
Abschlussbericht zum Verbundvorhaben LISA4CL Laden – induktiv, schnell, autonom für City Logistik

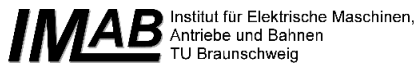


Zuwendungsempfänger (Förderkennzeichen)

03EMF0106A (TU Braunschweig), 03EMF0106D (INTIS)

Autoren

TU Braunschweig, elenia:	TU Braunschweig, IMAB:	INTIS:
Gian-Luca Di Modica	Tim-Hendrik Dietrich	Dr. Ralf Effenberger
Lukas Ebbert	Marius Becker	
Robin Herman	Prof. Dr.-Ing. Markus Henke	
Till Garn		
Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel		





Gesamtprojektleiter:	Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel
Bewilligungszeitraum:	01.05.2020 – 31.03.2024
Berichtsdatum	30.09.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr unter den Förderkennzeichen 03EMF0106A und 03EMF0106D gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.



Zuwendungsempfänger

Logo	Name	Anschrift
 <p>The logo block contains three logos stacked vertically. At the top is the seal of Technische Universität Braunschweig. Below it is the 'elenia' logo with the text 'Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme'. At the bottom is the 'IMAB' logo with the text 'Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen TU Braunschweig'.</p>	<p>TU Braunschweig elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme <i>(Koordinator)</i> IMAB Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen</p>	<p>Universitätsplatz 2 38106 Braunschweig</p>
 <p>The logo block contains the 'INTIS' logo, which consists of a stylized circular icon followed by the word 'INTIS' in blue capital letters.</p>	<p>INTIS – Integrated Infrastructure Solutions GmbH</p>	<p>Hermann-Kemper-Str. 23 49762 Lathen</p>

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	III
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Symbolverzeichnis	XV
Kurzfassung	XVII
1 Kurze Darstellung	1
1.1 Aufgabenstellung.....	1
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	1
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	3
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde.....	5
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2 Eingehende Darstellung	7
2.1 Entwicklung und Umsetzung eines induktiven Ladesystems mit hoher Ladeleistung.....	7
2.1.1 Konzeption Induktiv-Ladesystem mit 22 kW (AP 1.1).....	9
2.1.2 Entwicklung und Aufbau Primäreinheit (AP 1.2).....	24
2.1.3 Entwicklung und Aufbau Sekundäreinheit (AP 1.3)	35
2.1.4 Sicherheitskonzept und zugehörige Sensorik (AP 1.4).....	49
2.1.5 Anbindung an Fahrzeug-Systemarchitektur, Kommunikation und Steuerungsabläufe (AP 1.5).....	52
2.1.6 Ganzheitliche Integration der Kommunikationsstandards (AP 1.6)	56
2.1.7 Mechanische Integrationsuntersuchungen und Einbau der Sekundärladeeinheiten in die Fahrzeuge (AP 1.7)	65
2.1.8 Inbetriebnahme und Test des Gesamtsystems (AP 1.8)	72
2.2 Feldtest induktiv (AP 3.1).....	90
2.3 Intelligente Vernetzung zwischen Infrastrukturen und Fahrzeugen für ein erzeugungs- und netzorientiertes Laden der Elektrofahrzeuge.....	94
2.3.1 Konzepte für Erzeugungsorientiertes Laden von Elektrofahrzeugen (AP 2.1)	94
2.3.2 Konzepte für netzorientiertes Laden von Elektrofahrzeugen (AP 2.2) ...	107

2.3.3	Laboruntersuchungen (AP 2.3)	122
2.4	Feldtest induktiv (AP 3.2).....	136
2.5	Fazit und Ausblick	151
2.6	Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	153
2.7	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	159
2.8	Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes.....	161
2.9	Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen	168
2.10	Danksagung und Erfahrungen aus der Zusammenarbeit.....	169
2.11	Projektveröffentlichungen	172
	Literaturverzeichnis.....	174

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Projektüberblick LISA4CL	4
Abbildung 1-2: Übersicht und Zusammenarbeit der Projektpartner	5
Abbildung 2-1: Konzeptbild für das induktive Ladesystem	8
Abbildung 2-2: Allgemeine Übersicht eines unidirektionalen induktiven Ladesystems	9
Abbildung 2-3: Standardisierung des induktiven Ladens bei IEC (Stand: September 2024).....	11
Abbildung 2-4: Systemarchitektur für stationäre induktive Energieübertragungssysteme nach IEC 61980-3: 2022 [DIN22c].....	12
Abbildung 2-5: Einsatz eines vorgeschalteten Gytrators zur sinusförmigen Speisung der Primärspule	15
Abbildung 2-6: Gesamtkonzept der Energieübertragung	15
Abbildung 2-7 Simulationsmodell des Leistungspfad es	16
Abbildung 2-8: Regelkreis des Ladesystems	18
Abbildung 2-9: Untersuchte Spulentopologien	20
Abbildung 2-10: Ergebnisse des Topologievergleichs	22
Abbildung 2-11: Flussdichtebelastung des Ferrits in der Feinauslegung	23
Abbildung 2-12: Seitenansicht Primär- und Sekundärspule mit Abstand zwischen Ferrit und Aluminium	24
Abbildung 2-13: AFE im Schaltschrank, Zukaufteil, Siemens	26
Abbildung 2-14: Trenntransformator.....	28
Abbildung 2-15: Drossel des Gytrators	28
Abbildung 2-16: primärseitige Kompensationsbank, TUB-IMAB für Projekt LISA4CL	29
Abbildung 2-17: Netzwerk für Impedanzanpassung und Primärkompensation	29
Abbildung 2-18: Innerer Aufbau der Primärspule.....	31
Abbildung 2-19: Konstruktion der Primärspule	31
Abbildung 2-20: Leistungstest mit Labormustern der Spulen und des Wechselrichters.....	32
Abbildung 2-21: Ladeprozesssteuerung mit Systemüberwachung und Schnittstelle zur Fahrzeug-Drahtloskommunikation	33

Abbildung 2-22: Beispieldarstellung zum softwarebasierten Diagnosetool.....	34
Abbildung 2-23: Anordnung der Primäreinheit im Schaltschrank	35
Abbildung 2-24: Innerer Aufbau der Sekundärspule.....	36
Abbildung 2-25: Querschnitt durch die Sekundärspule.....	37
Abbildung 2-26: Leistungstest mit Labormustern der Spulen.....	38
Abbildung 2-27: Strom- und Spannungsverläufe während eines Leistungstests bei 22 kW.....	39
Abbildung 2-28: Kompensationsleiterkarten mit elastischer Befestigung	40
Abbildung 2-29: Blockschaltbild der Sekundärseite	41
Abbildung 2-30: Exemplarisches Verlustverhalten, Wirkungsgrad und Sperrschichttemperatur der Gleichrichterioden	43
Abbildung 2-31: Labormuster der sekundärseitigen Leistungselektronik	45
Abbildung 2-32: Überarbeitete Bauform der sekundärseitigen Leistungselektronik	46
Abbildung 2-33: Sekundärseitige Leistungselektronik während des Einbaus in das Fahrzeug	46
Abbildung 2-34: Fahrzeugseitige Baugruppe mit geschlossenem Gehäuse.....	47
Abbildung 2-35: Benutzerschnittstelle mit Anzeige der Daten während des Ladevorgangs.....	49
Abbildung 2-36: Laboraufbau zum Testen der Kommunikation zum Fahrzeug mittels CCS	53
Abbildung 2-37: Schaltplan CP-Platine	55
Abbildung 2-38: Layout CP-Platine	56
Abbildung 2-39: Produzierte CP-Platine.....	56
Abbildung 2-40: Kommunikationskonzept für das Gesamtsystem	58
Abbildung 2-41: EAAZE-Backendoberfläche für das induktive Ladesystem	59
Abbildung 2-42: Aufgezeichneter Ladevorgang im EAAZE-Backend	59
Abbildung 2-43: Weboberfläche des primärseitigen WPT-Controllers	60
Abbildung 2-44: Ablaufplan Ladevorgang in Anlehnung an [DIN22a]	62
Abbildung 2-45: Ablauf in der Ladephase Final Compatibility Check.....	63
Abbildung 2-46: Eine CAN-Nachricht der CAN-Datenbank.....	63
Abbildung 2-47: WPTCP_Req_CMD der CAN-Nachricht mit der ID 0x0.....	64

Abbildung 2-48: Steuergerät SECC in der CAN-Datenbank	64
Abbildung 2-49: Unterboden ohne Kunststoff-Verkleidung in Fahrtrichtung gesehen	66
Abbildung 2-50: Unterbodenbereich zwischen Hinterachse und Fahrzeugheck	67
Abbildung 2-51: Einbauposition der sekundärseitigen Komponenten im Laderaum	68
Abbildung 2-52: Maximal möglicher Federweg der Hinterachse bei Fahrzeug ohne Beladung	69
Abbildung 2-53: Schirmung am Unterboden mit Halteklammern	70
Abbildung 2-54: Spulenhalter fertig montiert	71
Abbildung 2-55: Ausgerüstetes Fahrzeug	71
Abbildung 2-56: Systemtest auf dem Prüfstand der INTIS GmbH in Lathen [NOV23]	72
Abbildung 2-57: Inbetriebnahme des Ladesystems im Fahrzeug	73
Abbildung 2-58: Foto vom Standort der EMV-Messungen	78
Abbildung 2-59: Hintergrundsignale H-Feld, 150 kHz bis 30 MHz (X-Richtung)	79
Abbildung 2-60: Hintergrundsignale H-Feld 150 kHz bis 30 MHz (Y-Richtung)	79
Abbildung 2-61: H-Feld 150 kHz – 30 MHz (X-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)	80
Abbildung 2-62: H-Feld 150 kHz – 30 MHz (Y-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)	80
Abbildung 2-63: H-Feld 9 kHz bis 150 kHz (X-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)	81
Abbildung 2-64: H-Feld 9 kHz bis 150 kHz (Y-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)	81
Abbildung 2-65: Hintergrundsignale (30 – 300 MHz) horizontal	82
Abbildung 2-66: Hintergrundsignale (30 – 300 MHz) vertikal	82
Abbildung 2-67: E-Feld (30 – 300 MHz, horizontal), Ladebetrieb (22 kW)	83
Abbildung 2-68: E-Feld (30 – 300 MHz, vertikal), Ladebetrieb (22 kW)	83
Abbildung 2-69: Hintergrundsignale (300 MHz – 1 GHz) horizontal	84
Abbildung 2-70: Hintergrundsignale (300 MHz – 1 GHz) vertikal	84
Abbildung 2-71: E-Feld (300 MHz – 1 GHz, horizontal), Ladebetrieb (22 kW)	85
Abbildung 2-72: E-Feld (300 MHz – 1 GHz, vertikal), Ladebetrieb (22 kW)	85
Abbildung 2-73: Ankunft des auslieferungsfertigen Fahrzeugs am NFF in Braunschweig	87

Abbildung 2-74: Primärschaltschrank mit Komponenten des Kommunikations- und Leistungspfad	88
Abbildung 2-75: Steuergeräteebene der Sekundärbox im Erprobungsfahrzeug mit Komponenten der Kommunikationsinfrastruktur	88
Abbildung 2-76 Energiemengen der Ladevorgänge gruppiert nach Startzeitpunkten	91
Abbildung 2-77: Leistungsverlauf des Tages mit der Spitzenlast	92
Abbildung 2-78: Auslastung des Netzanschlusspunkts	93
Abbildung 2-79: Illustration der beteiligten Normen beim Laden von Elektrofahrzeugen	94
Abbildung 2-80: Ablaufplan für die Entscheidung eines Ladeplans oder Laden mit maximaler Ladeleistung	96
Abbildung 2-81: Beispielhafte Prognose der PV-Erzeugung [SOL24]	101
Abbildung 2-82: Preisverlauf des entwickelten Preismodells auf Basis der Übertragungsnetzbetreiberzonen	102
Abbildung 2-83: Schematischer Ablauf zur Erstellung eines Ladeplans	104
Abbildung 2-84: $\cos\phi(P)$-Kennlinien in Anlehnung an [VDE18] und [DIM23]	109
Abbildung 2-85: $Q(U)$-Kennlinie in Anlehnung an [VDE18] und [DIM23]	109
Abbildung 2-86: $P(U)$-Kennlinie in Anlehnung an [WUS19] und [DIM23]	110
Abbildung 2-87: $Q(\Delta\phi_U)$-Kennlinie für Minuend in Phasenverschiebung in Anlehnung [DIM24]	110
Abbildung 2-88: $Q(\Delta\phi_U)$-Kennlinie für Subtrahend in Phasenverschiebung in Anlehnung [DIM24]	111
Abbildung 2-89: Netzmodell für ein Vorstadtnetz in Anlehnung an [DIM23]	112
Abbildung 2-90: Spannungsunsymmetrie, Phasenspannung und Blindleistung des Elektrofahrzeugs von Haushalt 17 des Strangs 8 im Hoch-Szenario in Anlehnung an [DIM23]	115
Abbildung 2-91: Spannungsunsymmetrie, Phasenspannung und Blindleistung des Elektrofahrzeugs von Haushalt 17 des Strangs 8 im Maximal-Szenario in Anlehnung an [DIM23]	117
Abbildung 2-92: Verteilung der maximalen Spannungsfälle für Netznutzungsfälle mit verschiedenen Ladestrategien und dynamischen Tarifen	120

Abbildung 2-93: Verteilung der maximalen Spannungsfälle für Netznutzungsfälle mit der Nutzung einer Q(U)-Regelung beim Ladevorgang.....	121
Abbildung 2-94: Blockschaltbild für den Laboraufbau der DC- Ladenachbildung.....	123
Abbildung 2-95: DC-Schaltbox.....	124
Abbildung 2-96: Integrierter Laboraufbau zur Nachbildung von DC- Ladevorgängen.....	125
Abbildung 2-97: Messbox mit dem Linax PQ5000 (mittig unten)	126
Abbildung 2-98: Schaltplan der Messbox	126
Abbildung 2-99: Laboraufbau der AC-Ladenachbildung	127
Abbildung 2-100: Blockschaltbild der AC-Ladenachbildung.....	128
Abbildung 2-101: Unterverteilung des elenia-Ladeparks – Laborkopplung und Energiemessung	128
Abbildung 2-102: Laboraufbau zum Testen der netzorientierten Regelungsmethoden in Anlehnung an [DIM24].....	129
Abbildung 2-103: Phasenspannungen, Phasenverschiebungen, Wirkleistung und Blindleistung für Index 7 des Netzsimulatorprofils mit den Spannungseffektivwertänderungen und P(U)&Q(U) in Anlehnung an [DIM24].....	133
Abbildung 2-104: Phasenspannungen, Phasenverschiebungen, Wirkleistung und Blindleistung für Index 18 des Netzsimulatorprofils mit den Phasenwinkeländerungen und $Q(\Delta\phi_u)$ in Anlehnung an [DIM24]	135
Abbildung 2-105: Einsatzbereite Primärkomponenten des Ladesystems in Berlin.....	136
Abbildung 2-106: Einsatzbereites Ladesystem an der TU Braunschweig	137
Abbildung 2-107: Ladevorgänge an einem Tag des Feldtests in Berlin	138
Abbildung 2-108: Ladezustand und Wirkleistung DC eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF.....	141
Abbildung 2-109: Ladezustand und Spannung DC eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF.....	141
Abbildung 2-110: Wirk-, Blind- und Scheinleistung am Netzeingang eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF	142

Abbildung 2-111: Leistungsfaktor am Netzeingang eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF.....	142
Abbildung 2-112: Wirkungsgrad eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF	143
Abbildung 2-113: DC-Ladeleistung und -Spannung eines konduktiven DC-Ladevorgangs mit dem e-Crafter	144
Abbildung 2-114: Schematischer Aufbau des Induktivladesystems mit Leistungsmesspunkten	144
Abbildung 2-115: Wirkungsgrad des Gesamtsystems über dem Versatz in x- und z-Richtung für $y = 75$ mm, $UZK = 650$ V, $UBatt = 340$ V.....	145
Abbildung 2-116: Wirkungsgrad des Gesamtsystems über der Batteriespannung $UBatt$ und der Zwischenkreisspannung UZK des Wechselrichters für $x = 0$ mm, $y = 75$ mm und $z = 165$ mm.....	146
Abbildung 2-117: Wirkungsgrad des Gesamtsystems η_{ges}, des Wechselrichters η_{WR}, der induktiven Energieübertragung η_{WPT} (Primär- zu Sekundärspule) und des Gleichrichters η_{GR} über dem Versatz in x-Richtung für $y = 75$ mm, $UZK = 650$ V und $UBatt = 340$ V.....	147
Abbildung 2-118: Zeitliche Verläufe von Spannung und Strom in der Primärspule u_{prim} und i_{prim} und des Wechselrichters u_{WR} und i_{WR} für $x = 0$ mm, $y = 75$ mm, $z = 165$ mm, $UZK = 365$ V und $UBatt = 340$ V.....	147
Abbildung 2-119: Zeitliche Verläufe von Spannung und Strom in der Primärspule u_{prim} und i_{prim} und des Wechselrichters u_{WR} und i_{WR} für $x = 100$ mm, $y = 75$ mm, $z = 165$ mm, $UZK = 365$ V und $UBatt = 340$ V	148
Abbildung 2-120: Beispiel zu Verlustbeiträgen des AFE	164

