R. van den Hoed, „Prediction of Necessary Public Charging Infrastructure of Electric Vehicles“, in *6th Hybrid and Electric Vehicles Conference (HEVC 2016)*, 2016, SS. 1–4.
- [198] D. Schuler, G. Gabba, L. Küng, und V. Peter, „How a City Prepares to E-Mobility in Terms of Public Charging Infrastructure Case Study — The City of Zurich“, in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013, SS. 1–7.
- [199] M. Yilmaz und P. T. Krein, „Review of Charging Power Levels and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles“, in *2012 IEEE International Electric Vehicle Conference*, 2012, SS. 1–8.
- [200] European Union, „Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the Deployment of Alternative Fuels Infrastructure“, [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2014/94/oj>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [201] Europäisches Parlament und der Rat, „Verordnung (EU) 2023/1804 über den Aufbau der Infrastruktur für alternative Kraftstoffe und zur Aufhebung der Richtlinie 2014/94/EU“, [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1804>, [Zugriff am: 27.08.2024].
- [202] Die Bundesregierung, „Masterplan Ladeinfrastruktur der Bundesregierung - Ziele und Maßnahmen für den Ladeinfrastrukturaufbau bis 2030“, [Online]. Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/>

- G/masterplan-ladeinfrastruktur.pdf?__blob=publicationFile, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [203] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland“, [Online]. Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderrichtlinie-ladeinfrastruktur-elektrofahrzeuge.html>, [Zugriff am: 26.08.2024].
 - [204] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Pkw-Bestand in Deutschland nach Kraftstoffarten“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/bestand_node.html, [Zugriff am: 12.07.2024].
 - [205] Bundesnetzagentur, „Elektromobilität: Öffentliche Ladeinfrastruktur“, [zuletzt aufgerufen am 26.08.2024]. [Online]. Available: <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/E-Mobilitaet/start.html>
 - [206] S. Neumeier und T. Osigus, „Ladestationen für Elektroautos durchschnittlich sieben Fahrminuten entfernt“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.deutschlandatlas.bund.de/DE/Karten/Wie-wir-uns-bewegen/115-Erreichbarkeit-Ladestationen-EAutos.html>, [Zugriff am: 26.08.2024].
 - [207] T. Rink, K. Reinart, und M. Mdivnishvili, „Zahl der Woche: 65 Prozent der Deutschen Würden ihr E-Auto vor Allem Zuhause Laden“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bdew.de/presse/presseinformationen/zahl-der-woche-65-prozent/>, [Zugriff am: 15.07.2024].
 - [208] ElektroMobilität NRW, „Förderprogramme für Privatpersonen - Ladestationen und Wallboxen“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.elektronomobilitaet.nrw/privatpersonen/foerderung-fuer-privatpersonen/>, [Zugriff am: 26.08.2024].
 - [209] U.S. Department of Energy - Energy Efficiency and Renewable Energy, „Electric Vehicle Charging Station Locations“, [Online]. Verfügbar unter: https://afdc.energy.gov/fuels/electricity-locations#/find/nearest?fuel=ELEC&ev_levels=all, [Zugriff am: 15.07.2024].
 - [210] M. Nicholas, D. Hall, und N. Lutsey, „Quantifying the Electric Vehicle Charging Infrastructure Gap across U.S. Markets“, [Online]. Verfügbar unter: <https://theicct.org/publication/quantifying-the-electric-vehicle-charging-infrastructure-gap-across-u-s-markets/>, [Zugriff am: 15.07.2024].

- [211] E. Wood, A. Bedir, N. Crisostomo, J. Allen, und C. Rames, „California Plug-In Electric Vehicle Infrastructure Projections: 2017-2025 - Future Infrastructure Needs for Reaching the State’s Zero Emission-Vehicle Deployment Goals“, Tech. Rep., 2018.
- [212] European Alternative Fuels Observatory, „EAFO Analysis: Trends in EV Charging Infrastructure Across Europe“, [Online]. Verfügbar unter: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/general-information/news/eafo-analysis-trends-ev-charging-infrastructure-across-europe>, [Zugriff am: 27.08.2024].
- [213] NOW GmbH, „Länderdossier Norwegen - Beschreibung zum Stand der Elektromobilität in Norwegen“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/12/NOW_E-Mobilitaet-international_Dossier-Norwegen.pdf, [Zugriff am: 27.08.2024].
- [214] Dutch National Charging Infrastructure Agenda, „Dutch National Charging Infrastructure Agenda - Brochure“, [Online]. Verfügbar unter: <https://english.rvo.nl/sites/default/files/2023-07/Brochure%20Dutch%20National%20Charging%20Infrastructure%20Agenda%20online.pdf>, [Zugriff am: 27.08.2024].
- [215] NOW GmbH, „Länderdossier Niederlande - Beschreibung zum Stand der Elektromobilität in Niederlande“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2023/12/NOW_E-Mobilitaet-international_Dossier-Niederlande.pdf, [Zugriff am: 27.08.2024].
- [216] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Jahresbilanz des Fahrzeugbestandes am 1. Januar 2019“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Fahrzeuge/Bestand/b_jahresbilanz, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [217] International Energy Agency, „Global EV Outlook 2024 - Moving Towards Increased Affordability“, [Online]. Verfügbar unter: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/a9e3544b-0b12-4e15-b407-65f5c8ce1b5f/GlobalEVOoutlook2024.pdf>, [Zugriff am: 27.08.2024].
- [218] Ministry of Economy, Trade and Industry, „Overview of Japan’s Green Growth Strategy Through Achieving Carbon Neutrality in 2050“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mofa.go.jp/files/100153688.pdf>, [Zugriff am: 27.08.2024].
- [219] Ministry of Heavy Industries, „Fame II - Faster Adoption and Manufacturing of Electric Vehicles in India“, [Online]. Verfügbar unter: <https://heavyindustries.gov.in/fame-ii>, [Zugriff am: 27.08.2024].

- [220] M. Straka, P. De Falco, G. Ferruzzi, D. Proto, G. Van Der Poel, S. Khormali, und L. Buzna, „Predicting Popularity of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Urban Context“, *IEEE Access*, Vol. 8, SS. 11 315–11 327, 2020.
- [221] Y. Zhang, H. Zhao, und H. Li, „The Study on City General Planning and Management Information System Based on GIS“, in *2010 International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, Vol. 8, 2010, SS. V8–131–V8–134.
- [222] M. Bonan, S. Daenner, C. A. Mayer, und T. Warnecke, „Genehmigungsprozess der E-Ladeinfrastruktur in Kommunen: Strategische und rechtliche Fragen“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.now-gmbh.de/wp-content/uploads/2020/09/genehmigungsprozess-der-e-ladeinfrastruktur-in-kommunen_strategische-und-rechtliche-fragen.pdf, [Zugriff am: 22.10.2024], Tech. Rep.
- [223] T. Gehrlein und B. Schultes, *Praxishandbuch Ladesäulen-Infrastruktur: Leitfaden für Landkreise, Kommunen und Energieversorger*. Norderstedt, Germany: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2017.
- [224] Y. Dai und M. Liu, „An Electricity Demand-Based Planning of Electric Vehicle Charging Infrastructure“, *Wuhan University Journal of Nature Sciences*, Vol. 22, Nr. 5, SS. 449–454, 2017.
- [225] S. Habib, M. M. Khan, K. Hashmi, M. Ali, und H. Tang, „A Comparative Study of Electric Vehicles Concerning Charging Infrastructure and Power Levels“, in *2017 International Conference on Frontiers of Information Technology (FIT)*, 2017, SS. 327–332.
- [226] L. Hutchinson, B. Waterson, B. Anvari, und D. Naberezhnykh, „Potential of Wireless Power Transfer for Dynamic Charging of Electric Vehicles“, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 13, Nr. 1, SS. 3–12, 2019.
- [227] International Electrotechnical Commission (IEC), „IEC TS 61851-3-1:2023 - Electric Vehicle Conductive Charging System - Part 3-1: DC EV Supply Equipment Where Protection Relies on Double or Reinforced Insulation - General Rules and Requirements for Stationary Equipment“, [Online]. Verfügbar unter: <https://webstore.iec.ch/en/publication/26777>, [Zugriff am: 16.07.2024].
- [228] International Electrotechnical Commission (IEC), „DIN EN IEC 62196 - Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker – Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/normen/0600462/din-en-iec-62196-1-vde-0623-5-1-2023-12.html>, [Zugriff am: 16.07.2024].

- [229] International Electrotechnical Commission (IEC), „DIN EN IEC 62752 - La-
deleitungsintegrierte Steuer- und Schutzeinrichtungen für die Ladebetriebs-
art 2 von Elektro-Straßenfahrzeugen (IC-CPD)“, [Online]. Verfügbar un-
ter: <https://www.vde-verlag.de/normen/0600355/din-en-62752-vde-0666-10-2022-07.html>, [Zugriff am: 16.07.2024].
- [230] International Electrotechnical Commission (IEC), „IEC 62893-1:2017 - Chargin-
g Cables for Electric Vehicles for Rated Voltages up to and Including
0,6/1 kV - Part 1: General Requirements“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/225140/iec-62893-1-2017.html>, [Zugriff am:
16.07.2024].
- [231] International Organization for Standardization (ISO), „DIN EN ISO
17409:2020-10 - Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Kabelgebundene
Energieübertragung - Sicherheitsanforderungen“, [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.iso.org/standard/72880.html>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [232] International Electrotechnical Commission (IEC), „IEC 60364-7-722:2018 -
Low-Voltage Electrical Installations - Part 7-722: Requirements for Spe-
cial Installations or Locations - Supplies for Electric Vehicles“, [Online].
Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/iec-normen/225937/iec-60364-7-722-2018.html>, [Zugriff am: 16.07.2024].
- [233] BMW Group, „Laden noch einfacher als Tanken.“, [Online]. Verfügbar unter:
<https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0281369DE/laden-noch-einfacher-als-tanken?language=de>, [Zugriff am: 16.07.2024].
- [234] A. A. der Maur, N. Brüggeshemke, und M. Kutschera, „Lade-Report - Ent-
wicklung der öffentlich zugänglichen Ladeinfrastruktur für die Elektromobili-
tät sowie Vergleich der Ladetarife in Deutschland“, Tech. Rep., 2020.
- [235] H. H. Kvisle und B. A. Myklebust, „Development of Charging Station Data
Services for New User Groups“, in *2013 World Electric Vehicle Symposium
and Exhibition (EVS27)*, 2013, SS. 1–6.
- [236] M. Hollenbach, „Bautzen parkt bald ohne Kleingeld“, [Online]. Verfügbar
unter: <https://www.saechsische.de/plus/bautzen-parkt-bald-ohne-kleingeld-5035673.html>, [Zugriff am: 30.11.2020].
- [237] Playfair-Parking, „Was kostet ein Parkscheinautomat?“, [Online].
Verfügbar unter: <https://playfair-parking.de/ratgeber/was-kostet-ein-parkscheinautomat/>, [Zugriff am: 16.07.2024].

- [238] Bundesministerium der Justiz, „Mess- und Eichverordnung (MessEV)“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.gesetze-im-internet.de/mesev/BJNR201100014.html>, [Zugriff am: 22.08.2024].
- [239] S. Divyapriya, Amutha, und R. Vijayakumar, „Design of Residential Plug-in Electric Vehicle Charging Station with Time of Use Tariff and IoT Technology“, in *2018 International Conference on Soft-computing and Network Security (ICSNS)*, 2018, SS. 1–5.
- [240] P. Gagnol, P. Jochem, M. Pierre, und W. Fichtner, „CROME: The French and German Field Demonstration of the Interoperable Mobility with EVs“, in *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)*, 2013, SS. 1–8.
- [241] Verband der Automobilindustrie e.V., „Position — Recommendations for a Successful Ramp-up of the Charging Infrastructure for Electric Vehicles by 2030“, [Online]. Verfügbar unter: www.vda.de/de/services/Publikationen/positionspapierladeinfrastruktur, [Zugriff am: 27.11.2024].
- [242] Dennis Berger, „Gebremste Verkehrswende: Tausende Ladesäulen in Warteschleife“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.zdf.de/nachrichten/wirtschaft/unternehmen/aral-kritik-ladesaeulen-infrastruktur-100.html>, [Zugriff am: 26.08.2024].
- [243] Land Nordrhein-Westfalen, „Bauordnung für das Land Nordrhein-Westfalen (Landesbauordnung 2018 – BauO NRW 2018“, [Online]. Verfügbar unter: https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=74820170630142752068, [Zugriff am: 18.07.2024].
- [244] Land Nordrhein-Westfalen, „Verordnung über bautechnische Prüfungen“, [Online]. Verfügbar unter: https://recht.nrw.de/lmi/owa/br_text_anzeigen?v_id=720050120105339187, [Zugriff am: 18.07.2024].
- [245] J. Otto, J. Kortmann, und S. Gabriel, „Checkliste – Planung der Baustellen-einrichtung“, Tech. Rep., 08 2020.
- [246] A. Burkert, K. Lambertz, B. Schmülling, S. Jeschke, und J. Bärenfänger, „An Optimized Charging Infrastructure for Wireless Power Transfer Systems from an Economic View“, in *2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 2019, SS. 1–6.
- [247] A. David, Stroka, N. Haussmann, M. Clemens, und B. S. Schmülling, „Nutzbarkeitsuntersuchung von Unterflurschränken bei induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge im urbanen Raum“, in *Wissenschaftsforum Mobilität 2022*, 2022.