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wertevorgaben für die Systementwicklung.....	14
Tabelle 2-2: Verteilung der Ladedauern abhängig vom Startzeitpunkt des Ladevorgangs.....	91
Tabelle 2-3: Gewählte Annahmen für die optimale Auslegung der Erzeugungsanlagen	98
Tabelle 2-4: Ergebnisse der optimalen Auslegung der unterschiedlichen Erzeugungsarten	99
Tabelle 2-5: CO₂-Äquivalente für verschiedene Kraftwerke [LÜB07], [GAS22], [RAU12], [QUA22].....	103
Tabelle 2-6: Ergebnisse der unterschiedlichen Fälle ohne Leistungsbegrenzung	106
Tabelle 2-7: Ergebnisse der unterschiedlichen Fälle mit einer Leistungsbegrenzung von 25 kW.....	107
Tabelle 2-8: Durchdringungsszenarien in Anlehnung an [VAN21].....	113
Tabelle 2-9: Spannungsunsymmetrie für die verschiedenen Methoden im Hoch-Szenario in Anlehnung an [DIM23].....	114
Tabelle 2-10: Spannungsunsymmetrie für die verschiedenen Methoden im Maximal-Szenario in Anlehnung an [DIM23].....	116
Tabelle 2-11: Netzsimulatorprofil für Änderung der Spannungseffektivwerte in Anlehnung an [DIM24].....	130
Tabelle 2-12: Netzsimulatorprofil für Änderung der Phasenwinkel der Spannungen in Anlehnung an [DIM24]	131
Tabelle 2-13: k_{u2} in % für die Regelungsansätze in den Tests mit dem Netzsimulatorprofil für die Änderungen Spannungseffektivwerte in Anlehnung an [DIM24].....	132
Tabelle 2-14: k_{u2} in % für die Regelungsansätze in den Tests mit dem Netzsimulatorprofil für die Änderungen Spannungseffektivwerte in Anlehnung an [DIM24].....	134
Tabelle 2-15: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests in Berlin nach geladener Energie	139
Tabelle 2-16: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests am NFF nach geladener Energie	139

Tabelle 2-17: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests in Berlin nach Uhrzeit der Starte	140
Tabelle 2-18: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests am NFF nach Uhrzeit der Starte	140

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AC	Alternating Current
AFE	Active Front End
AP	Arbeitspaket
AS	Arbeitsschritt
BMS	Batteriemanagementsystem
CAD	Computer-Aided Design
CAN	Controller Area Network
CCCV	Constant Current Constant Voltage
CCS	Combined Charging System
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CP	Control Pilot
CPLD	Complex Programmable Logic Devices
DC	Direct Current
DIN	Deutsches Institut für Normung
EFZN	Energie-Forschungszentrum Niedersachsen
EMF	Elektromagnetisches Feld
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
EN	Europäische Norm
EV	Electric Vehicle
EVCC	Electric Vehicle Communication Controller
EVPC	Electric Vehicle Power Circuit
HF	Hochfrequenz
HMI	Human Machine Interface
HV	Hochvolt
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization

Abkürzung	Bedeutung
JSON	JavaScript Object Notation
L1, L2, L3	Außenleiter/ Phasen
LOD	Living Object Detection (dt.: Lebendobjekterkennung)
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MP	Messpunkt
NFF	Niedersächsisches Forschungszentrum Fahrzeugtechnik
OCPP	Open Charge Point Protocol
PD	Primary Device
PE	Protective Earth
PF	Power Factor
PFC	Power Factor Correction
PLC	Powerline Communication
PP	Proximity Pilot
PV	Photovoltaik
SAE	Society of Automotive Engineers
SD	Secondary Device
SECC	Supply Equipment Communication Controller
SiC	Siliciumcarbid
SoC	State of Charge
SPC	Supply Power Circuit
TCP	Transmission Control Protocol
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
WLAN	Wireless Local Area Network
WPT	Wireless Power Transfer
XML	Extensible Markup Language

Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung
A	Spulenquerschnitt in Quadratmeter (m^2)
g	Gleichzeitigkeit
I_1	Strom in Primärspule
I_2	Strom in Sekundärspule
k_{u2}	Spannungsunsymmetriefaktor in %
l	Spulenlänge in Meter (m)
M	Gegeninduktivität in Henry (H)
P	Wirkleistung in Watt (W)
P_1	Wirkleistung am Eingang in Watt (W)
P_2	Wirkleistung am Ausgang in Watt (W)
P_{EV}	Ladeleistung Elektrofahrzeug in Watt (W)
P_l	Kupferverluste
P_{max}	Maximale Wirkleistung in Watt (W)
P_{Peak}	Wirkleistungspeak in Watt (W)
P_t	Übertragene Leistung
Q	Blindleistung in Var (var)
Q_{max}	Maximale Blindleistung in Var (var)
R	Ohmscher Widerstand in Ohm (Ω)
S	Scheinleistung in VA
t	Zeit in Sekunden (s)
U	Spannung in Volt (V)
U_{Batt}	Batteriespannung in Volt (V)
U_n	Nennspannung in Volt (V)
U_{ZK}	Zwischenkreisspannung in Volt (V)
X	Reaktanz in Ohm (Ω)
X_L	Induktive Reaktanz in Ohm (Ω)

Symbol	Bedeutung
$\Delta\varphi_u$	Phasenverschiebung der Spannung in Grad (°)
η	Wirkungsgrad in %
ρ	Spezifischer Widerstand in Ohm-Meter (Ωm)
ω	Kreisfrequenz in 1/Sekunde (1/s)

Kurzfassung

Im Projekt LISA4CL wurde ein stationäres induktives Ladesystem mit einer Nennleistung von 22 kW entwickelt und praktisch getestet. Zusätzlich wurden intelligente Ladekonzepte zur Vernetzung von Elektrofahrzeugen und Infrastrukturen erarbeitet und erprobt, um beim Laden den Anteil erneuerbarer Energien zu erhöhen und einen Beitrag zur Netzstützung zu leisten.

Im ersten Projektteil wurde der Leistungspfad des induktiven Ladesystems unter Berücksichtigung bestehender Normen konzeptioniert. Die Konzeptionierung beinhaltet die Definition der Anforderungen des induktiven Übertragungssystems, die Auslegung des Spulensystems unter Betrachtung verschiedener Wicklungsanordnungen und die Erstellung eines Konzepts zur Regelung der Ladeleistung. Bei der Erarbeitung des Konzepts waren Optimierungen im Hinblick auf eine Maximierung des Wirkungsgrads ein Kernpunkt. Darüber hinaus wurden weitere Kriterien wie z. B. Feldbelastung, Fahrzeugintegration, Aufwand und Kompatibilität berücksichtigt. Im nächsten Schritt wurden die Primär- (Infrastrukturseite) und die Sekundäreinheit (Fahrzeugseite) des Ladesystems entwickelt und aufgebaut. Dies beinhaltet sowohl die Ladespulen als auch die erforderliche Leistungselektronik. Ein weiterer Teil der Entwicklung war die Aufstellung und Umsetzung eines Konzepts für die Kommunikations- und Steuerinfrastruktur. Die Kommunikation zwischen Primär- und Sekundäreinheit wurde in Anlehnung an bestehende Normen realisiert. Ein Sicherheitskonzept für die Zwischenraumüberwachung der Spulen war ein weiterer Bestandteil. Nach der Integration der Sekundäreinheit in das Erprobungsfahrzeug erfolgten die Inbetriebnahme und die Tests des Gesamtsystems. Mit Abschluss der Tests war das System im auslieferungsfähigen Zustand für den praktischen Betrieb.

Der zweite Projektteil befasste sich mit der Netz- und Systemintegration von Ladeinfrastruktur. Es wurden Konzepte für erzeugungs- und netzorientiertes Laden von Elektrofahrzeugen entwickelt. Dabei wurden unter anderem lokale und zentrale erneuerbare Energien, preisbasierte Ansätze, ökonomische sowie ökologische Optimierungen und netzdienliche Betriebsweisen berücksichtigt. Die erarbeiteten Methoden wurden sowohl simulativ als auch labortechnisch untersucht und erprobt. Darüber hinaus wurde ein Konzept für die Systemintegration des induktiven Ladesystems durch Anbindung an ein zentrales Lademanagementsystem erarbeitet und umgesetzt.

Im letzten Projektabschnitt wurde zunächst ein induktiver Feldtest bei einem Logistikunternehmen in Berlin durchgeführt. Dieser dient dem späteren Vergleich mit dem induktiven System. Zudem wurden gemessene Ladedaten in die Ladekonzepte des zweiten Projektteils einbezogen. Das induktive Ladesystem wurde im Rahmen eines Feldtests bei dem Logistikunternehmen in Berlin und anschließend an der TU Braunschweig im Realbetrieb getestet. Hiermit wurden die Praxistauglichkeit und Zuverlässigkeit des induktiven Ladens gezeigt, das Vorteile wie z. B. eine einfache Integration in Betriebsabläufe und eine nutzerfreundliche Anwendung aufweist. Der Wirkungsgrad des Systems ist mit Werten über 90 % bei Nennleistung vergleichbar zum induktiven Laden.

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Gerade bei vielgenutzten Fahrzeugen oder gar Flotten sind kurze Ladezeiten und damit verbundene möglichst kurze Standzeiten notwendig. Seit einigen Jahren werden induktive Ladesysteme entwickelt, die eine massive Steigerung der Kundenakzeptanz von Elektro- und Hybridfahrzeugen versprechen. Erste Standards und Normen sind entstanden, die die Grundlage für heutige Systeme mit Ladeleistungen bis 11 kW bilden. Allerdings sind die Ladezeiten mit diesen Ladeleistungen sehr hoch, weil diese Leistungsklasse primär für den Heimbedarf im Hinblick auf Ladungen über Nacht entwickelt wurde. Speziell für den öffentlichen Bereich und den Flottenbetrieb im nicht-öffentlichen Bereich werden schnellladefähige Systeme benötigt. Dementsprechend hat die Weiterentwicklung der Standards und Normen zu einem schnellladefähigen Induktivladesystem begonnen.

Darüber hinaus ist eine intelligente Netzintegration von Ladesystemen wichtig, weil die Durchdringung von Elektrofahrzeugen und folglich auch die Netzbelastung steigt. Die Gewährleistung eines sicheren Netzbetriebes steht im Vordergrund. Netzorientierte Ladeansätze spielen eine wichtige Rolle im Hinblick auf Netzentlastung und Minimierung von Netzausbau. Zusätzlich sind aus ökonomischer und ökologischer Sicht erzeugungsorientierte Ladeansätze zur Erhöhung des verwendeten Anteils an erneuerbaren Energien von besonderer Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Projekts LISA4CL ein schellladefähiges, induktives Ladesystem mit einer Ladeleistung von 22 kW, welches bestehende Normen berücksichtigt, entwickelt und im Realbetrieb innerhalb einer Logistikflotte praktisch erprobt. Zusätzlich wurde die Realisierung der Netz- und Systemintegration der Ladeinfrastruktur untersucht. Dies berücksichtigt erzeugungsorientierte und netzorientierte Ladekonzepte, um sowohl den Anteil von erneuerbaren Energien beim Laden zu erhöhen als auch die Netzzrückwirkungen von Elektrofahrzeugen zu minimieren bzw. weiterhin eine hohe Netzstabilität zu gewährleisten.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Logistikpartnerwechsel und Prüfstände

Der Projektpartner LieferFactory GmbH (Liefery), bei dem die Feldtests umgesetzt werden sollten, trat kurz nach Projektbeginn aus dem Projekt aus. Der Grund hierfür war die Betriebsschließung der Firma LieferFactory GmbH zum 28. Februar 2021. Diese wurde durch die Gesellschafter am 27. November 2020 beschlossen und bekanntgegeben. Infolgedessen

wurde die Fairsenden GmbH, ein Berliner Logistikunternehmen, neuer assoziierter Partner im Projekt, bei dem die Feldtests durchgeführt werden können.

Aufgrund der eingeschränkten Möglichkeiten des neuen Partners Fairsenden als Start-Up lagen bei der Infrastruktur für die Feldtests Änderungen im Vergleich zum Projektantrag vor. Bzgl. der Elektrofahrzeugflotte wurde für den induktiven Feldtest die vorhandene Flotte von Fairsenden verwendet. Weiterhin waren fünf Wallboxen im Einsatz. Volkswagen Nutzfahrzeuge stellte für die Entwicklung und Erprobung des induktiven Ladesystems einen e-Crafter bereit, der mit dem induktiven Ladesystem ausgerüstet und im induktiven Feldtest eingesetzt wurde.

Folglich konnte anstatt der ursprünglich geplanten drei Fahrzeuge nur noch ein Fahrzeug umgerüstet werden. Die im Projekt ursprünglich geplanten Felderfahrten aus dem Praxisbetrieb der Fahrzeuge konnten auch mit einem einzelnen e-Crafter gesammelt werden. Durch die Reduzierung der Fahrzeugflotte fand keine Einschränkung in der Qualität der Forschungsergebnisse statt. Im Rahmen der Forschung notwendige technische Anpassungen oder Untersuchungen am Fahrzeug hätten im Vergleich zum Betrieb mit drei Fahrzeugen jedoch zu Standzeiten des Einzelfahrzeugs geführt, die die effektiv nutzbare Zeit des Feldtests reduzieren. Die möglichen Einschränkungen konnten kompensiert werden, indem die nach der ursprünglichen Planung noch vorgesehenen Ladesysteme für zwei weitere Fahrzeuge in stationäre Prüfstände umgewandelt wurden. Damit standen neben den Ergebnissen aus dem Praxiseinsatz des induktivladefähigen Fahrzeugs zusätzlich Ergebnisse aus dem stationären Prüfstandbetrieb zur Verfügung, wodurch sich der Umfang der gewonnenen Daten vergrößerte. Da die Prüfstandkomponenten identisch zum im Fahrzeug verbauten Stand der Technik waren, konnten mithilfe der Prüfstände Untersuchungen und Experimente durchgeführt werden, ohne dabei das im Lieferbetrieb befindliche Fahrzeug zu blockieren. Die Projektziele waren nicht beeinträchtigt, weil das induktive Ladesystem weiterhin erprobt und mit dem induktiven System verglichen wurde. Es hatte sich ausschließlich die Anzahl der Fahrzeuge, die in den Feldtests zum Einsatz kamen, geändert.

COVID-19-Pandemie und Lieferengpässe

Die globalen Voraussetzungen unter denen das Projekt durchgeführt wurde, waren die COVID-19-Pandemie und Lieferengpässe. Diese resultierten in Verzögerungen während der Projektlaufzeit. Aufgrund der Corona-Maßnahmen war z. B. eine Vorplanung des induktiven Feldtests vor Ort beim Projektpartner nicht möglich (z. B. Besichtigung des Feldtestgeländes für Planungen zur Installation). Weiterhin wurde die Durchführung von Laboruntersuchungen durch die Coronamaßnahmen erschwert und der IT-Zugriff auf die Uni-Server aus dem Home-Office war stark ausgelastet. Der aktive Austausch zwischen den Projektpartnern war durch fehlende Präsenztermine beeinträchtigt.

Die Lieferverzögerungen und die angespannte Marktsituation bei der Beschaffung der Komponenten und Bauelemente für das induktive Ladesystem mit Lieferfristen von teilweise über ein Jahr bzw. daraus folgende Umplanungen bei den zu verwendenden Komponenten

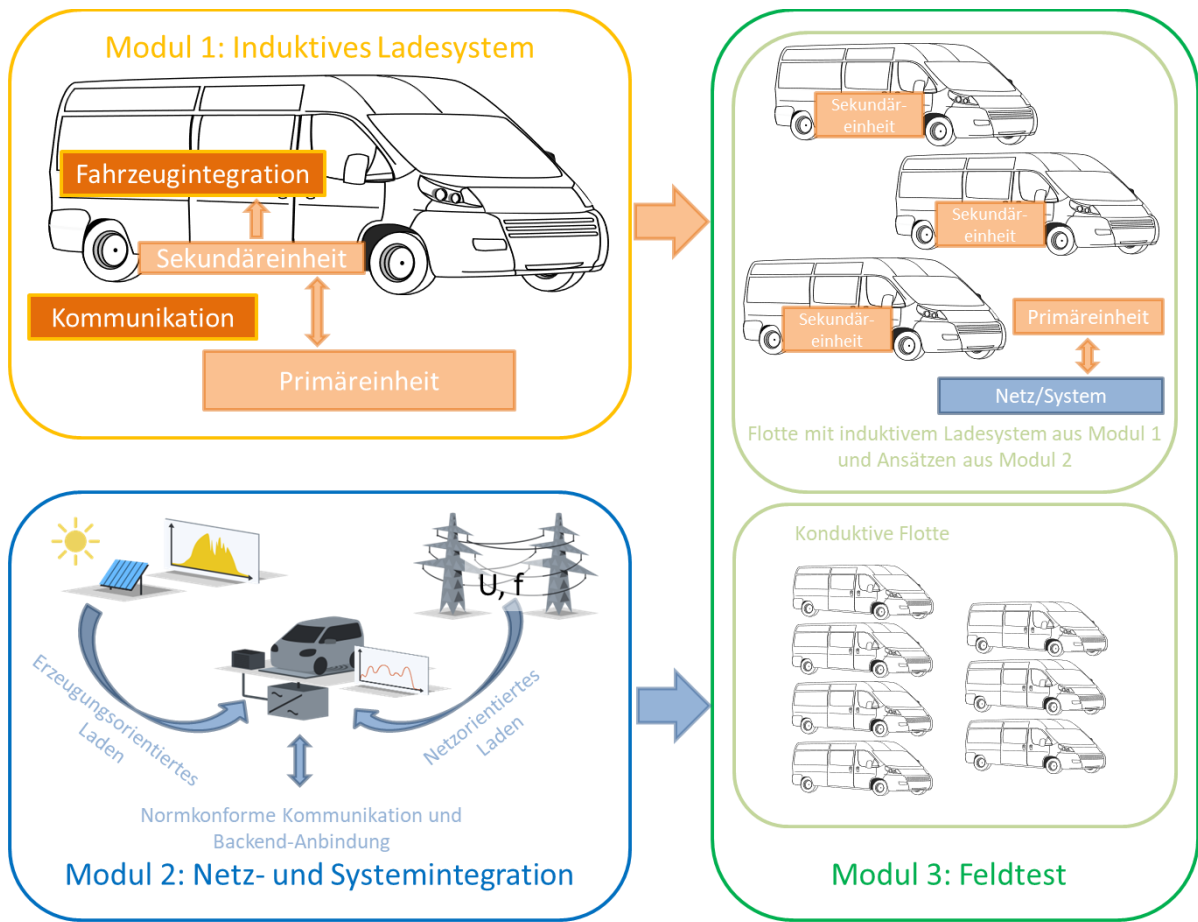
führten ebenfalls zu Verzögerungen. Die Verzögerungen wurden teilweise per Konstruktionsänderungen umgangen. Die generelle Verfügbarkeit von Materialien aufgrund von Lieferengpässen, vor allem im Halbleiterbereich, stellten ein Problem dar. Dies resultierte beispielsweise in einer verspäteten Durchführung der Gesamtsystemtests des Induktivladesystems. Dies führte zu einer Verzögerung des induktiven Feldtests.