- [248] Stadt Wuppertal, „Daten und Fakten 2019“, [Online]. Verfügbar unter: www.wuppertal.de, [Zugriff am: 17.07.2024].
- [249] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Verkehr in Kilometern der deutschen Kraftfahrzeuge im Jahr 2017“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/vk_inlaenderfahrleistung_node.html;jsessionid=B595D1F5C48360C2AC43F2B9A6D229BC.live11293?yearFilter=2018, [Zugriff am: 17.07.2024].
- [250] Allgemeiner Deutscher Automobil-Club (ADAC), „Fahrzeugklassen“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/autokatalog/autotest/beste-elektroautos/>, [Zugriff am: 22.10.2024].
- [251] Bundesamt für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA), „Elektromobilität (Umweltbonus)“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.bafa.de/SharedDocs/Kurzmeldungen/DE/Energie/Elektromobilitaet/20231216_foerderende.html, [Zugriff am: 22.10.2024].
- [252] Volkswagen, „Der e-Golf“, [Online]. Verfügbar unter: www.volkswagen.de, [Zugriff am: 22.10.2024].
- [253] Renault, „Renault Zoe“, [Online]. Verfügbar unter: www.renault.de, [Zugriff am: 19.02.2019].
- [254] S. Neumeier, „Modellierung der Erreichbarkeit von Straßentankstellen: Untersuchung zum regionalen Versorgungsgrad mit Dienstleistungen der Grundversorgung“, in *Research in Agriculture and Applied Economics*, 2012.
- [255] P. Kasten, M. Mottschall, W. Köppel, C. Degünther, M. Schmied, und P. Wüthrich, „Erarbeitung einer fachlichen Strategie zur Energieversorgung des Verkehrs bis zum Jahr 2050“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/2016-11-10_endbericht_energieversorgung_des_verkehrs_2050_final.pdf, [Zugriff am: 18.07.2024].
- [256] J.-X. Xiao und F.-L. Lu, „An Improvement of the Shortest Path Algorithm Based on Dijkstra Algorithm“, in *2010 The 2nd International Conference on Computer and Automation Engineering (ICCAE)*, Vol. 2, 2010, SS. 383–385.
- [257] Sievert SE, „Straßen- und Tiefbausysteme – Pflasterdecken und Plattenbeläge im Straßenbau“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.tubag.de/anwendungen/strassen-und-tiefbausysteme/pflasterdecken-und-plattenbelaege-im-strassenbau.html>, [Zugriff am: 07.06.2024].

- [258] D. Schumann, „Status quo Ladeinfrastruktur 2016“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.voltimum.de/sites/www.voltimum.de/files/pdflibrary/ep36_ladeinfrastruktur_online.pdf, [Zugriff am: 29.08.2024].
- [259] Manfred Boeser Industrievertrieb GmbH, „Schaltschränke - Wissenswertes und Tipps“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mbi-gmbh.de/wissenswertes-schaltschraenke/>, [Zugriff am: 18.07.2024].
- [260] Rittal GmbH & Co. KG, „Schaltschränke - Schranksysteme“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ittal.com/de-de/products/PG0002SCHRANK1/PG0026SCHRANK1>, [Zugriff am: 22.07.2024].
- [261] Langmatz GmbH, „Innovativer Unterflur-Netzanschluss perfekt für eMobility“, [zuletzt aufgerufen am 13.02.2025]. [Online]. Available: https://langmatz.de/Produkte/Unterflurverteiler/EK880/02-11_Datenblatt_UVT_EK880_de.pdf
- [262] Europäisches Parlament, „Fit für 55: Abgeordnete unterstützen Ziel der Emissionsneutralität für neue Autos und Lieferwagen ab 2035“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.europarl.europa.eu/news/de/press-room/20220603IPR32129/fit-fur-55-emissionsneutralitat-fur-neue-pkw-und-lieferwagen-ab-2035>, [Zugriff am: 18.07.2024].
- [263] Kraftfahrt Bundesamt (KBA), „Neuzulassungsbarometer 2017-2022“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugzulassungen/2022/pm09_2022_n_02_22_pm_komplett.html, [Zugriff am: 18.07.2024].
- [264] NOX-Block, „NOX Reduzierung durch den Aufbau einer leistungsfähigen Low-Cost-Ladeinfrastruktur in Dortmund, Schwerte, Iserlohn“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dortmund.de/themen/mobilitaet-und-verkehr/projekt-nox-block/>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [265] Ubitricity, „Laternenladepunkte für Städte und Fahrer*innen“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ubitricity.com/de/>, [Zugriff am: 18.07.2024].
- [266] A. Uthirakumar und I. Manickam, „Barriers of Growth Analysis for Electric Vehicles by Non-Linear Polarized Scale Method“, in *2020 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, 2020, SS. 14–16.
- [267] M. Zieffle, S. Beul-Leusmann, K. Kasugai, und M. Schwalm, „Public Perception and Acceptance of Electric Vehicles: Exploring Users' Perceived Benefits and Drawbacks“, in *Design, User Experience, and Usability. User Experience Design for Everyday Life Applications and Services*, A. Marcus, Hrsg. Springer International Publishing, 2014, SS. 628–639.

- [268] M. Adhikari, L. P. Ghimire, Y. Kim, P. Aryal, und S. B. Khadka, „Identification and Analysis of Barriers against Electric Vehicle Use“, *Sustainability*, Vol. 12, Nr. 12, 2020.
- [269] S. Statharas, Y. Moysoglou, P. Siskos, G. Zazias, und P. Capros, „Factors Influencing Electric Vehicle Penetration in the EU by 2030: A Model-Based Policy Assessment“, *Energies*, Vol. 12, Nr. 14, 2019.
- [270] A. Burkert, H. Fechtner, und B. Schmülling, „Interdisciplinary Analysis of Social Acceptance Regarding Electric Vehicles with a Focus on Charging Infrastructure and Driving Range in Germany“, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 12, Nr. 1, 2021.
- [271] Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., „Kraftstoffverbrauch in Deutschland 2023“, [Online]. Verfügbar unter: <https://mediathek.fnr.de/kraftstoffverbrauch-in-deutschland.html#:~:text=Neben%20Dieselkraftstoff%20mit%2060%2C5,der%20wichtigste%20Biokraftstoff%20in%20Deutschland.>, [Zugriff am: 19.08.2024].
- [272] P. Wolfram und N. Lutsey, „Electric Vehicles: Literature Review of Technology Costs and Carbon Emissions“, in *The International Council on Clean Transportation*, 2016.
- [273] Nissan Deutschland GmbH, „Nissan Modelle: Juke, Leaf und Micra“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.nissan.de/>, [Zugriff am: 12.07.2024].
- [274] Deutsche Automobil Treuhand GmbH, „Jahresfahrleistung von 2003 bis 2022“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.dat.de/news/jahresfahrleistung/>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [275] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Inländerfahrleistung“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Statistik/Kraftverkehr/VerkehrKilometer/vk_inlaenderfahrleistung/2020/2020_vk_kurzbericht.html#:~:text=Die%20durchschnittliche%20Jahresfahrleistung%20zeigte%20sich,um%20nahezu%2030%20Prozent%20zu.&text=In%202020%20entfielen%2051%2C4,auf%20Pkw%20mit%20Benzin%2DMotor, [Zugriff am: 19.08.2024].
- [276] ADAC, „Förderung für E-Autos: Das ist der aktuelle Stand“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/elektroauto/foerderung-elektroautos/>, [Zugriff am: 24.02.2025].
- [277] Reuters, „German Government Agrees Proposals for Tax Relief on EVs“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/german-cabinet-agrees-proposals-tax-relief-evs-source-says-2024-09-04/>, [Zugriff am: 24.02.2025].

- [278] Mitteldeutscher Rundfunk (mdr), „Welche Privilegien haben Elektroautos?“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.mdr.de/ratgeber/mobilitaet/redakteur-e-autos-parken-100.html>, [Zugriff am: 24.02.2025].
- [279] Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), „Elektromobilitätsgesetz (EmoG)“, [Online]. Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Mobilitaet/Elektrumobilitaet/Elektrumobilitaetgesetz/elektromobilitaetgesetz.html>, [Zugriff am: 24.02.2025].
- [280] Bundesministerium für Digitales und Verkehr, „Förderrichtlinie - Öffentlich zugängliche Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge in Deutschland“, [Online]. Verfügbar unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Artikel/G/foerderrichtlinie-ladeinfrastruktur-elektrofahrzeuge.html>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [281] NOW GmbH, „Bidirektionales Laden diskriminierungsfrei ermöglichen - Handlungsempfehlungen des Beirats der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur zur Umsetzung der Maßnahme 47 des Masterplans Ladeinfrastruktur II“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ihk.de/blueprint/servlet/resource/blob/6108496/69bc29b24b8d76eb09a902872db6c3af/bidirektionales-laden-data.pdf>, [Zugriff am: 24.02.2025].
- [282] International Electrotechnical Commission (IEC), „DIN EN IEC 63000 - Technische Dokumentation zur Beurteilung von Elektro- und Elektronikgeräten hinsichtlich der Beschränkung gefährlicher Stoffe“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/normen/0090086/din-en-iec-63000-vde-0042-12-2019-05.html>, [Zugriff am: 24.02.2025].
- [283] Rat der Europäischen Union, „Fit for 55“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/fit-for-55/>, [Zugriff am: 24.02.2025].
- [284] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), „Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/Bund/BMWi/forschung-entwicklung-elektromobilitaet.html>, [Zugriff am: 24.02.2025].
- [285] ADAC, „Kostenvergleich Elektroauto, Benziner oder Diesel: Was ist Günstiger?“, [Online]. Verfügbar unter: <https://assets.adac.de/Autodatenbank/Autokosten/E-AutosVergleich.pdf>, [Zugriff am: 30.08.2024].
- [286] O. Catsaros, „Lithium-Ion Battery Pack Prices Hit Record Low of 139 \$/kWh“, [Online]. Verfügbar unter: <https://about.bnef.com/blog/lithium-ion-battery-pack-prices-hit-record-low-of-139-kwh/>, [Zugriff am: 30.08.2024].

- [287] W. Mathis, „Cheaper Batteries, More Chargers for Electric Car Buyers in 2020“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-01-13/cheaper-batteries-more-chargers-for-electric-car-buyers-in-2020>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [288] F. Zuccari, F. Orecchini, A. Santiangeli, T. Suppa, F. Ortenzi, A. Genovese, und G. Pede, „Well to Wheel Analysis and Comparison Between Conventional, Hybrid and Electric Powertrain in Real Conditions of Use“, Vol. 2191, 12 2019, S. 020158.
- [289] P. Lou, G.-H. Xu, L.-P. Yue, Y.-C. Cao, S. Cheng, und H. Deng, „Current Fire Safety challenges on Lithium Ion Battery for Grid Power Storage System“, in *2019 4th International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE)*, 2019, SS. 300–304.
- [290] D. Finegan, E. Darcy, M. Keyser, B. Tjaden, T. Heenan, R. Jervis, J. Bailey, R. Malik, N. T. Vo, O. Magdysyuk, R. Atwood, M. Drakopoulos, M. DiMichiel, A. Rack, G. Hinds, D. Brett, und P. Shearing, „Characterising Thermal Runaway Within Lithium-Ion Cells by Inducing and Monitoring Internal Short Circuits“, *Energy Environ. Sci.*, Vol. 10, SS. 1377–1388, 04 2017.
- [291] M. Kulkarni, S. M. Sundaram, und V. Diwakar, „Development of Sensor and Optimal Placement for Smoke Detection in an Electric Vehicle Battery Pack“, in *2015 IEEE International Transportation Electrification Conference (ITEC)*, 2015, SS. 1–3.
- [292] J. Sun, J. Li, D. J. Costinett, und L. M. Tolbert, „A GaN-Based CRM Totem-Pole PFC Converter with Fast Dynamic Response and Noise Immunity for a Multi-Receiver WPT System“, in *2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, 2020, SS. 2555–2562.
- [293] Deloitte, „New Market. New Entrants. New Challenges. Battery Electric Vehicles.“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.acqiche.com/download/deloitte-uk-battery-electric-vehicles.pdf>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [294] AAA Foundation for Traffic Safety, „American Driving Survey, 2015–2016“, [Online]. Verfügbar unter: https://aaafoundation.org/wp-content/uploads/2018/01/19-0226_AAAFTS-2018-ADAS-Research-Brief-Update_v1.pdf, [Zugriff am: 30.08.2024].
- [295] C. Nobis, T. Kuhnimhof, R. Follmer, und M. Bäumer, „Mobilität in Deutschland - Zeitreihenbericht 2002 - 2008 - 2017“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.mobilitaet-in-deutschland.de/archive/pdf/MiD2017_Zeitreihenbericht_2002_2008_2017.pdf, [Zugriff am: 30.08.2024].

- [296] International Energy Agency (IEA), „Global EV Outlook 2019: Scaling-Up the Transition to Electric Mobility“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [297] J. Pontes, „Record Electric Vehicle Sales In Europe“, [Online]. Verfügbar unter: <https://cleantechnica.com/2020/12/29/record-electric-vehicle-sales-in-europe/>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [298] European Alternative Fuels Observatory, „Market Share New Registrations“, [Online]. Verfügbar unter: <https://alternative-fuels-observatory.ec.europa.eu/transport-mode/road/european-union-eu27/vehicles-and-fleet>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [299] Association des Constructeurs Européens d'Automobiles, „Passenger Car Registrations: - 25.5% 11 Months into 2020; - 12.0% in November“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.acea.auto/pc-registrations/passenger-car-registrations-25-5-11-months-into-2020-12-0-in-november/>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [300] Kraftfahrt-Bundesamt (KBA), „Fahrzeugzulassungen im Dezember 2020 - Jahresbilanz“, [Online]. Verfügbar unter: https://www.kba.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/Fahrzeugzulassungen/2021/pm02_2021_n_12_20_pm_komplett.html#:~:text=Der%20letzte%20Zulassungsmonat%20des%20Jahres,1%20Prozent%20weniger%20als%202019., [Zugriff am: 15.07.2024].
- [301] C. Bloch, J. Newcomb, S. Shiledar, und M. Tyson, „Breakthrough Batteries — Power the Era of Clean Electrification“, [Online]. Verfügbar unter: https://rmi.org/wp-content/uploads/2019/10/rmi_breakthrough_batteries.pdf, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [302] C. De Cauwer, J. Van Mierlo, und T. Coosemans, „Energy Consumption Prediction for Electric Vehicles Based on Real-World Data“, *Energies*, Vol. 8, Nr. 8, SS. 8573–8593, 2015.
- [303] International Energy Agency (IEA), „Global EV Outlook 2018: 3 Million and Counting“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [304] D. Küpper, K. Kuhlmann, S. Wolf, C. Pieper, G. Xu, und J. Ahmad, „The Future of Battery Production for Electric Vehicles“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bcg.com/publications/2018/future-battery-production-electric-vehicles>, [Zugriff am: 15.07.2024].

- [305] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, und G. Pasaoglu, „The Lithium-Ion Battery: State of the Art and Future Perspectives“, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 89, SS. 292–308, 2018.
- [306] G. Berckmans, M. Messagie, J. Smekens, N. Omar, L. Vanhaverbeke, und J. Van Mierlo, „Cost Projection of State of the Art Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles Up to 2030“, *Energies*, Vol. 10, Nr. 9, 2017.
- [307] K. Baes, M. Kolk, F. Carlot, A. Merhaba, und Y. Ito, „Future of Batteries - Winner Takes All?“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.adlittle.com/en/insights/viewpoints/future-batteries>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [308] European Commission and Directorate-General for Environment, *Towards the Battery of the Future*. Publications Office, 2018.
- [309] J. Frith und M. Lacey, „A Non-Academic Perspective on the Future of Lithium-Based Batteries“, *Nature Communications*, Vol. 14, 2023.
- [310] S. Barcellona, D. De Simone, und L. Piegari, „Control Strategy to Improve EV Range by Exploiting Hybrid Storage Units“, *IET Electrical Systems in Transportation*, Vol. 9, Nr. 4, SS. 237–243, 2019.
- [311] S. Scheubner, A. T. Thorgeirsson, M. Vaillant, und F. Gauterin, „A Stochastic Range Estimation Algorithm for Electric Vehicles Using Traffic Phase Classification“, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 68, Nr. 7, SS. 6414–6428, 2019.
- [312] A. Tomaszewska, Z. Chu, X. Feng, S. O’Kane, X. Liu, J. Chen, C. Ji, E. Endler, R. Li, L. Liu, Y. Li, S. Zheng, S. Vetterlein, M. Gao, J. Du, M. Parkes, M. Ouyang, M. Marinescu, G. Offer, und B. Wu, „Lithium-Ion Battery Fast Charging: A Review“, *eTransportation*, Vol. 1, S. 100011, 2019.
- [313] M. Nilsson, „Electric Vehicles - The Phenomenon of Range Anxiety“, [Online]. Verfügbar unter: http://e-mobility-nsr.eu/fileadmin/user_upload/downloads/info-pool/the_phenomenon_of_range_anxiety_elvire.pdf, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [314] Mitsubishi Motors, „2012 Mitsubishi i-MiEV - Product Brief“, [Online]. Verfügbar unter: <https://manitobaev.ca/wp-content/uploads/2011/11/i-Miev-product-brief.pdf>, [Zugriff am: 15.07.2024].
- [315] D. Pevec, J. Babic, A. Carvalho, Y. Ghiassi-Farrokhfal, W. Ketter, und V. Podobnik, „Electric Vehicle Range Anxiety: An Obstacle for the Personal Transportation (R)evolution?“, in *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SplitTech)*, 2019, SS. 1–8.

- [316] M. Faraj, B. Fidan, und V. Gaudet, „Multi-Module Range Anxiety Reduction Scheme for Battery-Powered Vehicles“, in *2018 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2018, SS. 904–909.
- [317] T. Franke, „Nachhaltige Mobilität mit Begrenzten Ressourcen: Erleben und Verhalten im Umgang mit der Reichweite von Elektrofahrzeugen“, Ph.D. dissertation, TU Chemnitz, 02 2014.
- [318] S. Sautermeister, M. Falk, B. Bäker, F. Gauterin, und M. Vaillant, „Influence of Measurement and Prediction Uncertainties on Range Estimation for Electric Vehicles“, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, Vol. 19, Nr. 8, SS. 2615–2626, 2018.
- [319] N. Rauh, T. Franke, und J. F. Krems, „Understanding the Impact of Electric Vehicle Driving Experience on Range Anxiety“, *Human Factors*, Vol. 57, Nr. 1, SS. 177–187, 2015, PMID: 25790577.
- [320] H. Fechtner, *Fahrzeugmasseüberwachung Mittels Intelligentem Reifendruckkontrollsystem im Kontext der Reichweitenproblematik von Elektrofahrzeugen*, 04 2019.
- [321] H. Fechtner, T. Teschner, und B. Schmülling, „Range Prediction for Electric Vehicles: Real-time Payload Detection by Tire Pressure Monitoring“, in *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2015, SS. 767–772.
- [322] I. Clarke und A. Piterou, „Range Extenders: An Innovative Approach to Range Anxiety in Electric Vehicles“, *International Journal of Automotive Technology and Management (IJATM)*, Vol. 19, Nr. 1/2, SS. 104–124, 2019.
- [323] A. Fukushima, T. Yano, S. Imahara, H. Aisu, Y. Shimokawa, und Y. Shiba-ta, „Prediction of Energy Consumption for New Electric Vehicle Models by Machine Learning“, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 12, Nr. 9, SS. 1174–1180, 2018.
- [324] B. O. Varga, A. Sagoian, und F. Mariasiu, „Prediction of Electric Vehicle Range: A Comprehensive Review of Current Issues and Challenges“, *Energies*, Vol. 12, Nr. 5, 2019.
- [325] D. Knutsen und O. Willén, „A Study of Electric Vehicle Charging Patterns and Range Anxiety“, [Online]. Verfügbar unter: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:626048/FULLTEXT01.pdf>, [Zugriff am: 13.02.2025].
- [326] E. Apostolaki-Iosifidou, P. Codani, und W. Kempton, „Measurement of Power Loss During Electric Vehicle Charging and Discharging“, *Energy*, Vol. 127, SS. 730–742, 2017.

-
- [327] A. S. Mussa, A. Liivat, F. Marzano, M. Klett, B. Philippe, C. Tengs-tedt, G. Lindbergh, K. Edström, R. W. Lindström, und P. Svens, „Fast-Charging Effects on Ageing for Energy-Optimized Automotive Li-Ni1/3Mn1/3Co1/3O2/Graphite Prismatic Lithium-Ion Cells“, *Journal of Power Sources*, Vol. 422, SS. 175–184, 2019.
 - [328] Porsche, „The New Taycan 4S—Press Kit“, [Online]. Verfügbar unter: <https://newsroom.porsche.com/de/produkte/taycan.html>, [Zugriff am: 15.07.2024].
 - [329] P. Speers, „Hydrogen Mobility Europe (H2ME): Vehicle and Hydrogen Re-fuelling Station Deployment Results“, *World Electric Vehicle Journal*, Vol. 9, Nr. 1, 2018.
 - [330] J. Buehler, R. Goebelt, und M. Shahd, „TÜV Mobility Studie 2020“, [On-line]. Verfügbar unter: <https://www.presseportal.de/pm/65031/4534741>, [Zu-griff am: 27.11.2020].
 - [331] J. Globisch, U. Burghard, und E. Dütschke, „Acceptance of Electric Vehicles by Commercial Users in the Electric Mobility Pilot Regions in Germany“, *ECEEE Summer Study Proceedings*, SS. 973–983, 01 2013.
 - [332] P. Cocron, F. Bühler, I. Neumann, T. Franke, J. Krems, M. Schwalm, und A. Keinath, „Methods of Evaluating Electric Vehicles from a User’s Perspec-tive – The MINI E Field Trial in Berlin“, *IET Intelligent Transport Systems*, Vol. 5, SS. 127–133(6), June 2011.

A Vertiefung: Maxwell'sche Gleichungen

1. Gleichung: Das Durchflutungsgesetz (Ampèresches Gesetz)

Das Durchflutungsgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen einem elektrischen Strom und dem von ihm erzeugten Magnetfeld. Die in Abbildung A.1 dargestellte Skizze des Durchflutungsgesetzes findet sich in den Gleichungen A.1 (Integralform) und A.2 (Differentialform) wieder.

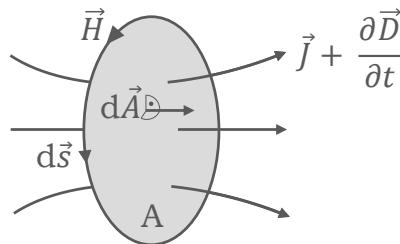


Abbildung A.1: Durchflutungsgesetz (Datenquelle: [126]).

Das Umlaufintegral des magnetischen Feldes \vec{H} um die Fläche A ist gleich dem Gesamtstrom I_{ges} , der durch die Fläche fließt. Der Gesamtstrom ist die Summe aus Leitungsstrom und Verschiebungsstrom.

$$\oint_{C(A)} \vec{H} \cdot d\vec{s} = \iint_A (\vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}) \cdot d\vec{A} \quad (\text{A.1})$$

Die Größe \vec{J} entspricht der Stromdichte in einem leitfähigen Material und wird daher auch als Leitungsstromdichte \vec{J}_L bezeichnet. Der Term $\partial \vec{D} / \partial t$ hat die gleiche physikalische Einheit wie \vec{J} , ist aber nicht an leitfähige Raumbereiche gebunden. Der Ausdruck trägt die Bezeichnung Verschiebungsstromdichte \vec{J}_V und ist für die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen fundamental. Leitungs- und Verschiebungsströme verursachen magnetische Wirbelfelder. Die Summe aus Leitungs- und Verschiebungsstromdichte wird als wahre Stromdichte bezeichnet [126].

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A.2})$$

$$\vec{J}_{\text{ges}} = \vec{J}_{\text{L}} + \vec{J}_{\text{V}} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{A.3})$$

2. Gleichung: Das Induktionsgesetz (Faradaysches Gesetz)

Eine zeitliche Änderung des magnetischen Flusses erzeugt ein elektrisches Wirbelfeld. Die in Abbildung A.2 dargestellte Skizze des Induktionsgesetzes findet sich in den Gleichungen A.4 (Integralform) und A.5 (Differentialform) wieder.

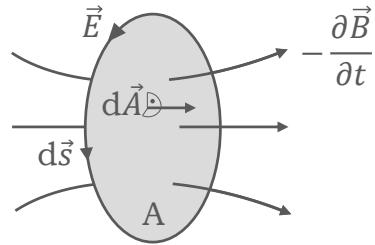


Abbildung A.2: Induktionsgesetz (Datenquelle: [126]).

Der Umlauf des elektrischen Feldes \vec{E} um die geschlossene Kontur C wird durch die zeitliche Änderung des magnetischen Flusses \vec{B} auf der von C eingeschlossenen Fläche A bestimmt. Der auf der rechten Seite befindliche Integralausdruck repräsentiert den magnetischen Fluss Φ_m .

$$\oint_{C(A)} \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d}{dt} \iint_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (A.4)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{A.5})$$

3. Gleichung: Der Gaußsche Satz des Magnetfeldes

Es existieren keine Ursachen für ein magnetisches Quellenfeld. Folglich kann das magnetische Feld als quellenfrei und als reines Wirbelfeld bezeichnet werden. Die

in Abbildung A.3 dargestellte Skizze des Induktionsgesetzes findet sich in den Gleichungen A.6 (Integralform) und A.7 (Differentialform) wieder.

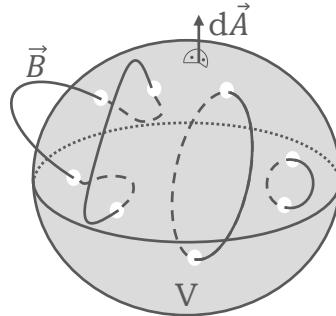


Abbildung A.3: Gaußscher Satz des Magnetfeldes (Datenquelle: [126]).

Das links stehende Integral stellt den magnetischen Fluss Φ_m durch die geschlossene Hüllfläche des Volumens V dar. Es zeigt sich, dass dieser stets null ist, was darauf hindeutet, dass die magnetischen Feldlinien stets geschlossen sind.

$$\iint_{A(V)} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (A.6)$$

Die magnetische Flussdichte \vec{B} durch eine geschlossene Fläche A ist gleich Null.

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0 \quad (A.7)$$

4. Gleichung: Der Gaußsche Satz des elektrischen Feldes

Die Raumladungsdichte ist die Ursache eines elektrischen Quellenfeldes. Die in Abbildung A.4 dargestellte Skizze des Induktionsgesetzes findet sich in den Gleichungen A.8 (Integralform) und A.9 (Differentialform) wieder.

Das auf der linken Seite dargestellte Integral stellt den elektrischen Fluss Ψ_e durch die geschlossene Hüllfläche des Volumens V dar. Auf der rechten Seite findet sich die Integration über die Raumladungsdichte ρ , welche die Ladungsmenge Q innerhalb des Volumens V liefert.

$$\iint_{A(V)} \vec{D} \cdot d\vec{A} = \iiint_V \rho dV = Q \quad (A.8)$$

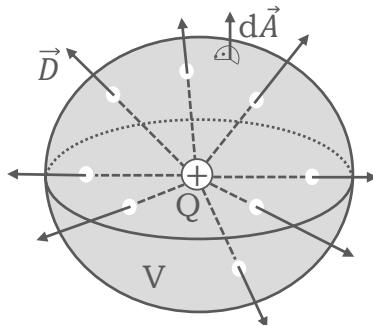


Abbildung A.4: Gaußscher Satz der Elektrostatik (Datenquelle: [126]).