Dauer induktiver Feldtest

Die Zeit für den induktiven Feldtest war aufgrund der vorigen Erläuterungen im Vergleich zur ursprünglichen Planung eingekürzt. Das induktive System wurde zunächst in Berlin bei Fairsenden im Flottenbetrieb erprobt. Aus betrieblichen Gründen der Fairsenden GmbH an ihrem Standort in Berlin, die einen Weiterbetrieb des Systems verhinderten, wurde das induktive Ladesystem zum Projektende am Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) installiert, um den Feldtest weiterzuführen. Die Nutzung und Erprobung des Systems erfolgte in diesem Rahmen durch das Gebäudemanagement der TU Braunschweig, um einen regelmäßigen Einsatz zu gewährleisten. Der induktive Feldtest am NFF wurde auch über die Projektlaufzeit hinweg fortgeführt, um weitere Erkenntnisse zu generieren und weitere Optimierungen durchzuführen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Abbildung 1-1 zeigt eine Übersicht des Projekts inklusive der enthaltenen Schwerpunkte. Das Projekt gliedert sich in drei Teile. Im ersten Teil wird ein schellladefähiges, induktives Ladesystem, das sich an vorhandene Normen und Standards orientiert, für die Anwendung in leichten Nutzfahrzeugen entwickelt und aufgebaut. Es kann im Vergleich zu aktuellen Normen höhere Leistungen von bis zu 22 kW bereitstellen. Das Ladesystem besteht aus der ortsfesten Ladestation (Primäreinheit) und der Sekundäreinheit, die in ein Versuchsfahrzeug integriert wird. Bei der Entwicklung wird auf die Ergebnisse der vorangegangenen Projekte *emil* und *InduktivLaden* (auch unter dem Namen *emilia* bekannt), in dem ein induktives Ladesystem für einen e-Golf umgesetzt wurde, zurückgegriffen. Der zweite Projektteil umfasst die Netz- und Systemintegration von Ladeinfrastruktur. Hierbei werden netzdienliche und erzeugungsorientierte Konzepte für das Laden entwickelt, welche mit Simulationen und im Labor untersucht werden. Im letzten Teil werden Feldtests durchgeführt. Dabei wird im ersten Schritt ein Feldtest mit induktiver Ladetechnik durchgeführt und im zweiten Teil wird das entwickelte Induktivladesystem im Realbetrieb erprobt. Anschließend erfolgt auf Basis der Ergebnisse ein Vergleich der beiden Technologien. [DIM21]



© TU Braunschweig, elenia

Abbildung 1-1: Projektüberblick LISA4CL

Abbildung 1-2 zeigt die Zusammenarbeit und Schnittstellen der beteiligten Einrichtungen. Die Entwicklung des induktiven Ladesystems erfolgt durch die geförderten Partner. Dies sind die Institute elenia und IMAB der TU Braunschweig sowie die INTIS – Integrated Infrastructure Solutions GmbH. Durch die Mitwirkung des Industriepartners INTIS wird ein hoher Praxisbezug sichergestellt. VW stellt das Fahrzeug bereit, das mit dem induktiven Ladesystem ausgestattet wird. Dies ist ein VW e-Crafter. Die Feldtests werden bei der Fairsenden GmbH und am NFF durchgeführt. Die Berliner Agentur für Elektromobilität eMO steht dem Projekt als Promoter zur Verfügung.

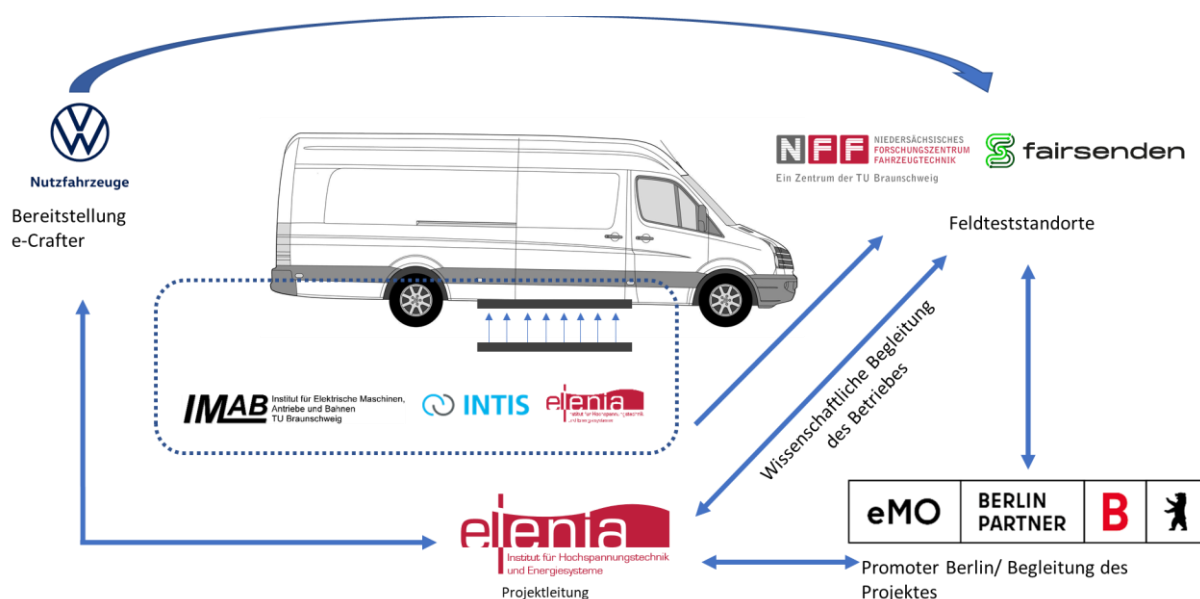


Abbildung 1-2: Übersicht und Zusammenarbeit der Projektpartner

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der aktuelle Stand der Technik des induktiven Ladens ist mit dem zwischenzeitlich erreichten Fortschritt der Standardisierung des induktiven Ladens für Anwendungen im öffentlichen Raum sehr gut abgebildet, insbesondere bei den Standardisierungsgremien von IEC und ISO. Die Normenreihe IEC 61980-1 bis -3 sichert die Standardisierung der straßenseitigen Technik ab und ISO 19363 die Standardisierung der fahrzeugseitigen Technik. Das Projekt LISA4CL hatte den in beiden Normenreihen noch nicht vollständig harmonisierten Leistungsbereich von 11 bis 22 kW im Fokus (WPT4), insbesondere hinsichtlich eines Angebots für Referenzübertragungsspulen. Zudem sind die Ergebnisse des Projekts LISA4CL außerordentlich wertvoll für die Standardisierung des induktiven Ladens für höhere Leistungsbereiche (IEC 61980-4, einschließlich und oberhalb 22 kW). INTIS hat im Laufe des Projekts immer dafür Sorge getragen, dass sich die Arbeiten im Projekt LISA4CL am aktuellen Stand der Technik des induktiven Ladens orientieren und zudem so angelegt sind, dass sie den Stand der Technik voranbringen können. Hierbei halfen auch viele Erfahrungen aus Projekten, die INTIS bereits vor bzw. während der Projektlaufzeit von LISA4CL erfolgreich umsetzen und abschließen konnte (siehe unter anderem TALAKO). INTIS hat Ergebnisse aus dem Projekt LISA4CL ständig und zeitnah an DKE 353.0.1, dem deutschen Spiegelgremium von IEC TC 69 WG 7, berichtet.

Bestehendes Wissen und Erfahrungen aus abgeschlossenen Forschungsprojekten brachten auch die beiden Institute elenia und IMAB der TU Braunschweig in das Projekt LISA4CL ein. Beispielhaft sind die abgeschlossenen Forschungsprojekte *emil* und *InduktivLaden (emilia)* zu

nennen. Dabei wurde sowohl Wissen zur induktiven Ladetechnik als auch zu intelligenten Ladekonzepten wiederverwertet.

Darüber hinaus wurden Fachliteratur sowie Informations- und Dokumentationsdienste genutzt. Die genutzte Fachliteratur ist an den jeweiligen Stellen im Bericht und in allen Arbeitsdokumenten als Quellen gekennzeichnet. Beispielhaft sind die Informationsdienste IEEE-Xplore, allgemeine Internetrecherche, Normenbibliothekonline (vom VDE), Universitätsbibliotheken, vorhandenes Wissen und Know-How der Institute (mit sämtlichem Know-How für Gerätschaften) zu nennen. Als Dokumentationsdienst diente der Cloud-Dienst der TU Braunschweig (Nextcloud).

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Rahmen des Projekts LISA4CL erfolgt eine Zusammenarbeit des elenia der TU Braunschweig mit dem Technologie- und Softwareunternehmen agency GmbH bzw. deren Tochterunternehmen EAAZE GmbH hinsichtlich Backend/Lademanagementsystem und Entwicklung eines Energiemanagements. In LISA4CL wird die EAAZE-Backendsoftware verwendet. Die in LISA4CL entwickelte induktive Ladestation wird mittels OCPP in das EAAZE-Backend eingebunden. Das EAAZE-Backend wird auch von den für den induktiven Feldtest beschafften Wallboxen der Firma Pion AG verwendet, welche ebenfalls mit agency zusammenarbeiten und deren Backend verwenden. Zusätzlich entwickeln elenia und agency gemeinsam ein Energiemanagementsystem, um unter anderem verschiedene Ladekonzepte zu realisieren wie die dynamische Anpassung des Ladestroms.

2 Eingehende Darstellung

Im Folgenden wird das Projekt mit seinen Untersuchungen und Ergebnissen eingehend erläutert. Die Projekthalte sind nach den Modulen gemäß dem Aufbau in Abbildung 1-1 gegliedert. Im Vordergrund steht die Erreichung der folgenden Ziele, die nach induktiven und intelligenten Laden unterteilt sind.

Induktives Laden:

- Entwicklung eines induktiven Ladesystems mit hohem Wirkungsgrad
- Praxistauglichkeit von induktiven Ladesystemen zeigen, speziell für den Anwendungsfall City-Logistik
- Beleg der Vorteile von induktivem Laden in der Praxisanwendung
- Unterstützung bei der Normung von induktiven Ladesystemen bis 22 kW
- Aufstellung von Handlungsempfehlungen bzgl. induktiver Ladesysteme

Intelligentes Laden:

- Geeignete Maßnahmen zur Netzstützung für die Anwendung beim Laden von Elektrofahrzeugen bereitstellen
- Methoden zur Integration erneuerbarer Energien beim Laden definieren
- Möglichkeiten für einen ökonomischen und ökologischen Betrieb von Elektrofahrzeugflotten liefern
- Praxistauglichkeit von netzorientierten Ladekonzepten aus technischer Sicht zeigen
- Praxistauglichkeit der Systemintegration von induktivem Laden (vergleichbar zum konduktiven Laden) zeigen

2.1 Entwicklung und Umsetzung eines induktiven Ladesystems mit hoher Ladeleistung

Das Modul 1 beinhaltet die Konzeption und die Entwicklung des induktiven Ladesystems. Dies berücksichtigt die technische Realisierung eines Prototyps für den Einsatz im Rahmen der Feldtests. Abbildung 2-1 stellt das Konzeptbild für das entwickelte induktive Ladesystem dar. Bei der Umsetzung des Gesamtsystems sind die infrastrukturseitige Ladeeinheit (Primärladeeinheit) und die fahrzeugseitige Ladeeinheit (Sekundärladeeinheit) von besonderer Bedeutung. Diese beiden Teile beinhalten den Leistungspfad mit den Ladespulen zur induktiven Übertragung und den leistungselektronischen Komponenten. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil sind die kommunikations- und steuerungstechnischen Komponenten des Systems, die ebenfalls nach Infrastruktur- und Fahrzeugseite unterteilt werden können. Die kommunikative und leistungstechnische Anbindung der Sekundäreinheit des induktiven Ladesystems an das Fahrzeug, speziell den VW e-Crafter, erfolgt über das Combined

Charging System (CCS). Weiterhin werden ein Sicherheitskonzept erstellt und die dazugehörigen sicherheitsrelevanten Aspekte wie eine Living Object Detection (LOD) umgesetzt. Neben dem Aufbau und der Integration des Systems sind Funktions- und Qualitätstests bei der Entwicklung relevant. Es werden sowohl Komponententests der einzelnen Bestandteile des Systems als auch Gesamtsystemtests durchgeführt. Iterationsstufen zur Anpassung und Verbesserung des Systems sind dabei enthalten. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts wird auf die einzelnen Stufen der Konzeptionierung und Entwicklung eingegangen.

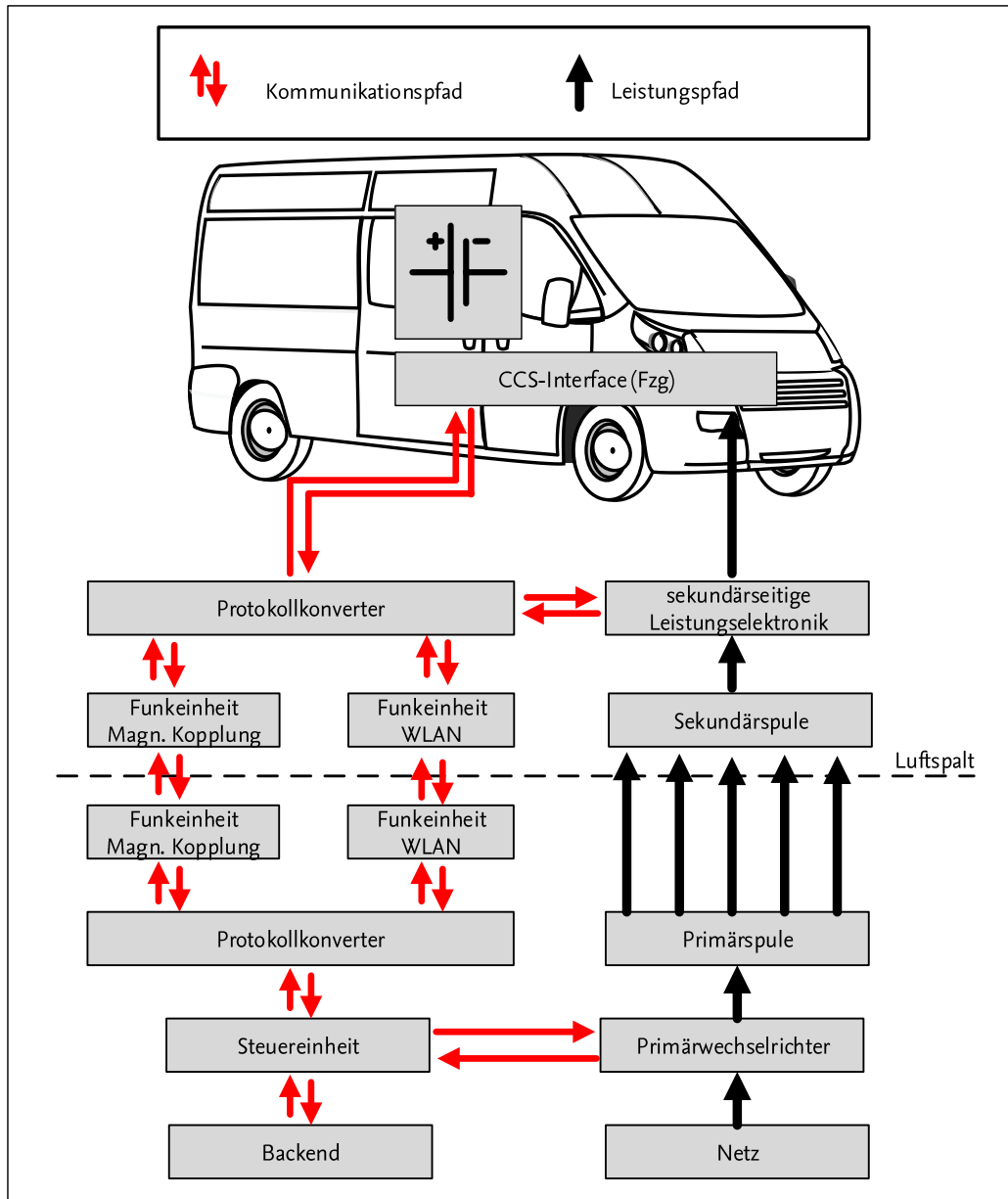


Abbildung 2-1: Konzeptbild für das induktive Ladesystem

Im Projekt LISA4CL wird ein unidirektionales stationäres induktives Ladesystem realisiert. Abbildung 2-2 zeigt eine Übersicht der verschiedenen Komponenten des Leistungs- und Kommunikationspfads der Primär- und Sekundärseite, die im Gesamtsystem berücksichtigt werden.