Damit wird ausgedrückt, dass die Divergenz der elektrischen Flussdichte \vec{D} proportional zur lokalen Ladungsdichte ρ ist.

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho \quad (\text{A.9})$$

A.1 Materialgleichungen

Neben den Maxwell'schen Gleichungen gelten ergänzend die Materialgleichungen. Die konstitutiven Beziehungen, die die makroskopischen Eigenschaften des Mediums beschreiben, sind gegeben durch:

$$\vec{D} = \epsilon \cdot \vec{E} \quad (\text{A.10})$$

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H} \quad (\text{A.11})$$

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{A.12})$$

wobei ϵ die dielektrische Permittivität [F m^{-1}], μ die magnetische Permeabilität [H m^{-1}] und σ die elektrische Leitfähigkeit [S m^{-1}] ist. Diese Parameter sind als physikalische Konstanten bekannt. Darüber hinaus kann die Charakterisierung des Materialverhaltens sehr komplex werden. In der Tabelle A.1 sind die wichtigsten Materialeigenschaften aufgeführt.

Etliche Materialien, die in der Technik zum Einsatz kommen, lässt sich zumindest in bestimmten Frequenzbereichen als linear, zeitinvariant, isotrop und nicht dispersiv

Tabelle A.1. Definition von Materialeigenschaften.

Materialeigenschaft	Bedeutung
linear	ϵ , μ und σ unabhängig von elektromagnetischen Feldgrößen, die im Material auftreten
zeitinvariant	zeitlich konstant
isotrop	richtungsunabhängig
dispersiv	frequenzabhängig
homogen	keine räumliche Änderung

beschreiben. Eine inhomogene Verteilung von Materialien im Raum kann jedoch ein wesentliches Gestaltungselement bei Schaltungskomponenten sein [126].

A.2 Verhalten an Materialgrenzen

Über die Maxwell'schen Gleichungen hinaus müssen die Feldgrößen an Materialgrenzflächen zudem den Stetigkeitsbedingungen genügen. Im Folgenden wird der Index $i \in 1, 2$ bezeichnet, wobei i die Nummer des Mediums darstellt, in dem sich die Feldgrößen unmittelbar vor der Grenzschicht befinden. Der Index n gibt die Normalenkomponente senkrecht zur Oberfläche an, während der Index t die tangentiale Komponente parallel zur Grenzschicht bezeichnet.

Im Hinblick auf die elektrische und magnetische Flussdichte lässt sich festhalten, dass jeweils die Normalenkomponenten als stetig zu betrachten sind.

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (\text{A.13})$$

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (\text{A.14})$$

In Bezug auf die elektrische und magnetische Feldstärke lässt sich festhalten, dass die tangentialen Komponenten eine stetige Eigenschaft aufweisen.

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (\text{A.15})$$

$$H_{1t} = H_{2t} \quad (\text{A.16})$$

Unter Zuhilfenahme der Materialgleichungen A.10 und A.11 sowie der Gleichungen A.15 und A.16 lassen sich Beziehungen für die tangentialen Komponenten der elektrischen und magnetischen Flussdichte ableiten.

$$\frac{D_{1t}}{\epsilon_{r1}} = \frac{D_{2t}}{\epsilon_{r2}} \quad (A.17)$$

$$\frac{B_{1t}}{\mu_{r1}} = \frac{B_{2t}}{\mu_{r2}} \quad (A.18)$$

Des Weiteren lassen sich aus den Materialgleichungen A.10 und A.11 sowie den Gleichungen A.13 und A.14 Beziehungen für die Normalenkomponenten der Feldstärken E und H ableiten.

$$\epsilon_{r1} \cdot E_{1n} = \epsilon_{r2} \cdot E_{2n} \quad (A.19)$$

$$\mu_{r1} \cdot H_{1n} = \mu_{r2} \cdot H_{2n} \quad (A.20)$$

Die Zusammenhänge für das elektrische Feld sind in Abbildung A.5 dargestellt. Die tangentiale Komponente ist stetig (Gleichung A.15) und die Normalenkomponente unterliegt einer Änderung (Gleichung A.19).

Liegt an der Grenzschicht eine Oberflächenladungsdichte ρ_F oder Oberflächenstromdichte \vec{J}_F vor, so gelten für Gleichungen A.13 und A.16 folgende Änderungen:

$$|H_{1t} - H_{2t}| = |\vec{J}_{F\perp}| \quad (A.21)$$

$$|D_{1n} - D_{2n}| = |\rho_F| \quad (A.22)$$

Im Gegensatz zur Ladungsdichte ρ (Ladung pro Volumen, $C m^{-3}$) sind bei der Oberflächenladungsdichte ρ_F die Ladungen in einem zweidimensionalen Bereich verteilt ($C m^{-2}$). Die Stromdichte J ist definiert als der Strom (in einem dreidimensionalen Objekt) durch eine Querschnittsfläche ($A m^{-2}$). Eine Oberflächenstromdichte \vec{J}_F stellt einen Strom in einer zweidimensionalen Fläche dar, so dass die Querschnittsgeometrie eine eindimensionale Linie ($A m^{-1}$) ist. Das Symbol \perp bedeutet, dass die Richtung der Stromdichte senkrecht zur Richtung der tangentialen magnetischen Feldstärke ist [128].

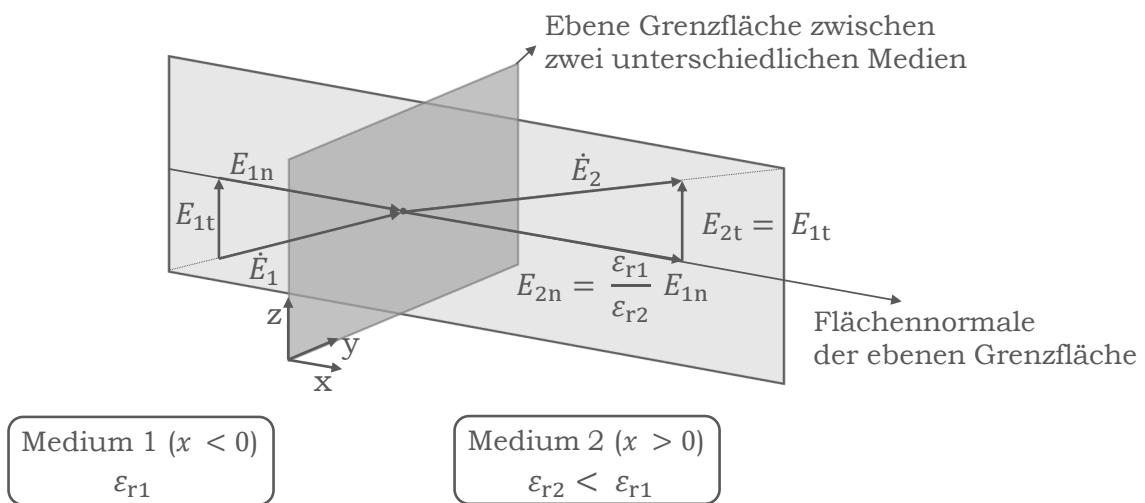


Abbildung A.5: Verhalten der elektrischen Feldstärke beim Übergang von einem Dielektrikum (ϵ_{r1}) in ein zweites Dielektrikum ($\epsilon_{r2} < \epsilon_{r1}$) (Datenquelle: [126]).

B EMV-Prüfung bei induktiven Ladesystemen

WPT-Systeme für EVs beinhalten leistungselektronische Komponenten, die bei hohen Spannungen und Leistungen arbeiten und somit Quelle elektromagnetischer Emissionen sind. Generell wird für die EMV-Absicherung im Labor jeweils das Fahrzeug und die Ladestation separat vermessen. Dementsprechend lässt sich die EMV-Prüfung in zwei Teile untergliedern: Prüfung auf Komponentenebene und auf Fahrzeugebene. Gemäß SAE J2954 sollte die Prüfung auf Komponentenebene vor der Integration in ein Fahrzeugsystem durchgeführt werden, wobei der Fokus auf Evaluierungszwecken liegt. Die EMV-Prüfung auf Fahrzeugebene hingegen dient der Bewertung der Einhaltung gesetzlicher Anforderungen für das gesamte System. Dies gilt besonders für eigenständige Systeme, die Fahrzeughersteller für den privaten Gebrauch bereitstellen.

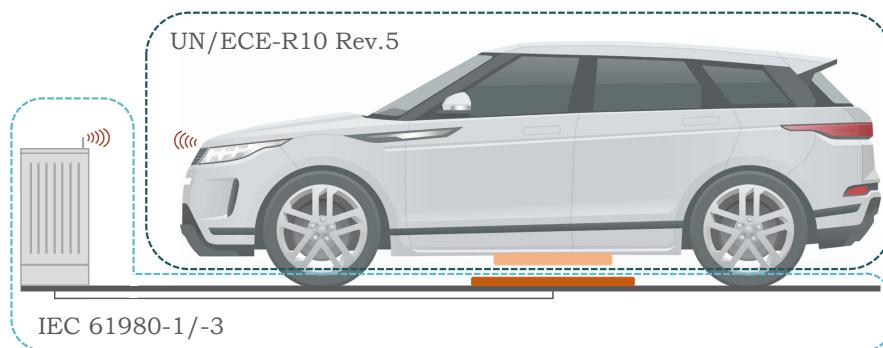


Abbildung B.1: Aufteilung der EMV-Prüfungen in Fahrzeug- und Komponentenebene bei WPT-Systemen für EVs.

Die normative Grenze zieht sich durch den Luftspalt zwischen der Primärspule und der Sekundärspule, wie in Abbildung B.1 dargestellt. Die Fahrzeugseite unterliegt den Vorgaben der UN/ECE-R10 Rev. 5, während die Anforderungen an die Bodenspule und die Ladestation in dem IEC-Standard IEC 61980-1/-3 festgelegt sind [56, 58]. Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Messung des Magnet-

felds im Frequenzbereich von 9 kHz bis 30 MHz gemäß CISPR 11 dar, da in diesem Bereich derzeit sehr niedrige Grenzwerte diskutiert werden [59].

Die maßgeblichen Prüfungen auf Komponentenebene weisen eine hohe Ähnlichkeit zu jenen auf, die für andere elektrische/elektronische Produkte durchgeführt werden. Dazu zählen bspw. die abgestrahlten Emissionen (RE), die abgestrahlte Störfestigkeit (RS), die leitungsgebundenen Emissionen (CE), die leitungsgebundene Störfestigkeit (CS), die elektrostatische Entladung (ESD), schnelle Transienten/Bursts, Überspannungen, niederfrequente Magnetfelder in Stromleitungen, Spannungseinbrüche, Oberschwingungen und Flimmern im Wechselstromnetz.

Die WPT-Systeme basieren in der Regel auf einem H-Brücken-Leistungswandler, der die Netzfrequenz von 50 Hz/60 Hz auf die für die drahtlose Energieübertragung genutzte Frequenz von etwa 85 kHz (üblicher Frequenzbereich: 79 kHz bis 90 kHz [35]) umwandelt. Durch die schnellen Schaltvorgänge entstehen zusätzliche Oberschwingungen sowie kapazitive Gleichtaktströme zwischen den aktiven Systemteilen und der Erde, welche die Grundfrequenz überlagern. Für die Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Messung ist insbesondere der Versuchsaufbau, insbesondere die Verkabelung zwischen Wandler und Primärspule, von entscheidender Bedeutung.

Im Allgemeinen werden die EMV-Tests in einer semi-reflexionsarmen Kammer (Semi-Anechoic Chamber, SAC) durchgeführt, wobei die Ergebnisse in realistischen Umgebungen (Open Area Test Site, OATS) wie bspw. auf einem Parkplatz mit denjenigen aus der SAC verglichen werden [136]. Die Untersuchungen haben ergeben, dass der metallische Boden in der SAC die Erdschleife für den Gleichtaktstrom beeinflusst und somit als Worst-Case-Szenario betrachtet werden muss, da hier eine zusätzliche Feldstärke von 10 dB bis 15 dB erzeugt wird. Ein nichtleitender Boden, wie er auf einem Parkplatz zu finden ist, reduziert hingegen die reflektierenden Effekte.

Im Falle des induktiven Ladens ist eine getrennte Prüfung sowohl des Fahrzeugs als auch der Ladestation erforderlich. Dabei wird die Gegenseite jeweils für Leistung und Kommunikation nachgebildet. Im Rahmen der Prüfung der Ladestation wird die Fahrzeugkarosserie mittels eines Stahlblechs simuliert. Die geeignete Nachbildung der Stahlplatte hat die Abmessungen von mindestens 1.500 mm x 1.500 mm und einer Dicke von 0,7 mm bis 1 mm [35]. Diese Nachbildung ermöglicht es, die Emissionen realistischer zu testen und die EMV-Anforderungen gemäß den spezifischen Nutzungsbedingungen zu bewerten. Für die Fahrzeugprüfung ist eine Ladestation oder entsprechende Leistungselektronik erforderlich, welche ausschließlich die Betriebsfrequenz von 85 kHz erzeugt. Um eine valide Evaluierung des Fahrzeugs während der Messungen zu gewährleisten, sind umfangreiche Filtermaßnahmen unerlässlich. Die Filterung stellt aufgrund der technischen Komplexität und der damit verbundenen Kosten eine wesentliche Herausforderung dar.

Leitungsgeführte Störungen entstehen auf Strom- und Datenleitungen und werden in einem Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz gemessen. Dazu wird das Gerät über einen Netznachbildner (LISN) mit einem EMI-Empfänger oder Spektrumanalysator verbunden, der die Störsignale erfasst. Die Messung erfolgt in einer abgeschirmten Umgebung und die Werte werden gemäß Normen wie CISPR 16 bewertet. Die Abbildung B.2 zeigt Messergebnisse des Gleichtaktstroms I_{CM} und Gegentaktstroms I_{DM} beim WPT-System aus [137]. Die Messung ist besonders kritisch, da sehr niedrige Grenzwerte diskutiert werden. Zur Entwicklung eines Entstörkonzepts wurden die Störströme bei hoher Ladeleistung erfasst. Der Gleichtaktstörstrom, der größtenteils gefiltert werden sollte, erreicht bei 5 MHz seine maximale Amplitude von 1 A. Beim Gegentaktstrom nimmt die Filterwirkung des Bandpasses ab 1 MHz ab. Ein Emissionsmaximum wird bei 5 MHz erreicht. Da die Nutzfrequenz 85 kHz und das Spektrum des zu unterdrückenden Störsignals 170 kHz nah beieinanderliegen, ist eine Filterung des Gegentaktstroms nicht sinnvoll. Daher besteht das Entstörkonzept aus einer Filterung des Gleichtaktstroms und einer Reduktion des Gegentaktstroms durch Schirmung und Leitungsoptimierung.

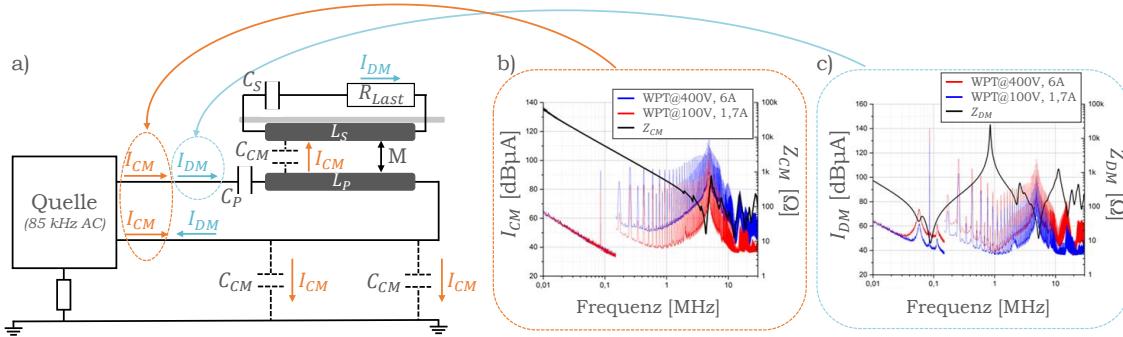


Abbildung B.2: Messergebnisse leitungsgeführter Emissionen [137]: a) schematische Darstellung, b) Gleichtaktstrom I_{CM} und c) Gegentaktstrom I_{DM} .

Gestrahlte Störungen sind elektromagnetische Emissionen, die vom Gerät abgestrahlt werden. Sie werden in einer SAC oder auf einem OATS gemessen. Dabei erfasst eine Schleifenantenne (Durchmesser: 60 mm) in einer Entfernung von 10 m die Emissionen, während das Gerät auf einem Drehteller positioniert wird, um maximale Abstrahlungen zu erfassen. Die empfohlenen Testaufbauten sind in der Abbildung B.5 dargestellt. Der Einfluss eines EMV-Filters auf die H-Feld Emissionen des WPT Systems ist in Abbildung B.4 zu sehen [123]. Beim Design des Filters für das WPT-System ist zu beachten, dass die Nutzfrequenz bei 85 kHz liegt, was die Filteroptionen einschränkt. Große Y-Kapazitäten sind ungeeignet, da sie Nutzstrom zur Erde ableiten. Zur Dämpfung wird daher auf kostenintensive Gleichtaktdrosseln zurückgegriffen, die im Laboraufbau verwendet werden können. Der Filter besteht somit aus zwei kleinen Y-Kapazitäten und einer X-Kapazität, um Störungen vorsymmetrisch

zu reduzieren. Zwei große Gleichtaktdrosseln in Reihe mindern die Wärmebelastung bei hoher Leistung. Der Filter dämpft primär Gleichtaktströme, während Gegentaktstörungen durch symmetrische Kabelverlegung minimiert werden. Die Filterwirkung ist vor allem bei 8 MHz und 20 MHz zu sehen. Ohne Filtermaßnahme werden in diesen Bereichen deutlich die Grenzwerte überschritten.

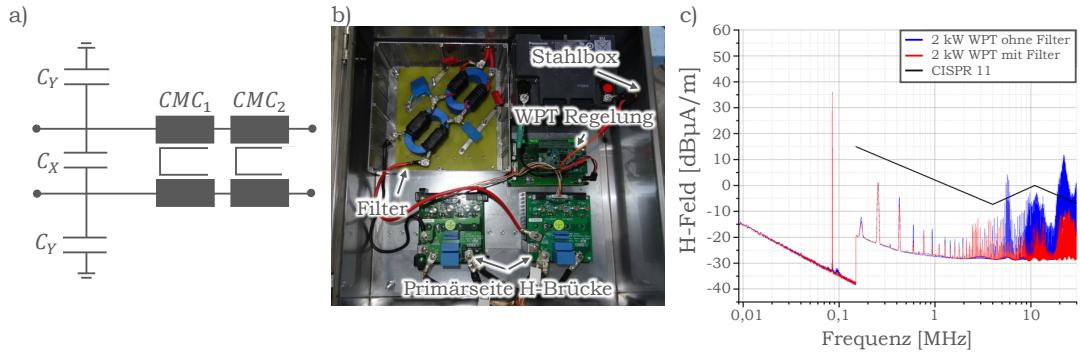
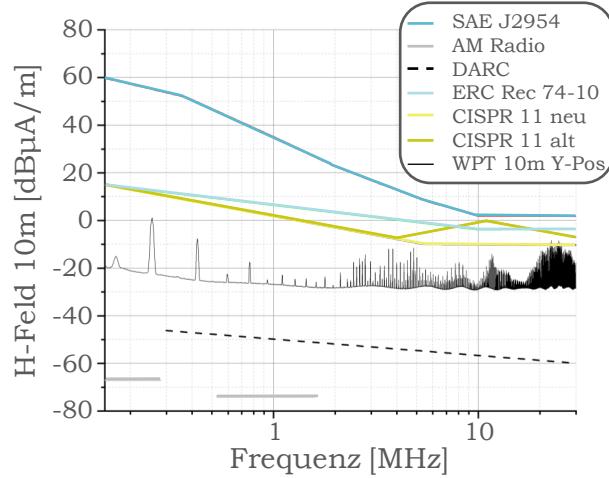


Abbildung B.3: a) Ersatzschaltbild des entwickelten EMV-Filters, b) Versuchsaufbau der Leistungselektronik und c) gemessene Magnetfeldemissionen des WPT-Systems [123].



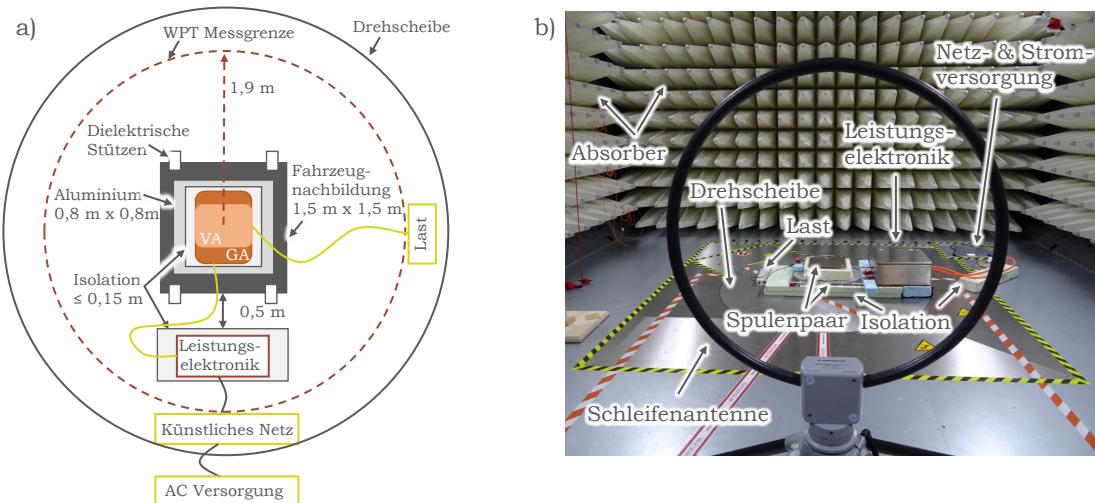


Abbildung B.5: Prüfaufbau zur Messung gestrahlter Emissionen eines WPT-Systems: a) normgerechte Skizze (Draufsicht) (Datenquelle: [35]) und b) praktische Umsetzung (Frontansicht) (Spulensystem: [137]).

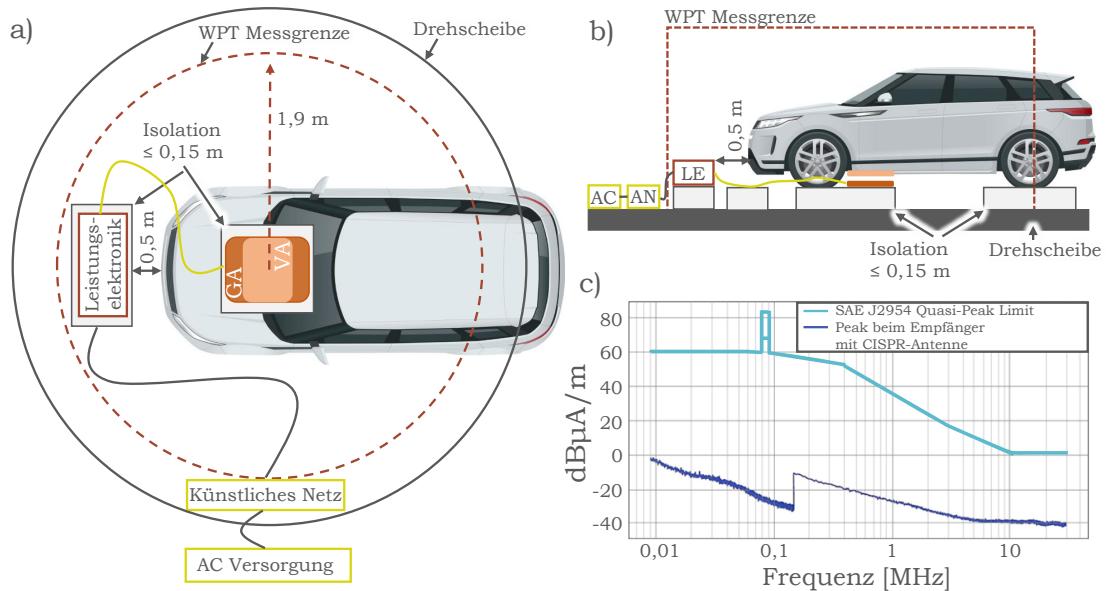


Abbildung B.6: Prüfaufbau zur Messung gestrahlter Emissionen des Fahrzeugs (Datenquelle: [35]): a) normgerechte Skizze (Draufsicht), b) normgerechte Skizze (Seitenansicht) und c) aktuelle Grenzwerte.

Die genannten Prüfungen und die verschiedenen Konfigurationen der EMV-Messungen, inklusive der Auslegung der Testabstände und der Simulation der Fahrzeugkarosserie mittels Stahlplatten, zeigen die Komplexität der EMV-Absicherung induktiver Ladesysteme. Diese kombinierten Messungen helfen, störende Emissionen zu identifizieren und gegebenenfalls Gegenmaßnahmen zu ergreifen, um die Anforderungen der EMV-Normen zu erfüllen. Eine Liste der spezifischen Prüfanforderungen findet sich in der ergänzenden Tabelle C.4, die den Schwerpunkt auf abgestrahlte Emissionen legt.

C Normenkatalog

C.1 Normen für Ladetechnologien

Tabelle C.1. Normen für induktive Ladesysteme.

Norm	Inhalt
ISO 19363 [55]	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge - Magnetfeld kabellose Energieübertragung - Sicherheits- und Interoperabilitätsanforderungen
IEC 61980 [56]	EV kabellose Energieübertragungssysteme <ul style="list-style-type: none"> - Teil 1: Allgemeine Anforderungen - Teil 2: Besondere Anforderungen für die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeug und Infrastruktur - Teil 3: Besondere Anforderungen für die Magnetfeld kabellose Energieübertragungssysteme
IEC 62764 [60]	Messverfahren für die von elektronischen und elektrischen Geräten im Automobilbereich erzeugten Magnetfeldstärken im Hinblick auf die menschliche Exposition <ul style="list-style-type: none"> - Teil 1: Niederfrequente Magnetfelder
CISPR 11 [59]	Industrielle, wissenschaftliche und medizinische Geräte <ul style="list-style-type: none"> - Funkstörmerkmale - Grenzwerte und Messverfahren
ISO 15118 [57]	Straßenfahrzeuge - Fahrzeug-zu-Netz-Kommunikationsschnittstelle <ul style="list-style-type: none"> - Teil 1: Allgemeine Informationen und Anwendungsfalldefinition - Teil 2: Netzwerk- und Anwendungsprotokollanforderungen - Teil 8: Physikalische Schicht und Datenverbindungsschichtanforderungen für kabellose Kommunikation

Tabelle C.2. Normen für konduktive Ladesysteme.