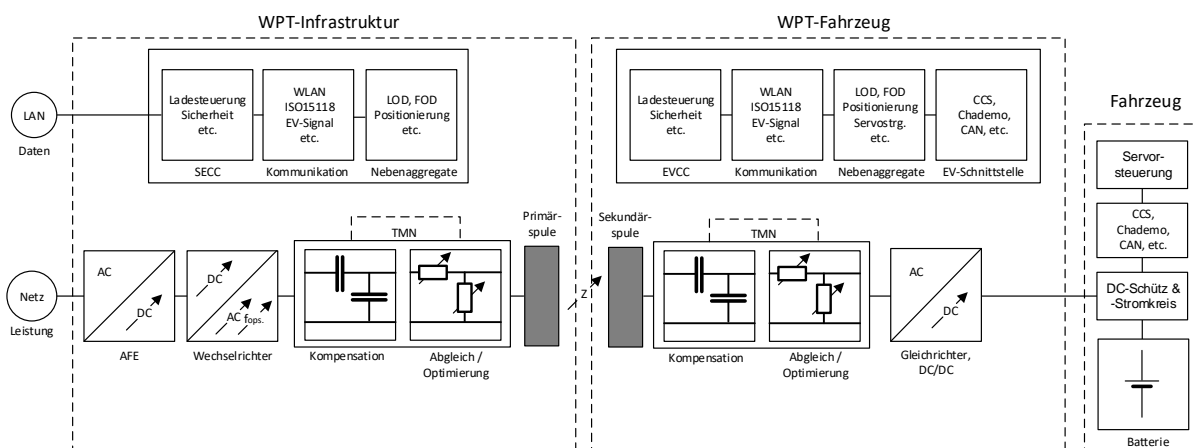


Abbildung 2-2: Allgemeine Übersicht eines unidirektionalen induktiven Ladesystems

2.1.1 Konzeption Induktiv-Ladesystem mit 22 kW (AP 1.1)

Stationäre induktive Ladesysteme bestehen grundlegend aus einer ortsfesten Ladestation mit zugehörigem Netzanschluss, die über eine am Boden montierte Spule ein magnetisches Wechselfeld erzeugt, mit dessen Hilfe in der fahrzeugseitigen Empfängerspule eine Spannung induziert wird. Mithilfe einer nachgelagerten Leistungselektronik wird der Ladestrom für die Traktionsbatterie des Fahrzeugs entsprechend aufbereitet. Die ortsfeste Übertragungseinrichtung wird in der Literatur oftmals als *Ground Assembly (GA)* oder als *Primärseite* bezeichnet. Die entsprechende Empfangseinrichtung am Fahrzeug wird dementsprechend als *Vehicle Assembly (VA)* oder als *Sekundärseite* bezeichnet.

Abseits der eigentlichen elektromagnetischen Übertragung sind für ein funktionierendes Energieübertragungssystem jedoch noch weitere Baugruppen notwendig, die teils dem Leistungspfad (Netzanschluss, Wechselrichter, Kompensation der Blindleistung, Gleichrichtung, Anschluss an die Traktionsbatterie des Fahrzeugs) zugerechnet werden können und anderenfalls der Peripherie angehören (Steuerung, Drahtloskommunikation zwischen Primär- und Sekundärseite, Sensorik und Messtechnik, Datenschnittstelle zum Fahrzeug, Überwachungseinrichtungen und Sicherheitsfunktionen etc.).

Alle diese Komponenten bilden zusammen das Ladesystem, wobei die Topologie und die Ausgestaltung jeder einzelnen Komponente unter Berücksichtigung der Anforderungen an das Gesamtsystem und der notwendigen Schnittstellen zu den übrigen Komponenten erfolgen muss. Aus diesem Grund wird für das zu entwickelnde Ladesystem zunächst ein Anforderungskatalog aufgestellt und anschließend das Gesamtsystem konzeptioniert. Die Gestaltung der Primär- und Sekundärseite wird in den folgenden Abschnitten genauer beschrieben.

Aufstellen eines grundlegenden Anforderungskataloges

Vor dem Beginn der Konzeptionierung wurde ein Anforderungskatalog aufgestellt, der die gewünschten Eigenschaften des zu entwickelnden Ladesystems definiert. Mit fortschreitender

Ausarbeitung des Gesamtkonzeptes wurde dieser Anforderungskatalog fortlaufend erweitert und detailliert.

An das zu entwerfende Ladesystem werden folgende grundsätzliche Anforderungen gestellt:

Funktionale Eigenschaften

- Ausreichend große Versatztoleranz für manuelle Parkvorgänge
- Anbindung an die Hochvolt (HV)-Batterie des Fahrzeugs über CCS-Schnittstelle
- Aufrechterhaltung der konduktiven Ladefunktionen zur wahlweisen Nutzung
- Benutzerschnittstelle für die problemlose Verwendung des Ladesystems durch eingewiesenes Personal
- Drahtlose Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation

Elektrische Eigenschaften

- Ladeleistung 22 kW unidirektional
- Hoher Wirkungsgrad
- Netzdienliche Anbindung des Ladesystems an das Versorgungsnetz
- Kompatibilität zu den elektrischen Eigenschaften des Zielfahrzeugs (VW e-Crafter)

Konstruktive Eigenschaften

- Berücksichtigung der baulichen Gegebenheiten und zulässigen Änderungen am Einsatzort des Ladesystems (Fairsenden, Berlin)
- Kein Einbau in den Boden zulässig, Primärspule in Oberflächenmontageausführung
- Aufstellen des Schaltschranks im Betriebsgebäude mit entsprechend langer Zuleitung zur Primärspule
- Konstruktion der fahrzeugseitigen Komponenten entsprechend der Eigenschaften des Zielfahrzeugs

Sicherheit

- Sicherheitskonzept zur Ermöglichung des Betriebs im (halb-)öffentlichen Bereich
- Einhaltung geforderter Grenzwerte für elektromagnetische Felder (EMF) und elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Ausgehend von diesen Anforderungen wurden die für das Ladesystem benötigten Komponenten entwickelt.

Orientierung an den Normen für das induktive Fahrzeugladen im öffentlichen Raum

Eine Übersicht über den gegenwärtigen Stand der Standardisierung des induktiven Ladens bei IEC zeigt die nachfolgende Abbildung 2-3:

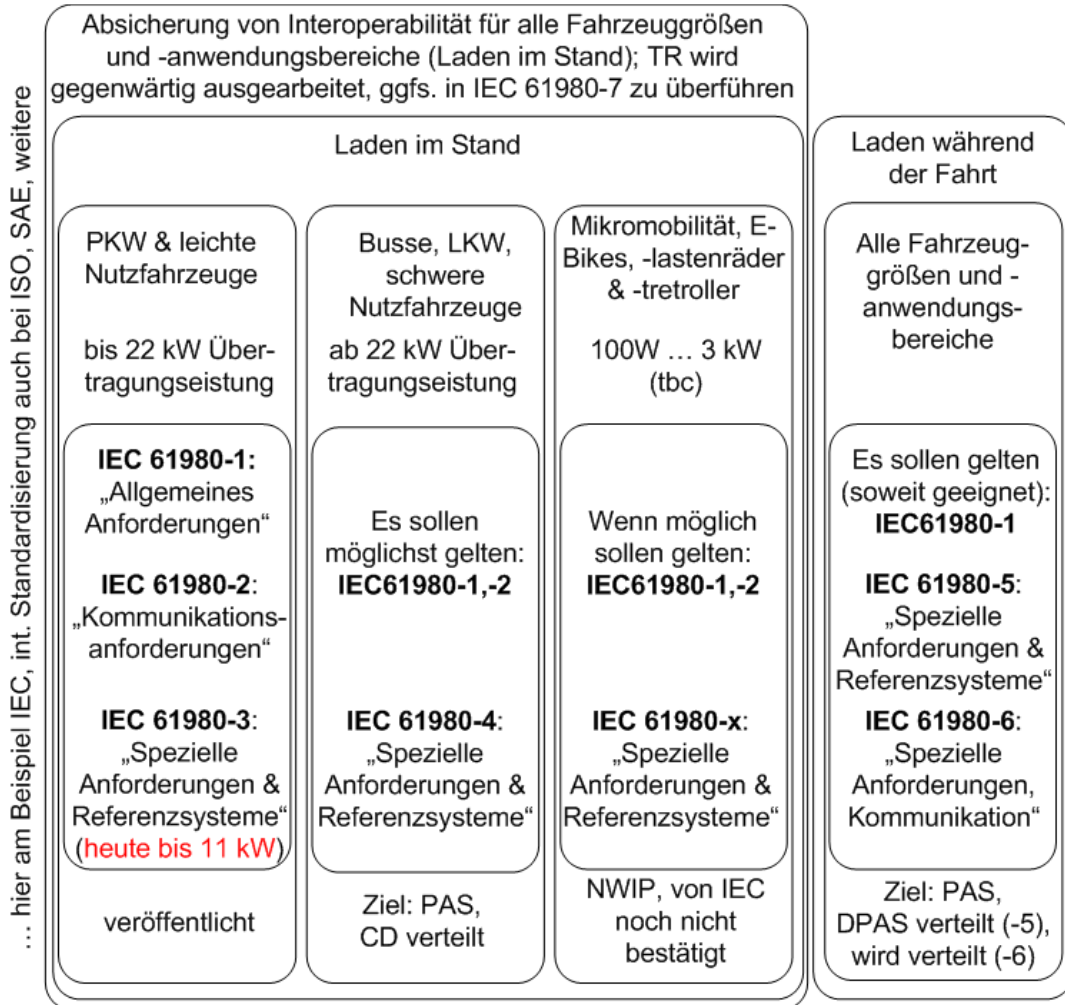


Abbildung 2-3: Standardisierung des induktiven Ladens bei IEC (Stand: September 2024)

Die Standards IEC 61960-1...-3 sind veröffentlicht worden. IEC hat mit diesen Normen allgemeine Anforderungen, Kommunikationsanforderungen, spezielle Anforderungen und Referenzsysteme an und für die infrastrukturseitigen Bestandteile stationärer induktiver Energieübertragungssysteme für das Fahrzeugladen im öffentlichen Raum standardisiert. An der Standardisierung von Systemen mit einer Übertragungsleistung > 22 kW (IEC 61980-4) und der Standardisierung des dynamischen induktiven Ladens (Laden während der Fahrt, IEC 61980-5, -6) wird bei IEC gegenwärtig noch gearbeitet. Standards mit Anforderungen an die Fahrzeuge sind bei ISO veröffentlicht worden oder sind in Erarbeitung (ISO 19363). Weitere Standardisierungsorganisationen (z. B. SAE, relevante Norm hierzu SAE J2954) haben internationale Normen für das induktive Fahrzeugladen im öffentlichen Raum veröffentlicht.

Die Verfügbarkeit dieser Normen war eine ganz wesentliche Voraussetzung für die Markteinführung von Technik für das induktive Fahrzeugladen im öffentlichen Raum. Die Interoperabilität zwischen Systembestandteilen unterschiedlicher Hersteller dieser Ladetechnik wird mit den Normen unterstützt. Die Möglichkeit des Bezuges auf einen nun beschriebenen Stand der Technik hilft Investoren und Betreibern induktiver Ladeinfrastruktur ihre Ausschreibungsunterlagen technisch zu konkretisieren bzw. zu vereinheitlichen und hilft

den Fahrzeugherstellern und ihren Zulieferern bei der Produktüberführung und Serieneinführung induktiver Fahrzeugladesysteme.

Um den grundlegenden Anforderungskatalog im Projekt LISA4CL zu konkretisieren und Werte für die Auslegung des Systems zu erhalten, wurden die Vorgaben aus den Normen DIN EN IEC 61980-1, DIN EN IEC 61980-2 und DIN EN IEC 61980-3 herangezogen. Durch die Bezugnahme auf das Normenwerk wurde bei der Systementwicklung zusätzlich dafür gesorgt, dass das zu entwickelnde Ladesystem im späteren Verlauf auch als Vorschlag für die zu Beginn des Projektes LISA4CL noch in der Entwicklung befindliche Leistungsklasse WPT4 (22 kW) genutzt werden kann.

Die Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation, sowie der Ablauf des Ladevorgangs wurden an die in der E DIN EN IEC 61980-2 [DIN22a] und in der DIN EN ISO 15118-20 [DIN22b] gemachten Vorgaben angelehnt, um auch beim Datenaustausch nah an den aktuellen Standard in den bereits fertig genormten Leistungsklassen heranzukommen.

Zusätzlich wurden die Inhalte der VDE-AR-N 4100 hinzugezogen, um die seitens des Energienetzbetreibers gestellten Netzanschlussrichtlinien für das induktive Ladesystem zu erfüllen.

Festlegungen und Begrifflichkeiten zur Systemarchitektur induktiver Ladesysteme in den Normen

Nach IEC 61980 sind die nachfolgend blau markierten Baugruppen in Abbildung 2-4 die Bestandteile der Primäreinheit:

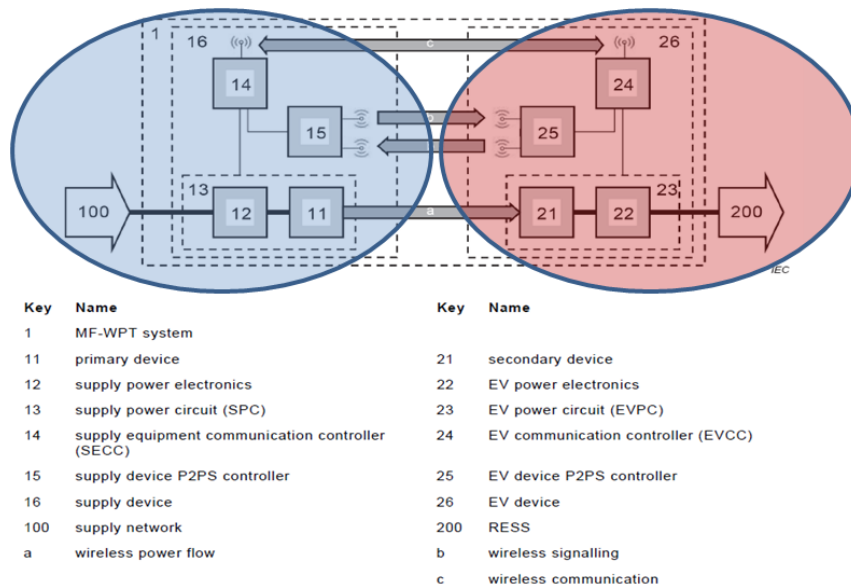


Abbildung 2-4: Systemarchitektur für stationäre induktive Energieübertragungssysteme nach IEC 61980-3: 2022 [DIN22c]

Im Einzelnen sind dies für die Primäreinheit:

(1) Die Bestandteile des primärseitigen Leistungspfads (13 - SPC) mit den Teilsystemen „Primärseitige Leistungselektronik“ (12 – supply power electronics) und Primärspule (11 – Primary device (PD)). Zur primärseitigen Leistungselektronik gehören in der Regel:

- Die Netzanbindung an das Versorgungsnetz (100)
- Komponenten zur Erfüllung von Netzanforderungen, beispielhaft Power Factor Correction (PFC) oder Active Front End (AFE)
- Komponenten zur Kleinstspannungsversorgung aller infrastrukturseitigen elektronischen Baugruppen
- Ein Frequenzumrichter
- Ein elektrisches Netzwerk zur Impedanz-Anpassung zwischen dem Wechselrichter und dem PD
- Ein Netzwerk zur Kompensation von Blindleistung des PD

(2) Die Bestandteile zur Ladeprozesssteuerung und Systemüberwachung und der Drahtloskommunikation mit dem Fahrzeug (14 – SECC)

(3) Die (in den Standards optional vorgehaltenen) Bestandteile für die Erzeugung von Signalen zwischen der straßenseitigen Infrastruktur und Fahrzeugen, die auf direktem Wege zwischen beiden Spulen übertragen werden.

Die in Abbildung 2-4 rot markierten Baugruppen sind die Bestandteile der Sekundäreinheit:

Im Einzelnen sind dies:

(1) Die Bestandteile des sekundärseitigen Leistungspfads (23 - EVPC) mit der Sekundärspule (21 – Secondary Device (SD)) und der fahrzeugseitigen Leistungselektronik (22 – EV power electronics). Zur sekundärseitigen Leistungselektronik gehören in der Regel:

- ein Gleichrichter
- Ggfs. ein elektrisches Netzwerk zur Impedanz-Anpassung zwischen der Sekundärspule und dem Kompensationsnetzwerk
- ein Netzwerk zur Kompensation von Blindleistung des SD
- die Anbindung an die Traktionsbatterie des Fahrzeugs (200)

(2) Die Bestandteile zur Ladeprozesssteuerung und Systemüberwachung und der Drahtloskommunikation mit der Primäreinheit (24 – EVCC)

(3) Die (in den Standards optional vorgehaltenen) Bestandteile für die Erzeugung von Signalen zwischen der straßenseitigen Infrastruktur und Fahrzeugen, die auf direktem Wege zwischen beiden Spulen übertragen werden. Auf eine derartige Signalübertragung konnte im Projekt LISA4CL verzichtet werden.

Mit Bezugnahme auf die Systemarchitektur aus den IEC-Normen wurde für LISA4CL die in Abbildung 2-2 dargestellte, noch sehr allgemein abgefasste Grundstruktur festgeschrieben.

Ableitung konkreter Werte für die Systemauslegung

Bezugnehmend auf die DIN EN IEC 61980-3 wurden die elektrischen Anforderungen abgeleitet, sodass sich folgende Werte (Tabelle 2-1) für das zu entwickelnde Ladesystem ergeben.