Norm	Inhalt
IEC 61851 [227]	EV konduktives Ladesystem <ul style="list-style-type: none"> - Teil 1: Allgemeine Anforderungen - Teil 21-1: EV-Onboard-Ladegerät - Teil 21-2: EMV-Anforderungen für konduktive Verbindung zur AC/DC-Versorgung - EMV-Anforderungen für Off-Board-EV-Ladesysteme - Teil 23: DC-Ladestation für Elektrofahrzeuge
IEC 62196 [228]	Steckdosen, Steckverbinder und Fahrzeugeinlässe <ul style="list-style-type: none"> - Konduktives Laden von EV - Teil 1: Allgemeine Anforderungen - Teil 2: Maßliche Kompatibilität und Austauschbarkeit von AC-Stift- und Kontaktzubehör - Teil 3: Maßliche Kompatibilität und Austauschbarkeit von DC- und AC/DC-Stift- und Kontaktzubehör
IEC 62752 [229]	Kabelintegrierte Steuer- und Schutzeinrichtung für Mode 2 Laden von Elektrofahrzeugen
IEC 62893 [230]	Ladekabel für EVs für Nennspannungen bis einschließlich 0,6/1 kV
ISO 15118 [57]	Straßenfahrzeuge <ul style="list-style-type: none"> - Fahrzeug-zu-Netz-Kommunikationsschnittstelle
ISO 17409 [231]	Elektrisch angetriebene Straßenfahrzeuge <ul style="list-style-type: none"> - Konduktive Energieübertragung - Sicherheitsanforderungen
IEC 60364 [232]	Niederspannungs-Elektroinstallationen <ul style="list-style-type: none"> - Teil 7-722: Anforderungen für spezielle Installationen oder Orte - Versorgungen für EVs

C.2 Normen für EMVU

Tabelle C.3. Normen und Richtlinien zur EMVU.

Nummer	Art	Titel
26. BImSchV	Norm	Verordnung über elektromagnetische Felder
BGR B11	Vorschrift	Elektromagnetische Felder - Unfallverhütungsvorschrift
DIN EN 50527	Norm	Verfahren zur Beurteilung der Exposition von Arbeitnehmern mit aktiven implantierbaren medizinischen Geräten (AIMD) gegenüber elektromagnetischen Feldern
DIN EN 61786	Norm	Messung von magnetischen Gleichfeldern und von elektrischen und magnetischen Wechselfeldern von 1 Hz bis 100 kHz im Hinblick auf die Exposition von Personen
DIN EN 61980	Norm	Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge
DIN EN 62110	Norm	Elektrische und magnetische Felder, die von Wechselstrom-Energieversorgungssystemen erzeugt werden
DIN EN 62233	Norm	Verfahren zur Messung der elektromagnetischen Felder von Haushaltsgeräten und ähnlichen Elektrogeräten im Hinblick auf die Sicherheit von Personen in elektromagnetischen Feldern
DIN EN 62311	Norm	Bewertung von elektrischen und elektronischen Einrichtungen in Bezug auf Begrenzungen der Exposition von Personen in elektromagnetischen Feldern (0 Hz bis 300 GHz)
ICNIRP 1998	Richtlinie	Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)
ICNIRP 2010	Richtlinie	Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Fields (1 Hz to 100 kHz)
ICNIRP 2020	Richtlinie	Guidelines for Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100 kHz to 300 GHz)
ISO 14117	Norm	Aktive implantierbare medizinische Geräte – Elektromagnetische Verträglichkeit – EMV Prüfverfahren für implantierbare Herzschrittmacher, implantierbare Defibrillatoren (ICD) und Resynchronisationsgeräte
SAE J2954	Norm	Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/ Electric Vehicles and Alignment Methodology

C.3 Normen für EMV-Prüfungen

Tabelle C.4. EMV-Standards für Emissionsprüfungen und Störfestigkeit an Offboard-Komponenten.

Standard	Prüfung	Schnittstelle	Betriebsmodus
Emissionsprüfungen			
IEC 61000-3-2 (Eingangsstrom < 16 A)	Oberschwingungen	Netzanschluss	Laden Standby
IEC 61000-3-12 (Eingangstrom < 75 A)			
IEC 61000-3-3 (Eingangsstrom < 16 A)	Spannungsschwankungen	Netzanschluss	Laden Standby
IEC 61000-3-11 (Eingangstrom < 75 A)	und Flicker		
FCC 18/15/f = 150 kHz - 30 MHz	Gleichtaktaussendung	Netzanschluss	Laden Standby
FCC 15/f = 150 kHz - 30 MHz	Gleichtaktaussendung	Signalleitung	Laden Standby
FCC 18/f = 9 kHz - 30 MHz	Abgestrahlte Emissionen	WPT-Systemebene	Laden Standby
FCC 15/f = 30 MHz - 10 GHz	Abgestrahlte Emissionen	WPT-Systemebene	Laden Standby
Kontinuierliche Wellen			
IEC 61000-4-6	Gleichtaktstörfestigkeit	Netzanschluss	Laden Standby
IEC 61000-4-3	Abgestrahlte Störfestigkeit	WPT-Systemebene	Laden Standby
IEC 61000-4-8	Magnetfeldstörfestigkeit	WPT-Systemebene	Laden Standby
Transiente Störungen			
IEC 61000-4-2	Elektrostatische Entladung	WPT-Systemebene	Laden Standby
IEC 61000-4-4	Schnelle Transiente Störungen	Netzanschluss	Laden Standby
IEC 61000-4-5	Überspannung	Netzanschluss	Laden Standby
IEC 61000-4-5	Überspannung	Signalleitung	Laden Standby
IEC 61000-4-11	Spannungsabfälle und -unterbrechungen	Netzanschluss	Laden Standby
IEC 61000-4-34			
IEC 60204-4-1	Harmonische Verzerrung	Netzanschluss	Laden Standby

C.4 Normen für Schaltschränke

Tabelle C.5. Normen für die Produktion und Installation von Schaltschränken

Kategorie	Standard	Titel
Äußere Einflüsse	DIN EN* 50102: 1997-09 (VDE** 0470-100: 1997-09)	Schutzarten durch Gehäuse für elektrische Betriebsmittel gegen äußere mechanische Beanspruchungen
	DIN EN 60529: 2014-09 (VDE 0470-1: 2014-09)	Schutzarten durch Gehäuse für elektrische Betriebsmittel gegen äußere Einflüsse
	DIN EN 124-1: 2015-09	Aufsätze und Abdeckungen für Verkehrsflächen Teil 1: Definitionen, Klassifizierung, allgemeine Baugrundsätze, Leistungsanforderungen und Prüfverfahren
	DIN 1045-2: 2008-08	Tragewerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
	DIN EN 61440: 2016-11 (VDE 0140-1: 2016-11)	Schutz gegen den elektrischen Schlag
	DIN EN 61557-8: 2015-12 DIN EN 61557-9: 2015-10 (VDE 0413-8/9)	Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1000V und DC 1500V - Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen Teil 8: Isolationsüberwachungsgeräte für IT-Systeme Teil 9: Einrichtungen zur Isolationsfehlersuche in IT-Systemen
	DIN EN 62020: 2021-10 (VDE 0683: 2021-10)	Elektrisches Installationsmaterial - Differenzstrom-Überwachungsgeräte für Haushaltsinstallationen und ähnliche Anwendungen (RCMs)

Tabelle C.6. Normen für die Produktion und Installation von Schaltschränken

Kategorie	Standard	Titel
Elektrotechnische Aspekte	DIN VDE 0100-100: 2009-06	Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 1: Allgemeine Grundsätze, Bestimmungen allgemeiner Merkmale, Begriffe
	DIN VDE 0100-410: 2018-10	Teil 4-41: Schutzmaßnahmen - Schutz gegen den elektrischen Schlag
	DIN VDE 0100-530: 2011-06	Teil 5-53: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel - Schalt- und Steuergeräte
	DIN EN 60034-1: 2019-09 (VDE 0530-1: 2019-09)	Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausstattung von Maschinen, allgemeine Anforderungen
	DIN IEC/TS* 60479-1: 2005-08	Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere
	DIN EN 60804: 2008-01	Isolationskoordination für elektrische Betriebsmittel in Niederspannungsanlagen
	DIN EN IEC 61980 (VDE 0122)	Elektrische Energieübertragung für Elektrofahrzeuge für die drahtlose Energieübertragung

D EMVU-Messungen

D.1 Allgemeine Dokumentation

1. Allgemein

- Datum und Uhrzeit
- Ort
- Versuchsleitung

2. Messparameter

- Magnetische Flussdichte B [in μT]
- Spannungen V [in V]
- Ströme I [in A]
- Betriebsfrequenz f [in kHz]
- Übertragungsleistung P [in kW]
- Ladezustand des Taxis SoC [in si %]
- Exakte Sondenposition und -höhe [in mm]

3. Messgerät

- Hersteller
- Typ und Modell
- Seriennummer
- Genauigkeit und Auflösung
- Einstellungen:

– Betriebsmodus (MODE)

- Exposure STD-Modus: Die Stärke des Magnetfeldes wird direkt als Prozentsatz des Referenzwertes angezeigt, unabhängig von Signalform und Frequenz. Es wird einfach die gewünschte Norm ausgewählt und interne Filter werden verwendet, um die erforderliche Frequenzantwort für die Grenzwerte nachzubilden.
- Field Strength-Modus: Der Feldstärke-Modus ist nützlich, wenn das zu messende Feld nur einen relevanten Frequenzanteil enthält. Das Ergebnis wird in mT oder μT angezeigt.

– **Untere Grenze des Frequenzbereichs (LOW CUT)**

Die standardmäßige Einstellung des Messbereichs ist 10 Hz bis 400 kHz.

Die untere Grenze des Frequenzbereichs kann auf 1 Hz reduziert oder auf 30 Hz angehoben werden.

– **Messbereich (RANGE)**

Der Messbereich kann je nach Messaufgabe zwischen den Einstellungen HIGH und LOW umgeschaltet werden. Wenn schwache Feldstärken gemessen werden sollen, kann die Genauigkeit der Messung durch die Wahl der Einstellung LOW verbessert werden.

– **Detektionsmodus (DETECT)**

Die verfügbaren Detektionsmodi werden in Abhängigkeit vom gewählten Betriebsmodus ausgewählt.

Detektionsmodus	Betriebsmodus	
	Feldstärke	Exposure STD
STND (Standard)		x
<i>Der in der Norm festgelegte Detektionsmodus wird automatisch eingestellt. RMS und PEAK können bei Bedarf ebenfalls gewählt werden.</i>		
RMS (Effektivwert)	x	x
<i>Der Effektivwert der isotropen Messung wird aus den RMS-Werten der drei einzelnen Messachsen abgeleitet.</i>		
PEAK (Spitzenwert)	x	x
<i>Der Spitzenwert der isotropen Messung wird aus dem Spitzenwert des Feldvektors abgeleitet. Die Phase in den drei einzelnen Messachsen wird berücksichtigt.</i>		

4. Messaufbau

- Skizzierung und Fotos
- Abstände zwischen Messgerät und Messobjekt
- Ausrichtung des Messgeräts
- Positionierung des WPT-Systems
- WPT-Konfiguration

5. Messmethode

- Messablauf (siehe Anhang D.2)
- Messfrequenz und Dauer

D.2 Messablauf und -reihen

Die Messabläufe und -reihen gewährleisten eine einheitliche Durchführung aller Messungen und sichern die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Zur Vergleichbarkeit der Messreihen wurden sämtliche Versuche nach einem standardisierten Verfahren durchgeführt.

Eine grundlegende Voraussetzung für die Messungen war, dass der Ladezustand der Energiespeicher der Elektrofahrzeuge vor Beginn der Versuche weitgehend entladen war. Ziel war es, den SoC auf etwa 10 % zu reduzieren, um konsistente Bedingungen für die induktiven Ladevorgänge und die Erfassung der elektromagnetischen Felder sicherzustellen. Die Vorgehensweise sieht wie folgt aus:

1. Möglichst optimale Positionierung ($x = 0, y = 0, \Delta z$):

- a) Messungen rundum das Elektrofahrzeug
 - auf Evaluationslinie in 500 mm Höhe
 - auf Evaluationslinie in 1.000 mm Höhe
 - auf Evaluationslinie in 1.500 mm Höhe
- b) Messungen unter dem Elektrofahrzeug
(*Magnetfeldsonde in unmittelbarer Nähe zur Primärspule*)
- c) Messungen im Innenraum des Elektrofahrzeuges
 - Fußraum
 - Sitzhöhe
 - Brusthöhe
 - Kopfhöhe

2. Positionierung mit Versatz in x- bzw. y-Richtung:

- a) Messungen neben dem Elektrofahrzeug auf der benachteiligten Seite
 - auf Evaluationslinie in 500 mm Höhe
 - auf Evaluationslinie in 1.000 mm Höhe
 - auf Evaluationslinie in 1.500 mm Höhe
- b) Messungen unter dem Elektrofahrzeug
(*Magnetfeldsonde in unmittelbarer Nähe zur Primärspule*)
- c) Messungen im Innenraum des Elektrofahrzeuges
 - Fußraum
 - Sitzhöhe
 - Brusthöhe
 - Kopfhöhe

D.3 EMVU-Messungen im Fahrzeuginnenraum des TALAKO-Prototyps

Die nachfolgend dokumentierten Messungen beziehen sich auf die im Kapitel 4.3.1 dargestellten Ergebnisse zur Erfassung der magnetischen Flussdichte im Fahrzeuginnenraum des TALAKO-Prototyps während des induktiven Ladevorgangs. Ziel der Messungen war die Bewertung der Exposition der Insassen gegenüber EMF gemäß den einschlägigen Grenzwerten für die magnetische Flussdichte.

Tabelle D.1. Protokoll zur EMVU-Messung des Fahrzeuginnenraums beim Prototyp.

Datum	30.03.2021
Uhrzeit	9.30 - 15.30 Uhr
Ort	Hermann-Kemper-Straße, 49762 Lathen
Versuchsleitung	A. Burkert Dr. M. Zang
Messgerät	narda ELT-400
Seriennummer	O-0327
Sonde	100 cm ²
Einstellung	320 µT, RMS, 30 Hz, Low (Mode, Detect, Low Cut, Range)
Messungenauigkeit	±4 % (50 Hz bis 200 kHz)
Versatz	x = 0, y = 0, z = 140mm
Betriebsfrequenz	85 kHz
Übertragungsleistung	20 kW



Abbildung D.1: Messpunkte a) auf den Klappsitzen, b) auf der Rückbank und c) auf dem Fahrersitz zu den Ergebnissen in Tabelle D.2.