Tabelle 2-1: Wertevorgaben für die Systementwicklung

Eigenschaft	Wert nach DIN EN IEC 61980-3
Zulässiger Versatz der Spulen in X- und Y-Richtung	X-Richtung: +/- 75 mm Y-Richtung: +/- 100 mm
Mindestwirkungsgrad der Energieübertragung	Konzentrische Ausrichtung: 85 % Innerhalb des zulässigen Versatzes: 80 %
Ausgangsspannungsbereich	280 bis 420 V
Übertragungsfrequenz	85 kHz

Konzeptentwicklung zur Hardwareumsetzung

Ausgehend von dem vorgestellten allgemeingültigen Konzept wurde im nächsten Schritt das spezielle Konzept für das LISA4CL-Ladesystem entwickelt. Unter Berücksichtigung der Vorgaben des Anforderungskataloges wurde hierbei eine Topologie ausgesucht, die sich dadurch abhebt, dass sie die Primärspule direkt mit sinusförmiger Spannung und sinusförmigem Strom speist. Bei einfacheren Topologien ist es üblich, die rechteckförmige Ausgangsspannung des Wechselrichters direkt an den Übertragervierpol anzulegen. Im vorliegenden Fall konnte aufgrund baulicher Vorgaben die Leitungslänge zwischen Übertragerspule und Wechselrichter bzw. Kompensation nicht kurzgehalten werden, da die Primärspule als Aufbaulösung auf den bestehenden Straßenbelag ausgeführt werden musste. Aufgrund der sich daraus ergebenden Längen der Spulenzuleitungen von mehreren Metern wurde zur Bewirkung geringer Ableitströme und Störungen eine möglichst gute Filterung aller über die Grundschiwingung hinausgehenden Frequenzen vorgesehen.

Zwischen Wechselrichteranschluss und Übertrager wurde zu diesem Zweck ein weiterer Vierpol eingeplant, der ebenso wie der Übertrager, gyratorisches Verhalten aufweist. Am Ausgang dieses Vierpols stehen dabei bereits sinusförmige Größen zur Verfügung, die dann dem Übertrager zugeführt werden. Abbildung 2-5 zeigt die Anordnung in der Schaltungssimulation.

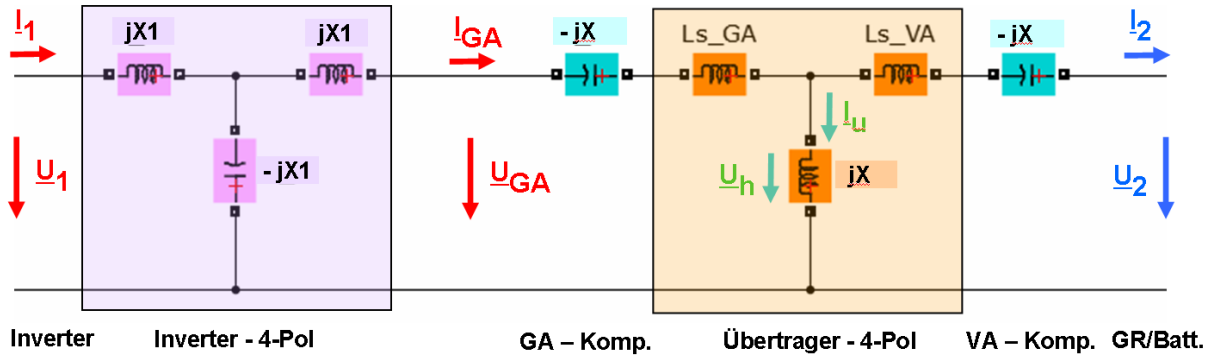


Abbildung 2-5: Einsatz eines vorgeschalteten Gyrtors zur sinusförmigen Speisung der Primärspule

Für eine zusätzliche Reduzierung der Ableitspannung und zur Auflösung des Potentialbezugs der Wechselrichterausgangsspannung wird zusätzlich ein für den Betrieb mit 85-kHz-Wechselstrom optimierter Transformator vorgesehen, der eine galvanische Trennung hin zur Primärspule ermöglicht. Abbildung 2-6 zeigt die resultierende Gesamtstruktur. In der Darstellung wurden bereits Optimierungen in der Bauteilanzahl berücksichtigt. Beispielsweise wird die primärspulenseitige Induktivität des zusätzlichen Gyrtors aus der Streuinduktivität der Primärspule gewonnen, indem die Kompensation angepasst wird und die benötigte Induktivität im Kreis verbleibt.

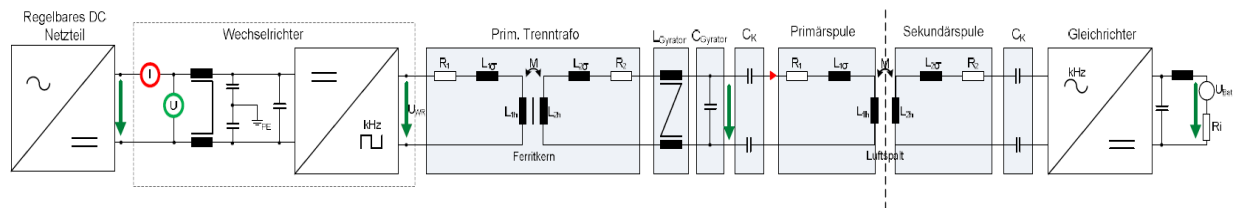


Abbildung 2-6: Gesamtkonzept der Energieübertragung

Schaltungssimulation

Das aufgestellte Gesamtkonzept wurde mithilfe von Schaltungssimulationen untersucht. Zu diesem Zweck wurden Modelle aufgestellt, die im Laufe der Entwicklung fortlaufend angepasst und erweitert wurden. Abbildung 2-7 zeigt das Simulationsmodell des Leistungspfad.

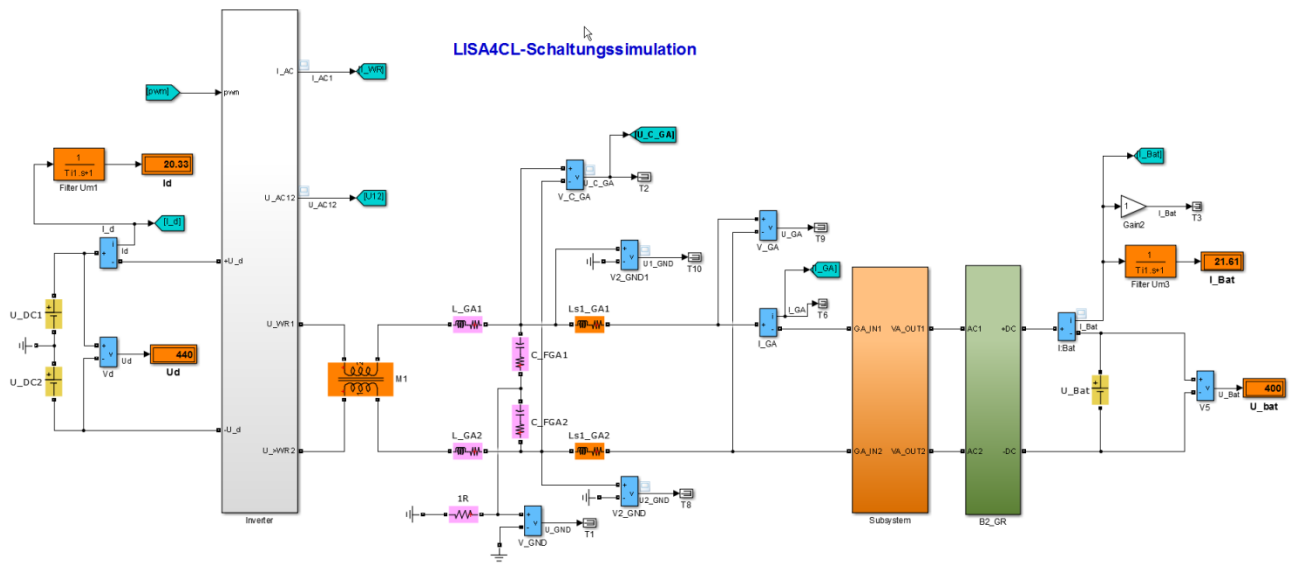


Abbildung 2-7 Simulationsmodell des Leistungspfad

Anhand der durchgeführten Simulationen konnte die Funktion des gewählten Systems verifiziert werden und die Ergebnisse sind in die Entwicklung der zugehörigen Komponenten eingeflossen. Ebenso wurden unterschiedliche Modulationsverfahren für den Primärwechselrichter und die resultierenden Auswirkungen auf die Schaltung untersucht.

Da die Batteriespannung des Fahrzeugs und damit auch die sekundärseitig benötigte Induktionsspannung abhängig vom Ladezustand schwankt und zusätzlich durch den möglichen Versatz zwischen Sekundär- und Primärspule in x- und y-Richtung, sowie durch beladungsabhängige Variation des Luftspaltes die Gegeninduktivität der beiden Spulen variiert, muss der Primärwechselrichter einen ausreichend großen Stellbereich aufweisen, um jede innerhalb der Vorgaben liegende Kombination aus Batteriespannung und Fahrzeugposition speisen zu können.

Die hierzu durchgeführten Simulationen ergaben, dass die Ladeleistung grundsätzlich über die Wechselrichteraussteuerung, als auch über die Zwischenkreisspannungsanpassung geregelt werden kann. Für die Anpassung der Zwischenkreisspannung muss allerdings die speisende Quelle einen breiten Ausgangsspannungsbereich einstellen können. Das vorgesehene Active Front End (siehe dazu Unterabschnitt **Netzanbindung**) ist prinzipbedingt nicht in der Lage, eine kleinere Ausgangsspannung als den aus der Gleichrichtung der Netzspannung resultierenden Wert einzustellen. Aus diesem Grund wurde der Einsatz eines zusätzlichen Tiefsetzstellers betrachtet, der die Ausgangsspannung des AFE soweit absenkt, dass der Wechselrichter weitgehend in Vollaussteuerung betrieben werden kann. Durch diese Maßnahme ließen sich die Verluste im Wechselrichter reduzieren und die Qualität der Wechselspannung verbessern. In theoretischen und praktischen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass sich durch den zusätzlichen, ebenfalls verlustbehafteten Tiefsetzsteller bezüglich des Gesamtwirkungsgrades keine Verbesserung einstellt, die den Mehraufwand eines zusätzlichen Wandlers rechtfertigt. Das System wurde daher auf die ausschließliche Regelung über die Wechselrichteraussteuerung ausgelegt. Gleichzeitig wurde der aus der Norm entnommene Spannungsbereich für die notwendige Ausgangsspannung des

Induktivladesystems reduziert, da Ladeversuche ergaben, dass das Fahrzeug ein kleineres genutztes Spannungsfenster (maximal 361 V) aufweist.

Regelstrategie des Ladesystems

Für die Konzeptionierung und Auslegung der Regelung wurden verschiedene Konzepte auf ihre Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall untersucht und anhand gestellter Anforderungen ausgewählt und ausgelegt.

Wie zuvor schon dargestellt, teilt sich das induktive Ladesystem in die ortsfeste Primärseite und die im Fahrzeug verbaute Sekundärseite. Die Schnittstelle zwischen beiden Baugruppen wird während des Ladebetriebs durch das magnetische Wechselfeld gebildet, das beide Spulen (Primär- und Sekundärspule) durchsetzt und direkten Einfluss auf die sekundärseitig induzierte Spannung bzw. den sekundärseitig fließenden Strom hat. Für die Regelung des sekundärseitigen Ladestroms und der damit über die Spannung der HV-Batterie resultierenden Ladeleistung kommen drei mögliche Varianten in Frage. Bei der sog. *primärseitigen Regelung* wird die Ladeleistung vollständig über Stellgrößen auf der Seite der Ladestation geregelt. Der primärseitig fließende Strom wird dabei so eingestellt, dass sich entsprechend der Übersetzungsverhältnisse zwischen Primär- und Sekundärseite die gewünschte Ladeleistung an der Traktionsbatterie des Fahrzeugs ergibt. Bei der *sekundärseitigen Regelung* wird der Ladestrom über entsprechende Stellglieder auf der Fahrzeugseite angepasst. Die Primärseite würde in dieser Konstellation beispielsweise mit konstanter Wechselrichteraussteuerung betrieben und die sekundärseitig induzierte Spannung würde abhängig von Luftspalt und Fahrzeugposition variieren. Die *beidseitige Regelung* bildet die dritte Variante, bei der Primär- und Sekundärseite über Stellglieder verfügen und der gewünschte Arbeitspunkt durch den Verbund beider Seiten eingestellt wird.

Für den vorliegenden Anwendungsfall wird die primärseitige Regelung mit der Ladeleistung als Regelgröße gewählt. Wie schon erwähnt bietet dieser Ansatz den Vorteil, dass auf der Fahrzeugseite lediglich eine Leistungselektronik zur passiven Gleichrichtung und Glättung des Ladestroms benötigt wird, aber keine aktive Wandler-schaltung, wodurch sich die Komplexität auf der Sekundärseite verringert. Wesentlich bei diesem Regelungsansatz ist jedoch, dass die primärseitige Regelung im Hinblick auf das Sicherheitskonzept ohne einen zuverlässigen Datenaustausch über möglicherweise störepfindliche Funkverbindungen mit dem Fahrzeug funktioniert und dass im Fehlerfall direkt eine Abschaltung des magnetischen Feldes erfolgen kann. Kern des Regelungskonzepts ist der im Primärwechselrichter implementierte Leistungsregler, der die vom Fahrzeug angeforderte Leistung mittels der Wechselrichteraussteuerung einstellt. Abbildung 2-8 zeigt den resultierenden Regelkreis.

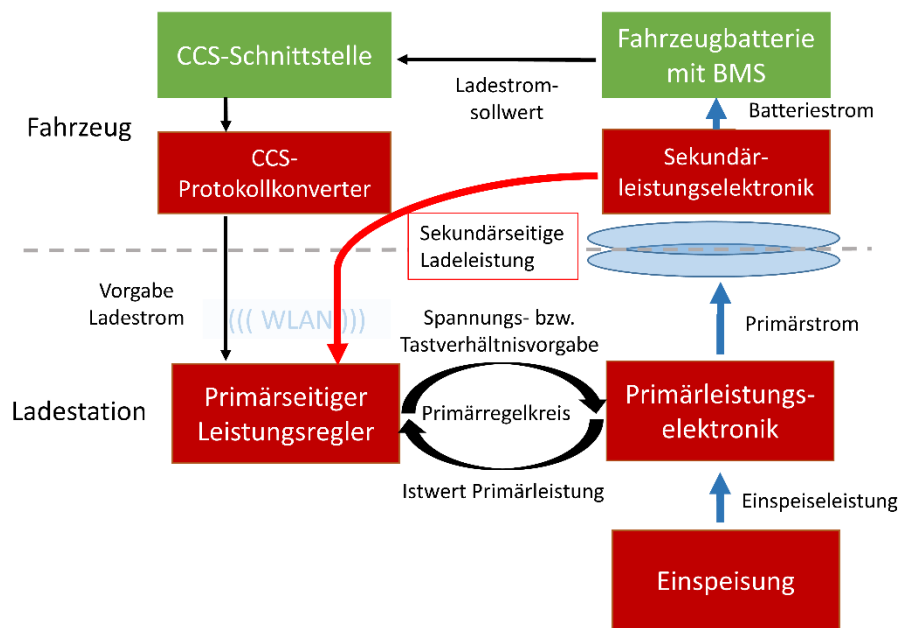


Abbildung 2-8: Regelkreis des Ladesystems

Die Vorgabe des Ladestromsollwerts wird vom Fahrzeug über die werkseitige CCS-Schnittstelle bezogen und per WLAN zur Primärseite übertragen. Die aus der Vorgabe errechnete Ladeleistung wird dann vom primärseitigen Regler eingestellt und konstant gehalten.

Als Sicherheitsfunktion wird der Regler mit einer Sprungerkennung ausgerüstet, die auf nicht angeforderte Änderungen der übertragenden Leistung reagiert. Durch das Detektieren plötzlicher Leistungssprünge kann die Energieübertragung sowohl bei fahrzeugseitigem Lastabwurf (z. B. verursacht durch eine vom Fahrzeug-Batteriemanagement ausgelöste Trennung von der HV-Batterie), als auch bei fehlerfallbedingtem Überstrom auf der Sekundärseite direkt abgeschaltet werden. Das Übertragen von Steuerkommandos zwischen Fahrzeug und Bodenstation ist für diesen Vorgang nicht nötig. Fällt die WLAN-Verbindung zur Sekundärseite aus, wird die Ladung ebenfalls unterbrochen.

Die ausschließliche Leistungsregelung auf der Primärseite hat durch die Tatsache, dass die Messgrößen am Anfang der induktiven Übertragungsstrecke erfasst werden, den Nachteil, dass die während der Übertragung auftretenden Verluste nicht berücksichtigt werden und somit die real in die Fahrzeugbatterie gespeiste Ladeleistung geringer als die vom Batteriemangement (BMS) des Fahrzeugs angeforderte Leistung ist. Zum Ausgleich dieses Deltas führt das System zusätzlich eine Leistungsmessung auf der Fahrzeugseite durch und überträgt die gemessene Momentanleistung ebenfalls per WLAN zur Primärseite. Der primärseitige Leistungsregler verwendet diese Information anschließend für eine entsprechende Anpassung der eingespeisten Leistung und regelt den Unterschied aus.

Als wesentliche Störgröße für die Regelung wurde die Variation der magnetischen Kopplung zwischen Primär- und Sekundärspule identifiziert, die sich dynamisch aus

Abstandsänderungen der Spulen während des Ladevorgangs ergibt. Da die Zeit während des Ladevorgangs auch gleichzeitig zum Beladen des Fahrzeugs mit Paketen genutzt werden soll, ist während des Ladevorgangs folglich mit Bewegungen des Fahrzeugaufbaus zu rechnen und die Luftspaltgröße kann sich durch Beladung verändern. Der Regler muss daher eine ausreichend hohe Dynamik besitzen, damit ein schnelles Einfedern des Fahrzeugs nicht zu einem sprunghaftigen Anstieg des Ladestroms führt. Um eine Einschätzung zu erhalten, welche Bewegungen des Aufbaus zu erwarten sind, wurden praktische Tests zum Einfedern des Fahrzeugs bei Beladung und zu auftretenden Auslenkungen des Aufbaus bei externer Anregung (beispielsweise durch schwunghaftes Betreten des Laderaums) durchgeführt. Im Ergebnis variiert der Luftspalt zwischen leerem Fahrzeug und maximal zulässiger Beladung im Mittelwert nur um 2 cm und die auftretenden Schwingungen weisen eine geringe Amplitude in der Größenordnung bis hinauf zu 10 Hz auf.

Während der Inbetriebnahme wurde das Verhalten der Regelung während des Ladevorgangs bei Anregung des Fahrzeugaufbaus überprüft und als problemlos eingestuft.

Netzanbindung

Die Netzanbindung des Systems erfolgt aufgrund der Vorgaben des Energienetzbetreibers über ein Active Front End (AFE). Das AFE ermöglicht 4-Quadrantenbetrieb und somit sowohl untererregte als auch übererregte Blindleistungsbereitstellung. Dies ist relevant für die netzorientierten Ladekonzepte im Modul 2. In Bezug auf Wirkleistung wird das System unidirektional betrieben, d. h. das Fahrzeug wird ausschließlich induktiv geladen. Eine Rückspeisung in das Netz ist mit dem Gesamtsystem nicht möglich. Als AFE wird ein Siemens SINAMICS S120 mit einer Nennleistung von 36 kW genutzt. Dieses Gerät setzt sich in der Anwendung aus einem Basic Line Filter, einem Active Interface Module, einem Active Line Module, einer Control Unit und einem Voltage Sensing Module zusammen. Der Basic Line Filter dient dazu, leitungsgebundene Störaussendungen des AFE zu reduzieren [SIE20a]. Das Active Interface Module realisiert die Netzanbindung des Active Line-Module [SIE20a]. Es besteht aus einer Netzdrossel, einem Niederfrequenz-Filter und einem Netzfilter [SIE20a]. Das Active Line Module ist die leistungselektronische Komponente, welche die Zwischenkreisspannung am Ausgang bereitstellt [SIE20a]. Die Control Unit übernimmt die Regelung des AFE [SIE20a]. Über sie ist auch die Steuerung des AFE möglich. Sie stellt geeignete Kommunikationsschnittstellen wie z. B. Modbus TCP bereit, über welche die Steuerbefehle gesendet werden können. Das Voltage Sensing misst die Netzspannung, die für etwaige Regelungen zur Verfügung steht [SIE20b].

Auswahl der Spulentopologie

Für die Auswahl und die Auslegung geeigneter Primär- und Sekundärspulen wurde ein mehrstufiger Prozess durchlaufen. Zunächst wurden die grundsätzlichen Spulentopologien festgelegt, die in den Topologievergleich einzubeziehen waren. Hierbei wurden zunächst Spulendimensionen gewählt, die prinzipiell in den vorgesehenen Einbauraum des Zielfahrzeugs passen würden, um eine Basis für den Vergleich zu erhalten.

Die Spulentopologien wurden mithilfe numerischer Berechnungen untersucht und anhand von festgelegten Bewertungsmaßstäben bezüglich der elektrischen und elektromagnetischen Eigenschaften beurteilt.

Die analysierten Spulentopologien sind in Abbildung 2-9 dargestellt und wie folgt bezeichnet:

- a) Rechteckanordnung (inkl. quadratischer Anordnung)
- b) Transversalanordnung
- c) Solenoidanordnung
- d) Zirkularanordnungen

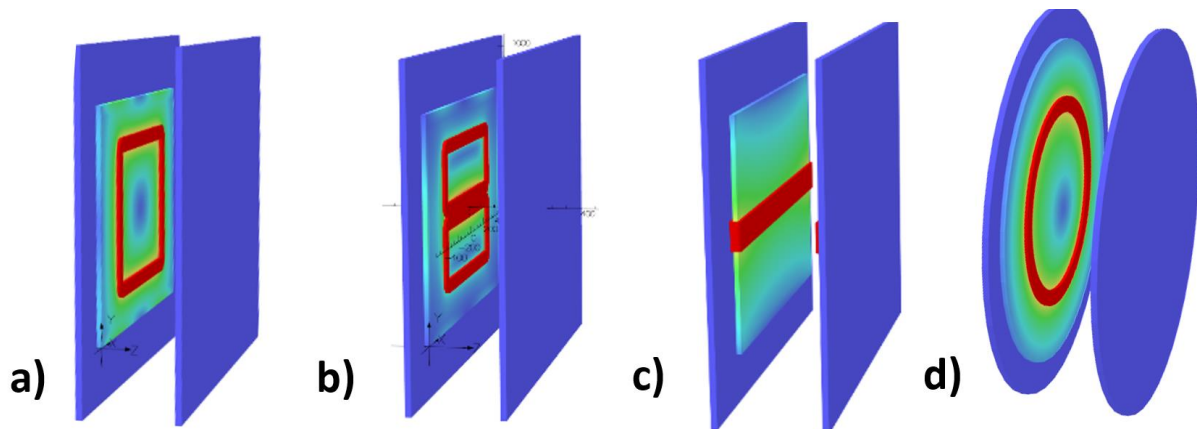


Abbildung 2-9: Untersuchte Spulentopologien

Bewertungskriterien

Die zentrale Aufgabe des Spulensystems ist es, die geforderte Leistung bei möglichst geringen Verlusten zu übertragen. Dazu wurde eine Kennzahl definiert, die diesen Aspekt beschreibt. Die übertragene Leistung P_t (siehe Formel (2.1)) ist eine Funktion der Gegeninduktivität M , der Kreisfrequenz ω und den Strömen I_1, I_2 in Primär- und Sekundärspule.

$$P_t = \omega M I_1 I_2 \quad (2.1)$$

Damit wäre grundsätzlich eine Topologie mit hoher Gegeninduktivität zu bevorzugen. Wird allerdings außerdem der Wirkungsgrad einbezogen, muss berücksichtigt werden, dass jedes Design zu unterschiedlichen Kupferverlusten führt. Im Projekt wurde daher eine charakteristische Kennzahl bestimmt, welche die übertragene Leistung P_t auf die Kupferverluste P_l bezieht:

$$\frac{P_t}{P_l} = \frac{\omega M I_1 I_2}{\rho (I_1^2 + I_2^2) \cdot \frac{l}{A}} \stackrel{I_1=I_2}{\hat{=}} \frac{\omega}{2\rho} \cdot \frac{M}{\frac{l}{A}} \quad (2.2)$$

Dabei beschreibt ρ den spezifischen Widerstand, l die Spulenlänge, sowie A den Spulenquerschnitt. Da der Term $\omega/(2\rho)$ unabhängig von der gewählten Topologie ist, gibt

$M/(l/A)$ eine spezifische Kenngröße für jede Auslegung aus. Dieser Parameter definiert somit die Topologie, die bei gegebenen Kupferverlusten die höchste Leistung übertragen kann.

Für die Bewertung der unterschiedlichen Topologien wurden neben dieser Kennzahl weitere Kriterien definiert:

- Der Anteil der zu kompensierenden Streuung
- Die Feldemissionen, Betrag der Flussdichte in 1 m Abstand zur Spulenmitte
- Die Sensitivität gegenüber Luftspaltänderungen und Versatz
- Interoperabilität
- Verluste

Auswahlprozess

Nach einer grundsätzlichen Betrachtung und dem Vergleich der Spuleneigenschaften anhand von Finite-Elemente-Methode-Simulationen wurde die Solenoidspule aus den weiteren Betrachtungen ausgeschlossen. Maßgeblich war dabei, dass die Flussdichte im Umfeld der Spule vergleichsweise hoch ist, die erzielte Gegeninduktivität vergleichsweise klein und die Solenoidspule aufgrund ihrer Bauform und der topologiebedingt notwendigen Schirmung am Fahrzeugunterboden eine gegenüber den anderen Spulenkonzepthen große Bauhöhe aufweist.

Der Vergleich wurde daher mit den drei verbliebenen Bauformen fortgesetzt, wobei von der Rechteckspule der Sonderfall der quadratischen Form der Wicklung für die weitere Betrachtung abgespalten wurde.

Im nächsten Schritt wurden die verbliebenen Topologien in unterschiedlichen Abmessungen simuliert und auf die zu bewertenden Eigenschaften untersucht.

Abbildung 2-10 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Simulationen. Zur Vereinfachung sind die gezeigten Werte für die einzelnen Topologien jeweils auf den maximalen Wert im Vergleich normiert. Dargestellt werden die Wicklungsverluste bei definiertem Strom, die aus der Streuinduktivität resultierende Spannung, sowie die Güte bezogen auf die normierte Gegeninduktivität und die Güte bezogen auf die normierte Streuinduktivität, jeweils unter Annahme gleicher Wicklungslänge (und einhergehend gleicher Wicklungsverluste).

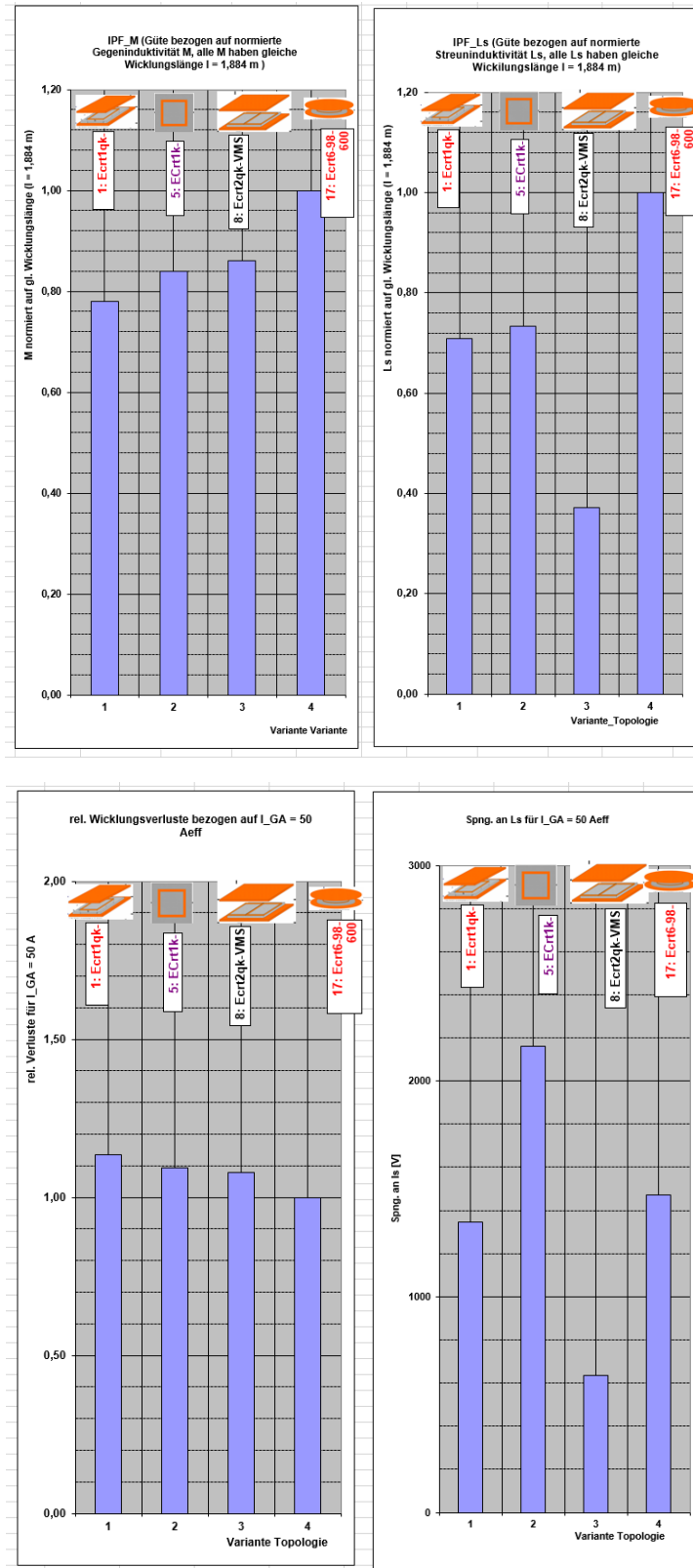


Abbildung 2-10: Ergebnisse des Topologievergleichs

Im Vergleich und unter Einbeziehung der übrigen Bewertungskriterien, bietet die Zirkularspule in der Summe die besten Eigenschaften. Die Auslegung des Spulensystems wurde daher mit der Zirkularspule fortgesetzt.

Feinauslegung der Zirkularspule

Für den Topologievergleich wurden alle betrachteten Spulentopologien mit möglichst ähnlichen Parametern gestaltet, um eine gute Vergleichbarkeit zu erzielen. Im nächsten Schritt wurde die gewählte Zirkulartopologie im Detail ausgelegt.

Dabei wurden u. a. Berechnungen zur notwendigen Windungszahl, zur Stromtragfähigkeit der Wicklung und Verlusten in Ferrit und Leitern durchgeführt. Zusätzlich wurde die versatzabhängige Änderung der Kopplung untersucht, die direkt die sekundärseitig induzierte Spannung beeinflusst und damit bestimmt, wie groß der Stellbereich des primärseitigen Wechselrichters ausgelegt werden muss, damit in jedem Betriebspunkt die notwendige Spannung auf der Sekundärseite zur Verfügung steht und die spezifizierte Leistung in die Batterie übertragen werden kann.

In weiteren Auslegungsschritten wurde der Materialeinsatz der Spulen überprüft und wo möglich reduziert. Hierzu wurde die Ferritstruktur unterhalb der Wicklung im Interesse der Reduzierung des Gewichts und des notwendigen Ferritmaterials von einer massiven Platte zu schmalen Streifen korrigiert. Im ersten Schritt zeigt die Analyse der auf Streifen reduzierten Struktur lokale Sättigungen im Ferrit. Als Optimierungsmaßnahme wird die Ferritdicke an den sensiblen Orten angepasst und an die Gestaltung der Ferritstreifen variiert.

Abbildung 2-11 zeigt exemplarisch die Flussdichtebelastung des Ferrits für eine betrachtete Variante. Im Bereich der Wicklung zeigt sich eine erhöhte Flussdichte im Material, sodass in diesen Bereichen der Ferritquerschnitt erhöht wird. An den Rändern und in der Mitte der Spule sind die Flussdichten deutlich geringer, sodass an diesen Stellen mit weniger Ferrit gearbeitet werden kann, wodurch sich das Gewicht der Spule reduzieren lässt.

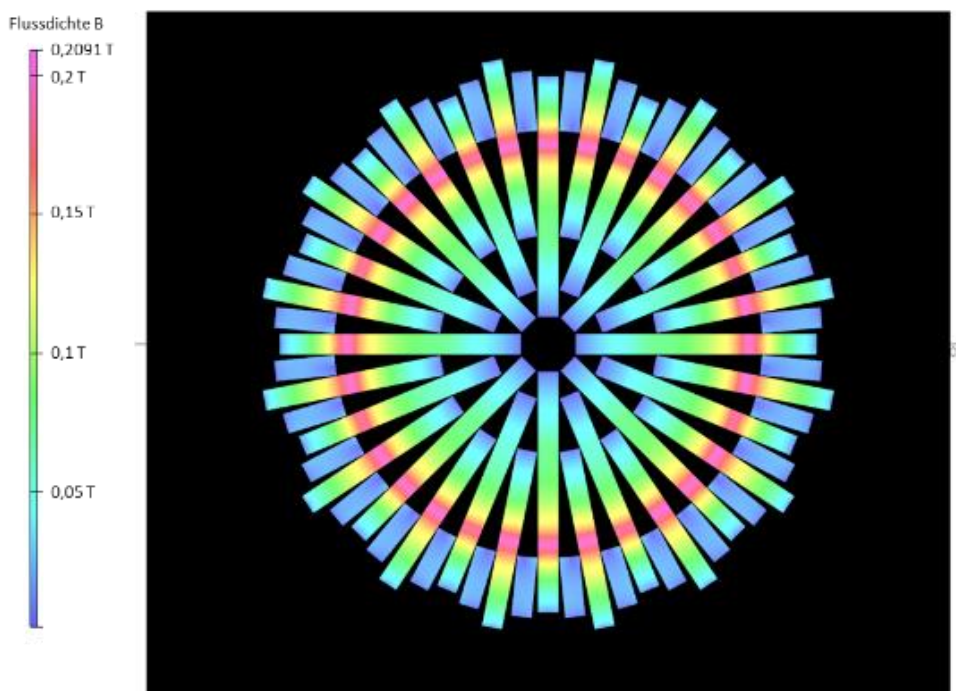


Abbildung 2-11: Flussdichtebelastung des Ferrits in der Feinauslegung

Schirmung

Bedingt durch den großen Luftspalt im System zwischen Primär- und Sekundärseite resultieren Streufelder, die eine Abschirmung erfordern. Zu diesem Zweck wird eine Aluminiumplatte unter dem Ferrit angeordnet (Abbildung 2-12).

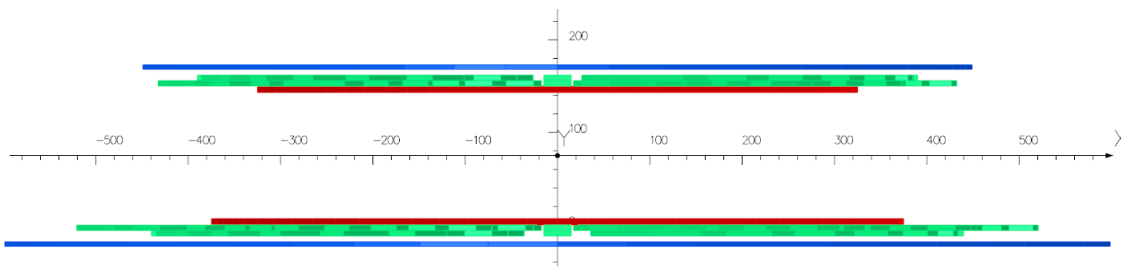


Abbildung 2-12: Seitenansicht Primär- und Sekundärspule mit Abstand zwischen Ferrit und Aluminium

Es zeigte sich in ersten Leistungsversuchen, dass diese Schirmung bei direktem Kontakt zwischen Ferrit und Aluminium zu hohen Verlusten und damit entsprechender Erwärmung führen. Daher wurde ein definierter Abstand zwischen dem Ferrit und der Schirmplatte eingeführt, der bei optimaler Distanz eine deutliche Reduktion der Verluste bewirkt und gleichzeitig die Einhaltung der Emissionsgrenzen sicherstellt.