Tabelle D.2. Ergebnisse der EMVU-Messungen im Fahrzeuginnenraums des Prototyps in Lathen.

Position der Sonde	Tür auf		Tür zu	
	$ \vec{B} _{\text{RMS}}$ [μT]	I_p [A]	$ \vec{B} _{\text{RMS}}$ [μT]	I_p [A]
Fahrersitz <i>Fahrertür auf</i>				
Kopfhöhe	0,26	56,4	0,18	56,1
Brusthöhe	0,78	55,7	0,44	56
Sitz	0,69	55,3	0,41	55,5
Fußraum	1,19	54,9	0,57	55,1
Klappsitz - iFR* links: <i>linke Hintertür auf</i>				
Kopfhöhe	0,73	56,7	0,14	57,8
Brusthöhe	0,76	57	0,26	57,9
Sitz	0,85	57,1	0,34	57,9
Fußraum	1,17	57,3	0,71	57,6
Klappsitz - iFR rechts: <i>rechte Hintertür auf</i>				
Kopfhöhe	0,6	58,2	-	-
Brusthöhe	0,9	58,1	-	-
Sitz	1,2	58,1	-	-
Fußraum	2,1	58	-	-
Klappsitz - mittig: <i>rechte Hintertür auf</i>				
Fußraum	0,82	58,3	-	-
Rücksitz - iFR rechts: <i>rechte Hintertür auf</i> <i>alle Türen zu</i> <i>alle Türen auf</i>				
Kopfhöhe	0,17	58,2	0,18	58,4
Brusthöhe	0,11	58,2	0,11	58,4
Sitz	0,28	58,2	0,16	58,4
Fußraum	1,05	58,2	0,62	58,4
			1,1	58

* in Fahrtrichtung

D.4 EMVU-Messungen bei 1 Taxi mit dem TALAKO-Pilotensystem

D.4.1 Optimale Positionierung

Tabelle D.3. Protokoll zur EMVU-Messung bei 1 Taxi mit Pilotensystem.

Datum	16.02.2022
Uhrzeit	11.30 - 15.30 Uhr
Ort	Hermann-Kemper-Straße, 49762 Lathen
Versuchsleitung	A. David, S. Stroka, H. Hensel
Messgerät	narda ELT-400
Seriennummer	O-0327
Sonde	100 cm ²
Einstellung	320 µT, RMS, 30 Hz, Low (Mode, Detect, Low Cut, Range)
Messungenauigkeit	±4 % (50 Hz bis 200 kHz)
Versatz	x = 0, y = 0, z = 140 mm
Betriebsfrequenz	85 kHz
Übertragungsleistung	20 kW



Abbildung D.2: Aufnahmen von den Messungen: a) auf 500 mm (rechte Hintertür), b) auf 1.000 mm (Fahrertür), c) auf 1.500 mm (Fahrertür) und d) eine Referenzmessung auf 500 mm.

Tabelle D.4. Ergebnisse der EMVU-Messungen um 1 Taxi mit Pilotsystem bei optimaler Positionierung.

Messpunkt	I_p [A]	U_p [V]	SoC [%]	$ \vec{B} _{\text{RMS}}$ [μT]
Fahrzeugfront				
500 mm	54,8	344	9	0,52
1.000 mm	54,8	347	17	0,44
1.500 mm	55,2	349	29	0,34
Beifahrertür				
500 mm	55,2	345	11	6,31
1.000 mm	54,8	347	19	2,91
1.500 mm	55,2	349	31	1,48
Rechte Hintertür				
500 mm	55,2	345	11	6,87
1.000 mm	55,2	348	20	3,12
1.500 mm	55,2	345	11	6,87
Fahrzeugheck				
500 mm	54,8	346	13	0,77
1.000 mm	54,8	348	21	0,56
1.500 mm	55,2	351	34	0,44
Linke Hintertür				
500 mm	55,2	343	7	6,67
1.000 mm	54,8	347	14	3,09
1.500 mm	54,8	349	24	1,5
Fahrertür				
500 mm	54,8	342	8	6,12
1000 mm	54,8	347	16	2,89
1500 mm	54,8	349	27	1,48

D.4.2 Mit Versatz in y-Richtung

Tabelle D.5. Protokoll zur EMVU-Messung bei 1 Taxi mit Pilotsystem.

Datum	16.02.2022
Uhrzeit	11.30 - 15.30 Uhr
Ort	Hermann-Kemper-Straße, 49762 Lathen
Versuchsleitung	A. David, S. Stroka, H. Hensel
Messgerät	narda ELT-400
Seriennummer	O-0327
Sonde	100 cm ²
Einstellung	320 µT, RMS, 30 Hz, Low
<i>(Mode, Detect, Low Cut, Range)</i>	
Messungenauigkeit	±4 % (50 Hz bis 200 kHz)
Versatz	$x = 0, y = -50 \text{ mm}, z = 140 \text{ mm}$
Betriebsfrequenz	85 kHz
Übertragungsleistung	20 kW

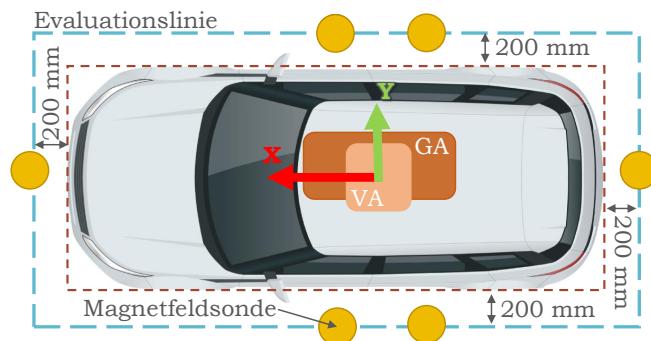


Abbildung D.3: Skizze zur EMVU-Messung mit Versatz bei 1 Taxi in y-Richtung.

Tabelle D.6. Ergebnisse der EMVU-Messungen bei 1 Taxi mit Pilotensystem bei Versatz $x = 0$, $y = -50$ mm, $z = 140$ mm.

Messpunkt	I_p [A]	U_p [V]	SoC [%]	$ \vec{B} _{\text{RMS}}$ [μT]
Fahrzeugfront				
500 mm	55,2	366	62	0,59
1.000 mm	55,2	370	67	0,48
1.500 mm	55,2	371	70	0,4
Beifahrertür				
500 mm	54,8	365	61	6,79
1.000 mm	55,2	369	66	3,31
1.500 mm	55,2	372	71	1,68
Rechte Hintertür				
500 mm	54,8	364	60	7,3
1.000 mm	55,2	368	65	3,45
1.500 mm	55,2	374	72	1,77
Fahrzeugheck				
500 mm	54,8	361	59	0,68
1.000 mm	55,2	367	64	0,52
1.500 mm	55,2	374	74	0,41

D.5 EMVU-Messungen bei 2 Taxis mit dem TALAKO-Pilotensystem

D.5.1 Optimale Positionierung

Tabelle D.7. Protokoll zur EMVU-Messung bei 2 Taxis mit dem Pilotensystem in optimaler Positionierung.

Datum	11.10.2022
Uhrzeit	09.00 - 14.30 Uhr
Ort	Dompropst-Ketzer-Straße, 50667 Köln
Versuchsleitung	A. David, S. Stroka
Messgerät	narda ELT-400
Seriennummer	O-0327, O-0328, O-03279, O-0330
Sonde	100 cm ²
Einstellung	320 µT, RMS, 30 Hz, Low (Mode, Detect, Low Cut, Range)
Messungenauigkeit	±4 % (50 Hz bis 200 kHz)
Versatz	$x = 0, y = 0, z = 140$ mm
Betriebsfrequenz	85 kHz
Übertragungsleistung	17,5 kW



Abbildung D.4: Aufnahmen von den Messungen: a) auf Bodenhöhe, b) auf 500 mm (Fahrzeugfront), c) auf 1.000 mm (rechte Fahrzeugseite) und d) auf 1.500 mm (rechte Fahrzeugseite).

Tabelle D.8. Ergebnisse der EMVU-Messung bei 2 Taxis beim Pilot in Köln.

Messpunkt	I_p [A]	U_p [V]	SoC [%]	$ \vec{B} _{RMS}$ [µT]	Vorderes Fahrzeug				Hinteres Fahrzeug			
					I_p [A]	U_p [V]	I_p [A]	U_p [V]	SoC [%]	$ \vec{B} _{RMS}$ [µT]		
Fahrzeugfront												
500 mm	50	345	17	0,51	50	347	18	-	-	-	-	
1.000 mm	50	347	22	0,42	50	348	24	-	-	-	-	
1.500 mm	50	349	32	0,34	50	350	32	-	-	-	-	
Beifahrertür												
56,4 mm *	50	351	41	12,5	50	354	42	11,74	11,74	11,74	11,74	
500 mm	50	345	16	5,92	50	347	17	5,8	5,8	5,8	5,8	
1.000 mm	50	346	21	2,82	50	348	23	2,81	2,81	2,81	2,81	
1.500 mm	50	348	30	1,52	50	350	30	1,44	1,44	1,44	1,44	
Rechte Hintertür												
56,4 mm	50	351	39	12,26	50	351	39	12,91	12,91	12,91	12,91	
500 mm	50	345	15	6,22	50	346	16	6,48	6,48	6,48	6,48	
1.000 mm	50	346	21	2,85	50	347	23	2,93	2,93	2,93	2,93	
1.500 mm	50	348	30	1,5	50	350	30	1,47	1,47	1,47	1,47	
Fahrzeugheck												
500 mm	50	345	15	-	50	347	17	0,67	0,67	0,67	0,67	
1.000 mm	50	347	23	-	50	347	23	0,51	0,51	0,51	0,51	
1.500 mm	50	349	33	-	50	351	33	0,42	0,42	0,42	0,42	
Mittig zwischen Beifahrertür und rechter Hintertür												
56,4 mm	50	353	45	411,8	50	357	48	344,4	344,4	344,4	344,4	
Mittig zwischen den Fahrzeugen												
56,4 mm	49,7	350	36	0,33	49,7	350	36	0,33	0,33	0,33	0,33	

* Bodenhöhe + Sondenradius = 0 mm + 56,4 mm

D.5.2 Mit Versatz in x-Richtung

Tabelle D.9. Protokoll zur EMVU-Messung bei 2 Taxis mit dem Pilotsystem mit Versatz in x-Richtung.

Datum	01.03.2022
Uhrzeit	11.30 - 14.30 Uhr
Ort	Hermann-Kemper-Straße, 49762 Lathen
Versuchsleitung	A. David, S. Stroka
Messgerät	narda ELT-400
Seriennummer	O-0327, O-0328, O-03279, O-0330
Sonde	100 cm ²
Einstellung	320 µT, RMS, 30 Hz, Low (Mode, Detect, Low Cut, Range)
Messungenauigkeit	±4 % (50 Hz bis 200 kHz)
Versatz	x = 210 mm, y = 0, z = 140 mm
Betriebsfrequenz	85 kHz
Übertragungsleistung	21 kW

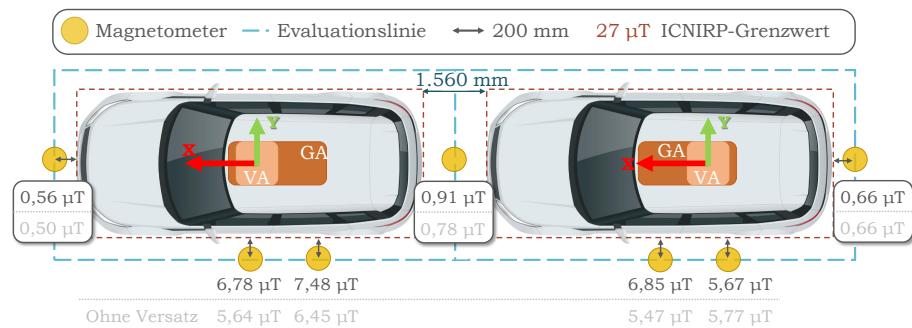


Abbildung D.5: Skizze zur EMVU-Messung mit Versatz bei 2 Taxis in x-Richtung mit Ergebnissen zur EMVU-Messung mit optimaler Positionierung.

Tabelle D.10. Ergebnisse der EMVU-Messung bei 2 Taxis mit dem Pilotensystem mit Versatz in x-Richtung.

Messpunkt	Vorderes Fahrzeug				Hinteres Fahrzeug			
	I_p [A]	U_p [V]	SoC [%]	$ \vec{B} _{RMS}$ [µT]	I_p [A]	U_p [V]	SoC [%]	$ \vec{B} _{RMS}$ [µT]
Fahrzeugfront								
500 mm	55,2	380	84	0,56	54,8	378	80	-
Fahrertür								
500 mm	54,8	378	81	6,85	54,8	375	76	6,78
Linke Hintertür								
500 mm	54,8	379	82	5,67	55,2	374	75	7,48
Fahrzeugheck								
500 mm	55,2	357	48	-	54,8	358	51	0,66
Mittig zwischen den Fahrzeugen								
56,4 mm*	54,8	372	72	0,32 - 0,91	54,8	374	75	0,32 - 0,91
500 mm	54,8	350	24	0,25 - 0,7	54,8	350	26	0,25 - 0,7

* Bodenhöhe + Sonderradius = 0 mm + 56,4 mm

D.6 Referenzmessung fürs TALAKO-Pilotsystem

Vor der Errichtung der Pilotanlage in der Dompropst-Ketzer-Straße in Köln wurden EMVU-Referenzmessungen durchgeführt. Ziel war es, die elektromagnetische Umgebungsbelastung unter realen Bedingungen zu erfassen, bevor die WPT-Systeme in Betrieb gingen. Die Referenzmessung dient als Vergleichsgrundlage für spätere Messungen mit aktivierten Ladesystemen und ermöglicht die Bewertung des Einflusses der Ladetechnik auf die magnetische Flussdichte im Umfeld. Mit einer Magnetfeldsonde wurde die Flussdichte an zahlreichen Punkten entlang der Straße und Taxispur gemessen (siehe Abbildung D.7). An allen Messpunkten wurde der Grenzwert von $27 \mu\text{T}$ eingehalten. Der Maximalwert von $0,3 \mu\text{T}$ entspricht 1 % des Grenzwertes. Eine Variation der Messhöhe zeigte keine Änderung der Messwerte.