Festlegung

Nach Durchlaufen des Auslegungsprozesses wurde die Zirkularspule mit einem Ferritdurchmesser von ca. 1 m für die Primärspule und ca. 80 cm für die Sekundärspule festgelegt. Die weitere Gestaltung der Spulen und die konstruktive Umsetzung wird in den nachfolgenden Abschnitten für die Primär- und die Sekundärseite des Ladesystems gesondert dargestellt.

2.1.2 Entwicklung und Aufbau Primäreinheit (AP 1.2)

Unter der Primäreinheit werden alle Baugruppen und Komponenten des Ladesystems zusammengefasst, die Teil der straßenseitigen Infrastruktur sind und somit helfen, das Magnetfeld für die Sekundäreinheit (siehe auch AP 1.3) zu erzeugen, mit dem die Ladeenergie an das Fahrzeug übertragen wird.

Für die Primäreinheit lassen sich folgende Ergebnisse vorab zusammenfassen:

- Ausgehend von dem in AP 1.1 erarbeiteten Konzept wurden die notwendigen Komponenten der Primärseite festgelegt. Besonderer Fokus lag dabei auf der Beschaltung der Primärspule mit einem vorgelagerten Gyrator und einem Gleichtaktfilter, mit deren Hilfe einerseits eine Anpassung zwischen Wechselrichter und Spule erfolgt und zusätzlich die an der Spule wirksamen Oberschwingungsanteile reduziert werden, die ansonsten u. a. zu unerwünschten Ableitströmen führen können.

- Eine Untersuchung und Auswahl möglicher Topologien der primärseitigen Leistungskomponenten ist erfolgt. Dabei wurde insbesondere das zuvor beschriebene Anpassungsnetzwerk vor der Primärspule betrachtet. Die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung werden im weiteren Projektfortschritt genauer betrachtet und durch den Aufbau von Labormustern verifiziert.
- Es wurde vereinbart für die Netzschnittstelle ein Active Front End zu verwenden, welches die Möglichkeit der Blindleistungsbereitstellung und der Variation der Zwischenkreisspannung bietet. Aus der Sicht des Induktivladesystems wurden dabei die Anforderungen an das AFE (Ausgangsspannungsstellbereich, Ausgangsleistung etc.) festgelegt. Eines der wichtigsten Auswahlkriterien ist dabei die Fähigkeit des AFE, eine einstellbare Ausgangsspannung liefern zu können, um dadurch die Zwischenkreisspannung des Wechselrichters in gewissen Grenzen einstellen zu können. Durch die Variabilität dieser Spannung soll - einhergehend mit der Wechselrichteraussteuerung - ein möglichst hoher Wirkungsgrad des Systems für alle Arbeitspunkte des Übertragungssystems erzielt werden.
- Die Spulentopologie für die Primärseite wurde unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen ausgedacht und festgelegt.
- Basierend auf den Messergebnissen aus den Versuchen mit den ersten Primär- und Sekundärspulenmustern wurden weitere Optimierungen des Spulensystems durchgeführt. In nachfolgenden Untersuchungen zu den optimierten Spulen haben sich Übertragungseigenschaften gezeigt, mit denen die gestellten Anforderungen an das Übertragungssystem erfüllt werden können. Nach der Festlegung der Spulentopologie konnten damit auch die Geometrie und die Bauform festgelegt werden.

Nachfolgend werden die im Rahmen des Projekts realisierten Baugruppen der Primäreinheit näher beschrieben.

Netzanbindung, AFE

Die Netzanbindung an das Versorgungsnetz erfolgt nach einschlägigen Regeln (z. B. VDE - Technische Anschlussregeln für Niederspannung). Als Komponente zur Erfüllung von Netzanforderungen kommt üblicherweise eine Einrichtung zur Leistungsfaktorkorrektur (PFC) zum Einsatz, mit der die Phasenlage zwischen Netzphasenspannungen und –strömen möglichst blindleistungsfrei eingestellt wird. Die Anforderungen an die PFC sind national unterschiedlich. Die PFC ist keine für induktive Ladesysteme spezifische Baugruppe. Sie ist in der Regel ein marktverfügbares Zukaufteil.

Im Zuge der Bearbeitung von AP 1.1 wurde festgelegt, die üblichen Funktionen einer PFC dahingehend zu erweitern, dass vom induktiven Ladesystem (1) kapazitive oder induktive Blindleistung am Netzanschlusspunkt erzeugt werden kann und (2) dem Wechselrichter eine variable Zwischenkreisspannung bereitgestellt werden kann. Derartige Funktionen werden bekanntermaßen von geregelten Netzgleichrichtern (AFE – Active Front End) zur Verfügung gestellt, die wiederum nicht spezifische Komponenten eines induktiven Ladegeräts sind und

in der Regel ein marktverfügbares Zukaufteil sind. Die Projektanforderung zur Blindleistungsbereitstellung wurde aufgestellt, um im Rahmen von AP 3 experimentelle Untersuchungen zur Netzdienlichkeit durch Blindleistungsbereitstellung zu ermöglichen. Mit der Umsetzung der Anforderung zur Bereitstellung einer variablen Zwischenkreisspannung für den Wechselrichter wurde es ermöglicht, im Rahmen von AP 3 experimentelle Untersuchungen zum Einfluss der Höhe der Zwischenkreisspannung des Wechselrichters auf sein Schaltverhalten und seine elektrischen Verluste durchzuführen. Abbildung 2-13 zeigt die AFE im Schaltschrank des induktiven Ladesystems.



Abbildung 2-13: AFE im Schaltschrank, Zukaufteil, Siemens

Netzteil zur Kleinstspannungsversorgung

Hier kam ein handelsübliches Netzteil mit einer geregelten Ausgangsspannung von 24 V und einem max. Ausgangsstrom von 10 A zum Einsatz. Das Netzteil versorgt alle infrastrukturseitigen Bestandteile, die mit Kleinstspannung zu versorgen waren.

Wechselrichter

Der Wechselrichter hat die Aufgabe, eine Wechselspannung zu erzeugen und letztlich den Primärspulenstrom zur Erzeugung des magnetischen Wechselfeldes auf der Infrastrukturseite zu treiben. Dies erfolgt jedoch nicht direkt, sondern über das Netzwerk zur Impedanzanpassung und zur Kompensation des Spulenblindwiderstands. Damit ist der Arbeitsbereich des Wechselrichters bzgl. der zur Verfügung zu stellender Ausgangsspannung und seines Ausgangsstroms relativ frei wählbar. Die Auslegung des Wechselrichters

orientierte sich maßgeblich an der von der AFE bereitgestellten variablen Zwischenkreisspannung. Der Wechselrichter wird mit einer Frequenz von 85 kHz betrieben, was im für induktive Ladesysteme standardisierten/ zulässigen Betriebsfrequenzbereichs von 79 bis 90 kHz liegt. Im Zuge der Bearbeitung von AP 1.1 wurde festgelegt, die Regelung der Übertragungsleistung des induktiven Ladegeräts auf der Infrastrukturseite umzusetzen. Dementsprechend war eine phasenmodulierte Ansteuerung der Siliciumcarbid (SiC)-Leistungshalbleiter der beiden Wechselrichterhalbbrücken zu realisieren. Die Ansteuer Elektronik für die Leistungshalbleiter wurde dementsprechend umgesetzt. Im Wechselrichter wurde eine Vielzahl von Messsensoren verbaut. Sie dienen der Erfassung von Spannungen, Strömen und Temperaturen. In Verbindung mit geeigneter wechselrichterintegrierter Auswerteelektronik wurden hard- und softwarebasierte Sicherheitsfunktionen implementiert, die im Fehlerfall oder im Falle der Überschreitung vorab festgelegter Grenzwerte zu einem sicheren Abschalten des Wechselrichters führen. Die Daten für den Wirkleistungsregler des Wechselrichters werden über eine CAN-Bus-Schnittstelle bereitgestellt. Über diesen CAN-Bus werden weitere Daten für den Wechselrichterbetrieb und die Analyse des Wechselrichterzustands übertragen.

Elektrisches Netzwerk zur Impedanz-Anpassung zwischen dem Wechselrichter und dem PD

Das elektrische Netzwerk mit passiven Bauteilen zur Impedanzanpassung zwischen dem Wechselrichter und der blindspannungskompensierten Primärspule besteht aus einem Trenntransformator (siehe Abbildung 2-14) und einem Gyratorvierpol. Abbildung 2-15 zeigt die Drossel des Gyrtors. Der Trenntransformator dient der galvanischen Trennung von Wechselrichter und der ihm nachgeschalteten Komponenten. Zudem war eine Impedanzanpassung zwischen dem elektrischen Spannungs- und Strombereich des Wechselrichters und dem Spannungs- und Strombereich des nachgeschalteten Gyrtors zu realisieren. Zudem war der Transformator für die Betriebsfrequenz von 85 kHz und für eine Übertragungsleistung von ca. 25 kVA auszulegen. Weiterhin waren seine Primär- und Sekundärwicklung kopplungskapazitätsarm auszulegen, um eine Überkopplung höherfrequenter Anteile der Rechteckspannungsform am Wechselrichterausgang minimal zu halten.



Abbildung 2-14: Trenntransformator

Der Einsatz eines Gytrators ist eines der Auslegungsergebnisse aus AP 1.1. Mit dem Gytrator soll eine Spannungs-Spannungs- bzw. Strom-Strom-Proportionalität zwischen dem Wechselrichterausgang und der Primärspule realisiert werden, um das Verhalten des primärseitigen Leistungsreglers bei einem solchen Verhalten im primärseitigen Leistungspfad untersuchen zu können (siehe auch AP 3). Zudem liefert der Gytrator Beiträge zur Impedanzanpassung zwischen Wechselrichter und Primärspule. Der Gytrator wurde als passiver Vierpol in T-Grundschialtung realisiert (L-C-L). Für die ausgangsseitige Gytrator-Induktivität wurden Teile der Induktivität der Primärspule hinzugezogen. Die Abstimmung der Resonanzkreise des Gytrators erfolgte auf die Betriebsfrequenz von 85 kHz. Die Bauteile wurden entsprechend ihrer Spannungs- und Stromfestigkeitsanforderungen ausgelegt und aufgebaut.



Abbildung 2-15: Drossel des Gytrators

Primärspulenkompensation

Die Kompensation des noch „verbliebenen“ Blindwiderstands der Primärspule (abzüglich dessen, was dem Gyrator zugeordnet wurde) erfolgte mit Kondensatoren, die seriell mit beiden Zuleitungen der Primärspule verschaltet wurden. In AP 1 wurde festgelegt, hierfür eine Kondensatorbank mit einer Vielzahl geeigneter SMD-Keramikkondensatoren auf Leiterkarten einzusetzen, um in AP 3 das thermische Verhalten/ die thermische Stabilität und ggfs. auftretende Verlustbeiträge der Kondensatorbank untersuchen zu können. Abbildung 2-16 zeigt die Kompensationsbank.



Abbildung 2-16: primärseitige Kompensationsbank, TUB-IMAB für Projekt LISA4CL

Zusammenfassung zur Impedanzanpassung und Primärspulenkompensation

Abbildung 2-17 zeigt eine Zusammenfassung zum Netzwerk für die galvanische Trennung, die Impedanzanpassung und Kompensation zwischen dem Wechselrichter und der Primärspule.

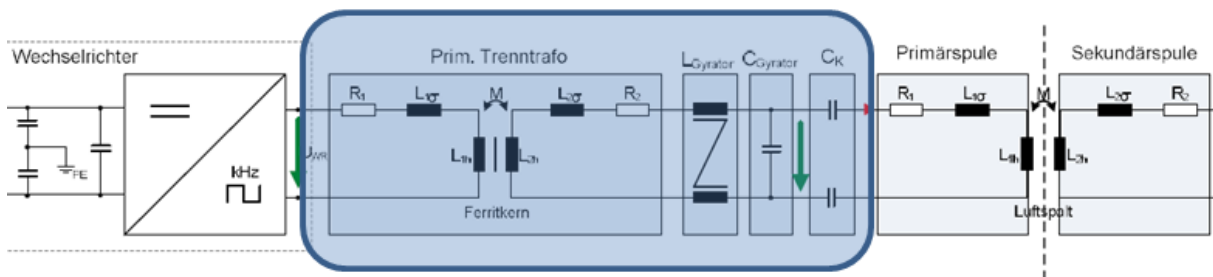


Abbildung 2-17: Netzwerk für Impedanzanpassung und Primärkompensation

Primärspule

Das von der Primärspule erzeugte magnetische Wechselfeld induziert eine Spannung in der fahrzeugseitig angebrachten Sekundärspule. Gemeinsam mit der Sekundärspule bildet die Primärspule somit einen Energieübertrager, der unter Hinzuziehung von bekannten Eigenschaften eines Transformators auszulegen ist. Ein wesentlicher Unterschied zu einer üblichen Transformatorauslegung besteht jedoch in der Anforderung, die Energie über einen vergleichbar großen Luftspalt übertragen zu müssen.

Insofern waren die Primär- und die Sekundärspule hinsichtlich ihrer magnetischen und elektrischen Eigenschaften im Verbund auszulegen. Die Auslegung erfolgte im Rahmen des Arbeitspakets 1.1 mit:

- Dem Finden einer geeigneten Primärspulengröße unter Berücksichtigung der Sekundärspulengröße und dem Einbauort am Fahrzeugunterboden
- Dem Finden einer geeigneten Spulentopologie (Übertragungsleistung von bis zu 22 kW), wobei Interoperabilität zu Referenzspulen aus entsprechenden Standards eines der Kriterien war. Folglich wurden einphasige Zirkular-, Transversal- und Solenoidspulentopologien in eine Bewertung einbezogen. Zudem wurde der Materialaufwand (Kupfer, Ferrit), die zu erwartenden elektrischen Widerstandsverluste und die Charakteristik der magnetischen Feldverteilung im Spulenumfeld dieser unterschiedlichen Spulentopologien bewertet.
- Dem Festlegen von Anforderungen und Bewertungskriterien für den Vergleich der Eignung verschiedener Spulenkandidaten
- Der Durchführung von CAD-Simulationen mit Modellen verschiedener „Spulenkandidaten“
- Auswertung/ Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den CAD-Simulationen und Abgleich mit den Anforderungen/ Bewertungskriterien
- Der Festschreibung der elektrischen und mechanischen Eigenschaften und der Gestalt der im Rahmen des Projekts zu realisierenden Spulen

Letztlich wurde eine Zirkularspulentopologie mit kreisrunder Wicklungsanordnung für die Primär- und die Sekundärspule gewählt. Die Anordnung der Ferrite, der Kupferwicklung und der rückseitigen Schirmung wurde auf die dementsprechende Anordnung der Sekundärspule angepasst. Bauteilquerschnitte (Kupferleiter, Ferrite, Schirmung) wurden unter Berücksichtigung der Anforderungen aus AP 1.1 realisiert. Abbildung 2-18 zeigt den inneren Aufbau der Primärspule.

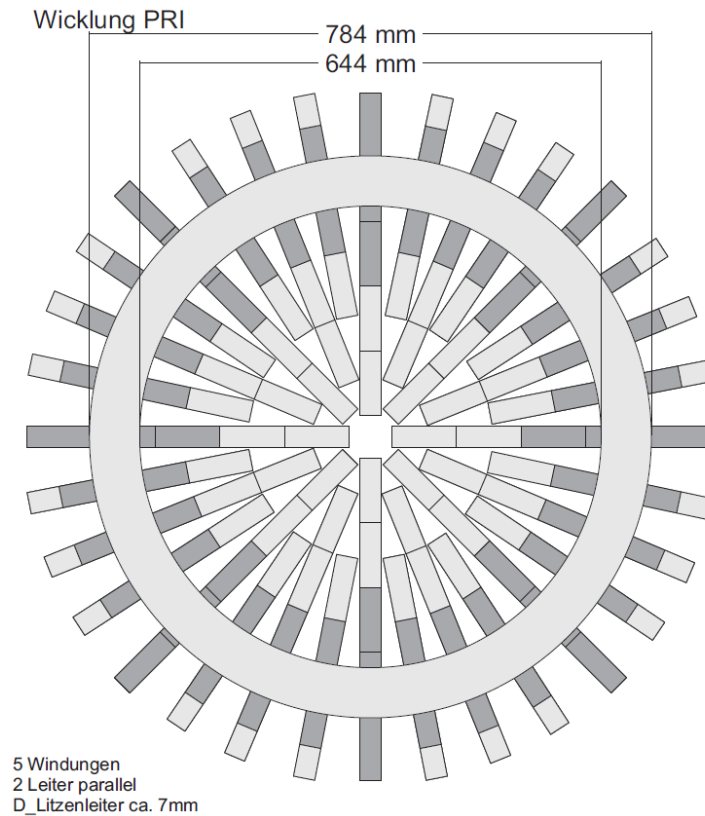


Abbildung 2-18: Innerer Aufbau der Primärschleife

Die Gehäusekonstruktion der Primärschleife wurde auf die Anforderungen der Überfahrbarkeit durch Fahrzeuge und auf mögliche Witterungseinflüsse ausgelegt. Sie war für eine geeignete Verschraubung auf dem Straßenbelag zu realisieren. Abbildung 2-19 zeigt den Querschnitt durch die Gehäusekonstruktion der Primärschleife.