Tabelle D.11. Protokoll zur Referenzmessung des TALAKO-Pilotsystems.

Datum	25.08.2021
Uhrzeit	10.15 - 11.30 Uhr
Ort	Dompropst-Ketzer-Straße, 50667 Köln
Versuchsleitung	A. Burkert, Dr. M. Zang
Messgerät	narda ELT-400
Seriennummer	O-0327
Sonde	100 cm ²
Einstellung	320 μT , RMS, 30 Hz, Low (<i>Mode, Detect, Low Cut, Range</i>)
Messgenauigkeit	$\pm 4 \%$ (50 Hz bis 200 kHz)
Messhöhe	1.100 mm (<i>vom Boden bis zur Sondenmitte</i>)



Abbildung D.6: Dompropst-Ketzer-Straße, 50667 Köln.

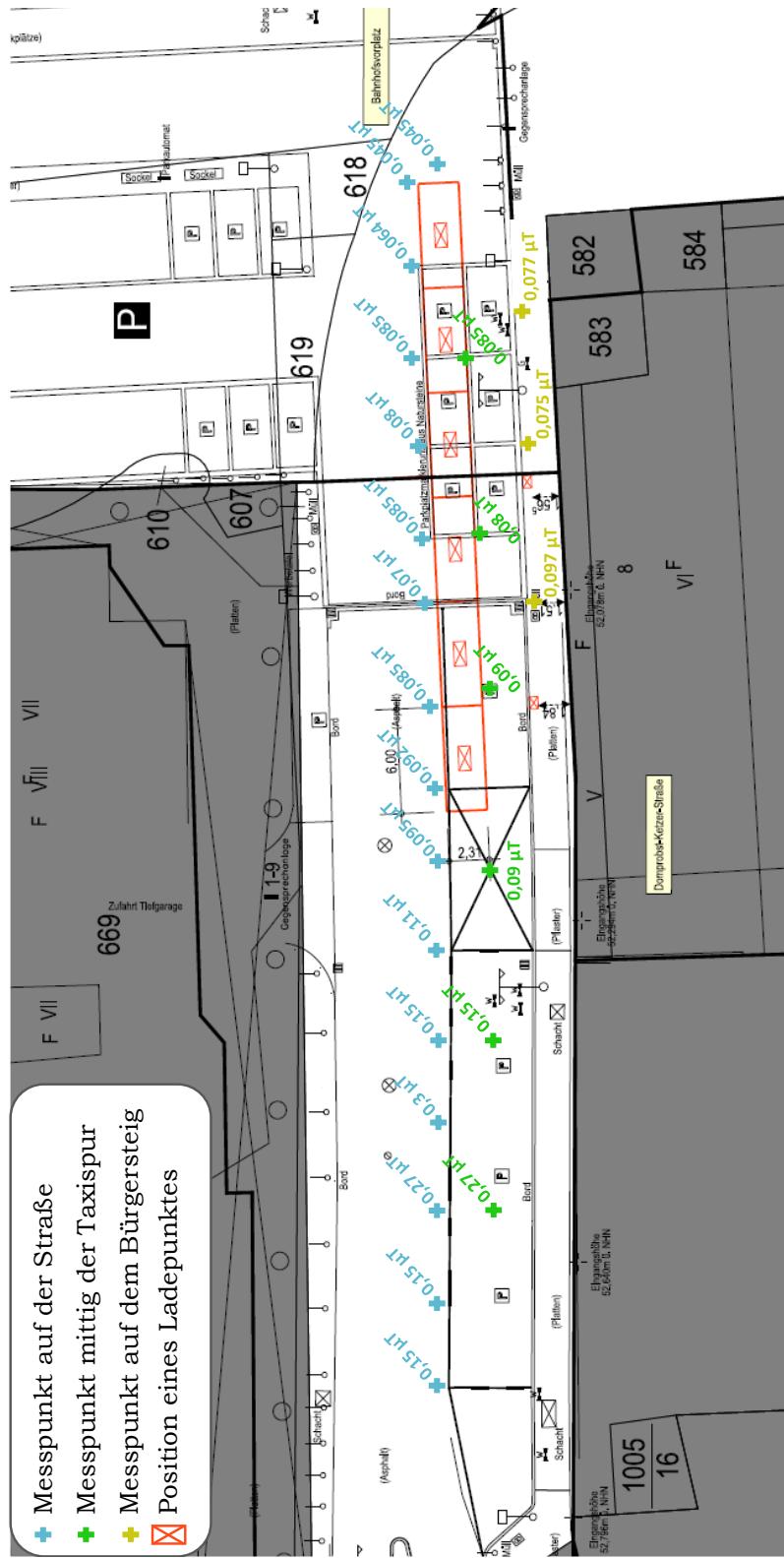


Abbildung D.7: Ergebnisse der Referenzmessung in der Domprobst-Ketzer-Straße, 50667 Köln.

E Publikationen

E.1 Eigene Publikationen

Veröffentlichungen in internationalen Journals mit Peer-Review

1. **A. David**, M. Tiemann, N. Haussmann, S. Stroka, M. Clemens and B. Schmuelling, “Electromagnetic Compatibility Evaluation of Wireless Charging Systems for Public Spaces: Wireless Power Transfer for Taxis”, *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 2-10, Nov. 2023, DOI: 10.1109/MIAS.2023.3325047.
2. **A. David**, M. Tiemann, M. Clemens and B. Schmuelling, “Magnetic Field Analysis of 50 kW Wireless Power Transfer System for Heavy Duty Vehicles”, *IEEE Transactions on Magnetics*, Aug. 2023, DOI: 10.1109/TMAG.2023.3306809.
3. **A. Burkert**, H. Fechtner and B. Schmuelling, “Interdisciplinary Analysis of Social Acceptance Regarding Electric Vehicles with a Focus on Charging Infrastructure and Driving Range in Germany”, *World Electric Vehicle Journal*, Jan. 2021, DOI: 10.3390/wevj12010025.

Veröffentlichungen auf internationalen Konferenzen

4. **A. David**, M. Tiemann, M. Clemens and B. Schmuelling, “Magnetic Field Analysis of 50 kW Wireless Power Transfer System for Heavy Duty Vehicles”, in *IEEE 24th International Conference on the Computation of Electromagnetic Fields (COMUPMAG 2023)*, Mai 2023.
5. **A. David**, S. Stroka, N. Haussmann, M. Clemens and B. Schmuelling, “Nutzbarkeitsuntersuchung von Unterflurschränken bei induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge im urbanen Raum” in *Wissenschaftsforum Mobilität 2022*, Jun. 2022, DOI: 10.1007/978-3-658-39438-7_12.
6. **A. David**, M. Tiemann, S. Stroka, N. Haussmann, M. Clemens and B. Schmuelling, “Electromagnetic Compatibility Evaluation of Wireless Charging Systems for Public Spaces” in *Second International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART 2022)*, Nov. 2022, DOI: 10.1109/SMART55236.2022.9990467.

7. **A. Burkert** and B. Schmuelling, “Comparison of Different Power Factor Correction Topologies on Conducted Emissions in WPT Systems for EVs” in *IEEE Vehicle Power and Propulsion (VPPC 2021)*, *IEEE Vehicle Power and Propulsion (VPPC 2021)*, Oct. 2021, DOI: 10.1109/VPPC53923.2021.9699216.
8. **A. Burkert** and B. Schmuelling, “Challenges Conceiving a Charging Infrastructure for Electric Vehicles - An Overview” in *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC 2019)*, Jan. 2020, DOI: 10.1109/VPPC46532.2019.8952408.
9. **A. Burkert**, K. Lambertz, S. Jeschke, J. Baerenfaenger and B. Schmuelling, “An Optimized Charging Infrastructure for Wireless Power Transfer Systems from an Economic View” in *IEEE 14. International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER 2019)*, Aug. 2019, DOI: 10.1109/EVER.2019.8813575.

Weitere Publikationen

10. **A. David**, S. Stroka, N. Haussmann, M. Clemens and B. Schmuelling, “Überprüfung der elektromagnetischen Umweltverträglichkeit bei induktiver Ladung” in *Induktive Taxiladung für den öffentlichen Raum - Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte*, H. Proff, M. Clemens, P. J. Marrón und B. Schmülling, Eds. Berlin: Springer Verlag, Mai 2023, ISBN: 978-3-658-39979-5.
11. **A. David**, S. Stroka, N. Haussmann, M. Clemens and B. Schmuelling, “Nutzbarkeitsuntersuchung von Unterflurschränken bei induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge im urbanen Raum” in *Towards the New Normal in Mobility*, H. Proff, Eds. Springer Gabler, Mai 2023, DOI: 10.1007/978-3-658-39438-7_12.

E.2 Beteiligung an weiteren Publikationen

Veröffentlichungen auf internationalen Konferenzen

1. M. Tiemann, **A. David**, N. Haussmann, S. Stroka, M. Clemens and B. Schmuelling, “Evaluation of Magnetic Field Exposure in Wireless Charging Systems for Autonomous Shuttles: Simulation vs. Real-World Measurements”, in *Third International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART 2024)*, Nov. 2024.
2. N. Haussmann, S. Stroka, M. Tiemann, **A. David**, B. Schmuelling and M. Clemens, “Technische Herausforderung und Umsetzung im MILAS-Projekt”, in *Wissenschaftsforum Mobilität 2024*, Jun. 2024.

3. M. Zang, N. Haussmann, S. Stroka, R. Mease, **A. Burkert**, A. Popp, B. Schmuelling and M. Clemens, “Personenschutz bei induktivem Laden von Fahrzeugbatterien - Ansätze zur praktikablen Echtzeitbestimmung der magneto-quasistatischen Körperexposition” in *Wissenschaftsforum Mobilität 2021*, Jun. 2021.
4. S. Jeschke, **A. Burkert**, B. Schmuelling and J. Baerenfaenger, “Vehicle Modelling During Emission Measurement of Wireless Charging Stations Using a Passive Impedance Network” in *IEEE Letters on Electromagnetic Compatibility Practice and Applications (L-EMCPA 2020)*, Sep. 2020.
5. M. Zang, N. Haussmann, R. Mease, **A. Burkert**, A. Popp, M. Tiemann, B. Schmuelling and M. Clemens, “Personenschutz bei induktivem Laden von Fahrzeugbatterien - numerische Simulationsverfahren zur Bestimmung der elektromagnetischen Körperexposition” in *Wissenschaftsforum Mobilität 2020*, Mar. 2020, DOI: 10.1007/978-3-658-32266-3_ 15.
6. S. Jeschke, M. Maarleveld, **A. Burkert**, B. Schmuelling and J. Baerenfaenger, “Entwicklung einer Ersatzlast zur Nachbildung des Fahrzeugs bei Emissionsmessungen an induktiven Ladesystemen” in *Internationale Fachmesse und Kongress für Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV 2020)*, Mar. 2020, pp. 55-62, DOI: 10.15488/10010.
7. M. Alsayegh, **A. Burkert**, M. Clemens and B. Schmuelling, “Comparison of Misalignment Impact on Multi-Coil Transmitters in Wireless Transfer Systems for Electric Vehicles” in *IEEE 21st Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2019 ECCE Europe)*, Nov. 2019, DOI: 10.23919/EPE.2019.8915467.
8. S. Jeschke, J. Baerenfaenger, **A. Burkert** and B. Schmuelling, “Challenges in EMC Testing of EV and EVSE Equipment for Inductive Charging” in *IEEE International Symposium and Exhibition on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe 2018)*, Okt. 2018, DOI: 10.1109/EMCEurope.2018.8484999.

F Betreute Abschlussarbeiten

F.1 Masterthesen

1. N. Bodde, *Entwicklung und Potentialuntersuchung von Unterflurschränken bei induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge im urbanen sowie ländlichen Raum*, August 2022.
2. Y. Wallenstein, *Entwicklung und Implementierung eines Line Impedance Stabilization Networks (LISN) bei induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge*, Dezember 2020.
3. M. Rak, *Erstellung einer Machbarkeitsanalyse von dynamisch induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge*, Dezember 2020.
4. K. Lambertz, *Entwicklung und Analyse eines infrastrukturellen Konzepts für eine optimierte Verteilung der induktiven Ladesysteme*, Juli 2019.
5. A. Gotic, *Analyse des Kopplungskoeffizienten mittels Simulation elektromagnetischer Wechselwirkungen unter Variation der Spulenparameter*, Februar 2019.

F.2 Bachelorthesen

6. J. El Ousrouti, *Simulationsgestützter Vergleich der magnetischen Streufelder von uni- und bipolaren Spulentoologien bei induktiven Ladesystemen für Elektrofahrzeuge*, April 2023.
7. P.-H. Homberg, *Simulation-Based Analysis of Different Power Factor Correction Topologies in Wireless Power Transfer for Electric Vehicles*, August 2020.
8. R. Schult, *Entwicklung und Implementierung einer adaptiven Frequenzregulierung für induktive resonanzbasierte Übertragungssysteme*, September 2018.