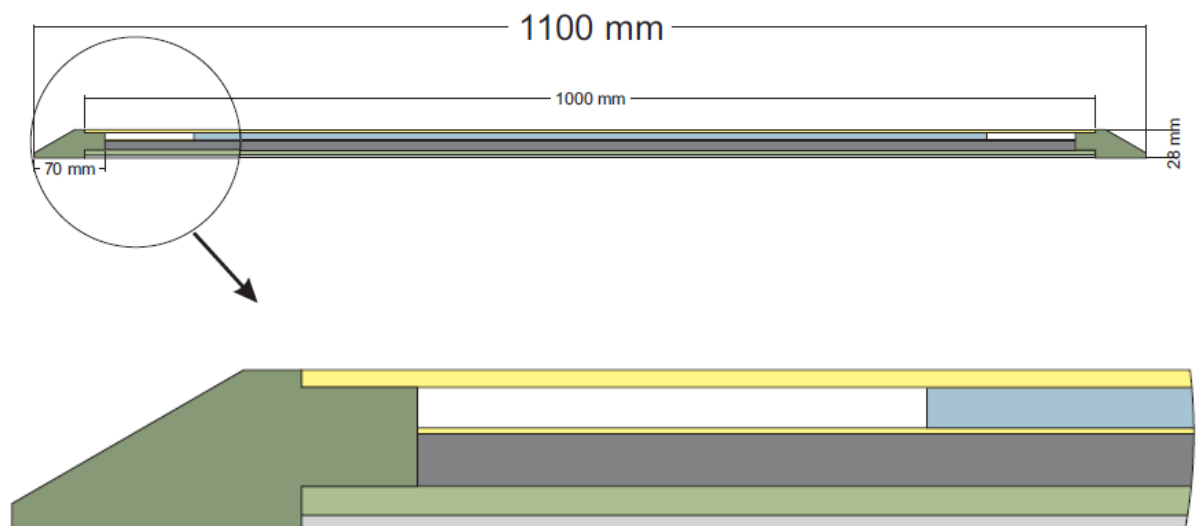


Abbildung 2-19: Konstruktion der Primärschleife

Die Schleife wurde in mehreren Entwicklungsschritten finalisiert. Zunächst wurden die wesentlichen Bestandteile in „loser Bauweise“ aufgebaut und experimentell validiert

(Labormuster). Erst nachdem die Eigenschaften (im Zusammenwirken mit der Sekundärspule) den Erwartungen aus Simulationen (siehe AP 1.1) entsprachen, wurden ihre Bestandteile in das Gehäuse integriert. Abschließend erfolgte ein Verguss der Konstruktion mit einem geeigneten Vergussmaterial, um die Kupferverlustwärme während des Betriebs von ihren inneren Bestandteilen in geeigneter Weise an die Oberflächen des Spulengehäuses abführen zu können.

Abbildung 2-20 zeigt einen Versuchsaufbau bei INTIS. Im Zuge der Versuche konnte die übertragbare Leistung verifiziert werden.

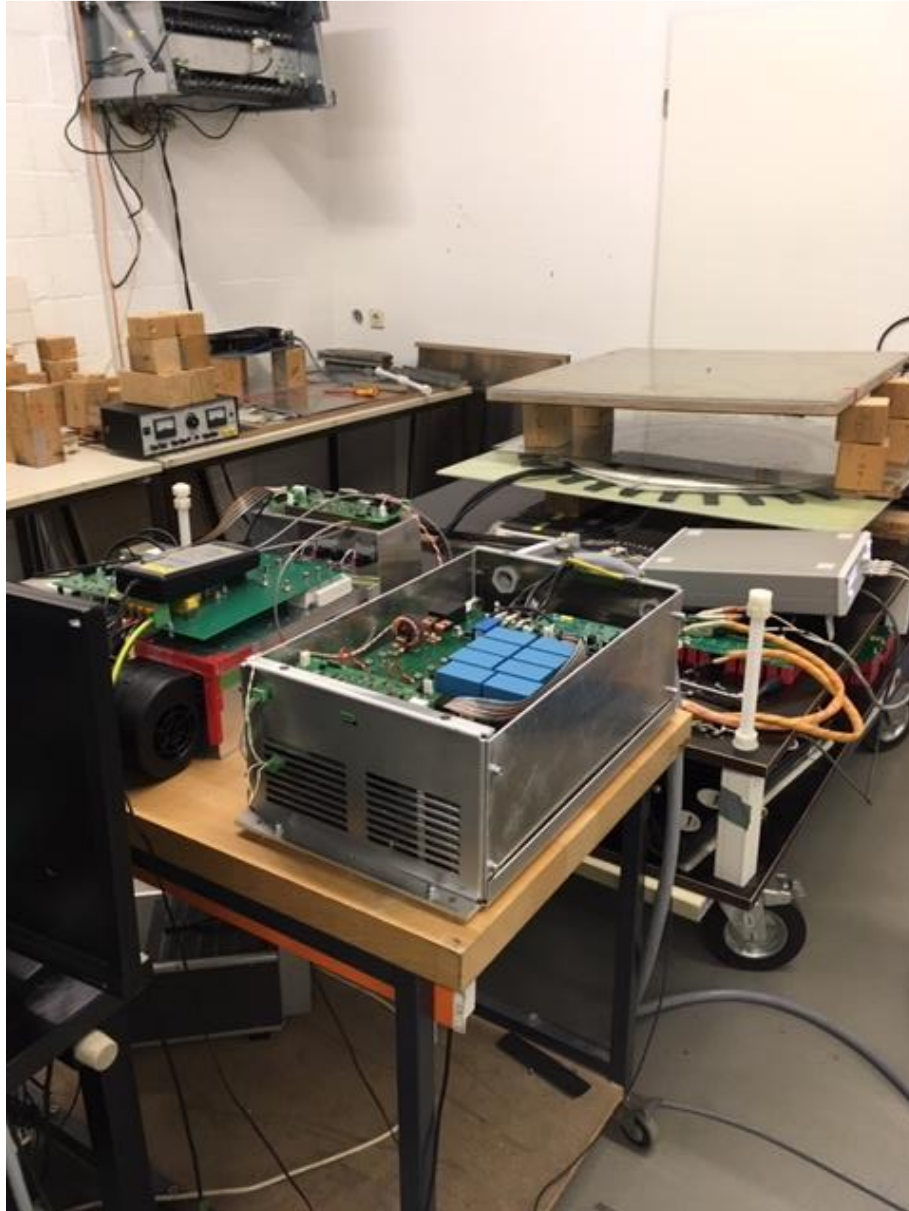


Abbildung 2-20: Leistungstest mit Labormustern der Spulen und des Wechselrichters

Zu Verläufen von Strom und Spannung bei einer Leistungsübertragung von 22 kW wird an dieser Stelle auf Ergebnisse der Vermessungen im Zuge des Arbeitspakets 1.3 verwiesen. Die gewünschte Übertragungsleistung wurde erreicht, thermisch waren keine unzulässigen Erwärmungen feststellbar. Die final gewonnenen Erkenntnisse aus den experimentellen

Untersuchungen sind in die Entwicklung aller weiteren Bestandteile des induktiven Ladesystems eingeflossen.

Ladeprozesssteuerung, Systemüberwachung, Drahtloskommunikation mit dem Fahrzeug

Für die Ladeprozesssteuerung und die Systemüberwachung (siehe Abbildung 2-21) wurde eine separate Baugruppe konzipiert und zum Einsatz gebracht. Bezüglich der Ladefunktionen wird sie über einen CAN-Bus mit Daten der Drahtloskommunikationseinheit gespeist. Die Drahtloskommunikationseinheit ist eine Entwicklung des Projektpartners elenia/ TU-Braunschweig.

Die Daten der Drahtloskommunikationseinheit werden in der Ladeprozesssteuerung ausgewertet und in Daten umgewandelt, die von den verschiedenen Bestandteilen der Primäreinheit, ihrer jeweiligen Funktionen entsprechend, ausgewertet und weiterverarbeitet werden. Neben der Ladeprozesssteuerung werden von dieser Baugruppe Daten zum Zustand der Einzelbestandteile der Primäreinheit ausgewertet und wenn erforderlich, werden z. B. Abschaltkommandos im Rahmen der Systemüberwachung abgesetzt. Die Systemüberwachung ist nicht auf Daten von der Sekundäreinheit angewiesen, womit der Drahtloskommunikation zwischen Primär- und Sekundärseite auch keinerlei Sicherheitsrelevanz zugeordnet werden musste. Dieses Konzept entspricht einer diesbezüglich sehr grundsätzlichen Anforderung aus Standards zum induktiven Laden.

Die Ladeprozesssteuerung übernimmt auch Funktionen, die nicht unmittelbar mit dem induktiven Laden im Zusammenhang stehen. Hierzu zählen z. B. die Ansteuerung der Hauptschütze der 400 V Netzversorgung und die Belüftung/ Klimatisierung des Schaltschranks der Primäreinheit.



Abbildung 2-21: Ladeprozesssteuerung mit Systemüberwachung und Schnittstelle zur Fahrzeug-Drahtloskommunikation

Benutzerschnittstelle

Die Primäreinheit besitzt eine Ethernet-Schnittstelle, über die Zustandsdaten des induktiven Ladens bereitgestellt werden können. Ein Austausch von Daten ist für den Betrieb des Ladesystems nicht zwingend erforderlich. Die Schnittstelle half bei der Systemdiagnose im Rahmen der Entwicklung und den Inbetriebnahmen an den Einsatzstandorten in Berlin und Braunschweig und steht auch weiterhin, insbesondere zu Diagnosezwecken, zur Verfügung. Für die Analyse der sehr umfangreichen Daten der Primäreinheit steht ein Softwaretool zur Verfügung (siehe Abbildung 2-22), mit dem im Zuge von Diagnosen auch vollautomatisch laufende Prozesse unterbrochen und durch Nutzerbedienung ersetzt werden können.

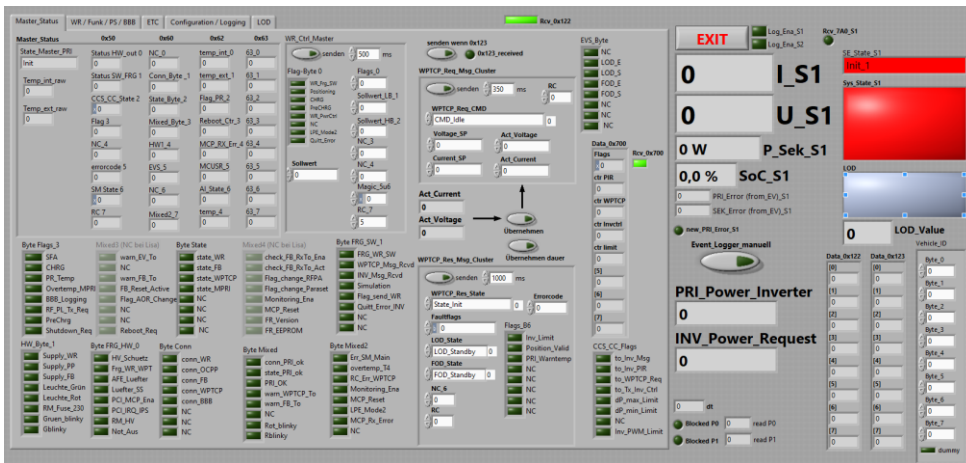


Abbildung 2-22: Beispieldarstellung zum softwarebasierten Diagnosetool

Schaltschrank der Primäreinheit

Mit Ausnahme der Primärspule sind alle Bestandteile der Primäreinheit in einem Outdoor-Schaltschrank mit den Abmessungen 1200 x 600 x 1200 mm (B x T x H) untergebracht. Der Schaltschrank ist in Abbildung 2-23 dargestellt. Im linken Schaltschrankbereich befinden sich Baugruppen für die Anbindung an das 3-phasige 400 V Energieversorgungsnetz (5-polige Anschlussklemme für die Eingangskabel, Hauptschütz, Überspannungsschutz, EMV-Filter), das 24 V Netzteil und die Baugruppen des AFE. Im rechten Schaltschrankbereich sind alle ladesystemspezifischen Bestandteile der Primäreinheit untergebracht (u. a. der Wechselrichter, der Ausgangstransformator, der Gyrtator und die Primärspulenkompensationseinheit). Zudem befinden sich im rechten Schaltschrankteil die Baugruppen der Ladeprozesssteuerung. Aus dem rechten Schaltschrankbereich erfolgt die 85 kHz AC-Versorgung der Primärspule, wobei die maximal zulässige Länge der AC-Verbindungsleitungen zur Primärspule auf maximal 7 m festgelegt wurde und die wirksamen Induktivitäten dieser Verbindungsleitungen bei der Auslegung der Primärspulenkompensation zu berücksichtigen waren.



Abbildung 2-23: Anordnung der Primäreinheit im Schaltschrank

2.1.3 Entwicklung und Aufbau Sekundäreinheit (AP 1.3)

Unter der Sekundäreinheit werden alle Baugruppen und Komponenten des Ladesystems verstanden, die im Fahrzeug verbaut werden und somit die Aufnahme der durch das Magnetfeld übertragenden Leistung und die Einspeisung dieser Leistung in die HV-Batterie übernehmen. Zusätzlich sind weitere Komponenten für Kommunikation, Bedienung, Versorgung, usw. erforderlich. Die Sekundäreinheit kann funktional in folgende Komponenten unterteilt werden:

- 1) Sekundärspule und Kompensation
- 2) Leistungselektronik und elektrische Schaltvorrichtung
- 3) Mess- und Steuertechnik
- 4) Kommunikationstechnik
- 5) Benutzerschnittstelle
- 6) Spannungsversorgung

Das von der Primärspule erzeugte magnetische Wechselfeld induziert eine Spannung in die fahrzeugseitig angebrachte Sekundärspule. Die beiden Spulen bilden dabei zusammen einen Übertrager. Da die beiden Spulen für eine optimale Funktion in ihrer Auslegung aufeinander angepasst werden müssen, erfolgte die Entwicklung der Sekundärspule im direkten Verbund mit der Primärspule. Neben den elektrischen und elektromagnetischen Anforderungen sind auf der Sekundärseite zusätzlich die Ergebnisse der Bauraumuntersuchung am Fahrzeug eingeflossen. Die übrigen Baugruppen orientieren sich direkt am zuvor aufgestellten Anforderungskatalog und wurden jeweils über festgelegte Schnittstellen von den

Projektpartnern einzeln oder in Kooperation entwickelt. Nachfolgend werden die einzelnen Baugruppen und ihre Eigenschaften genauer dargestellt.

Sekundärspule

Die magnetische und elektrische Entwicklung der Sekundärspule erfolgte gemeinsam mit der Auslegung der Primärspule, da nur so eine einwandfreie Funktion und das Einhalten der geforderten Eigenschaften gewährleistet werden konnte. Durch die mit der Entwicklung der Primärspule einhergehenden Abhängigkeiten wurde für die Sekundärseite mit einer Zirkularspule die gleiche Topologie ausgewählt, wie für die Primärseite. Ebenso wurden auch für die Sekundärspule Betrachtungen zu den Dimensionen der Wicklung, der notwendigen Ferritanordnung und der Wahl der Leiterquerschnitte durchgeführt. Die verwendeten Ferrite und die Hochfrequenz (HF)-Litze sind dabei identisch zur Primärseite, die Spule wird jedoch von einem Durchmesser von 960 mm (Ferrit) der Primärspule auf 790 mm (Ferrit) für die Sekundärspule reduziert. Der Durchmesser der Wicklung wurde ebenfalls entsprechend verkleinert. Abbildung 2-24 zeigt den inneren Aufbau der Spule.

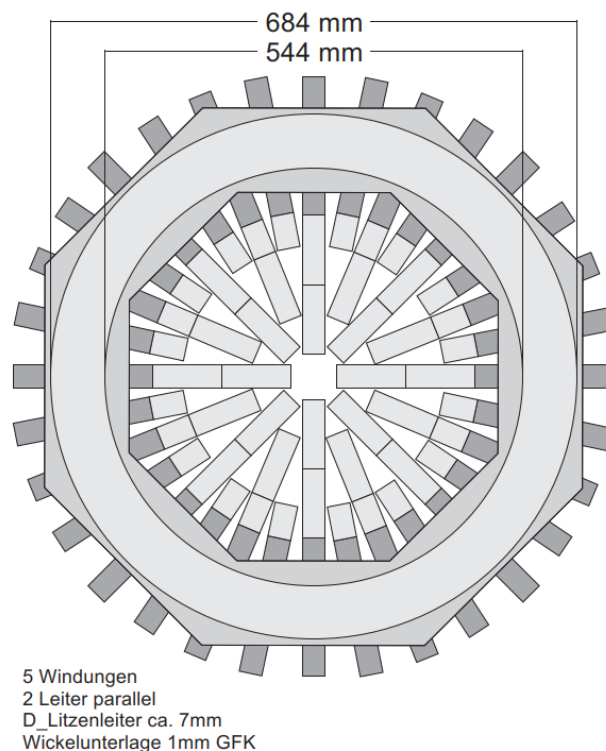


Abbildung 2-24: Innerer Aufbau der Sekundärspule

Während die Primärspule in ihrer Gehäusekonstruktion auf die Anforderungen der Überfahrbarkeit durch Fahrzeuge und auf mögliche Witterungseinflüsse ausgelegt werden musste, sind die Anforderungen an die Sekundärspule auf die Bedingungen unter dem Fahrzeug angepasst worden.

Bezugnehmend auf die mechanische Integration ins Fahrzeug wurden frühzeitig mögliche Bauformen des Gehäuses, sowie die Anordnung der einzelnen Komponenten berücksichtigt, um die spätere Fahrzeugintegration so früh wie möglich im Entwicklungsprozess einzubinden.

Konstruktiv benötigt die Sekundärspule beispielsweise keine seitlichen Gehäuseabschrägungen, die das Befahren mit Fahrzeugen ermöglicht und Stolpergefahr reduziert. Es ist jedoch sinnvoll die am Unterboden montierte Spule in und entgegen der Fahrrichtung um eine möglichst flach verlaufende Schräge zum Unterboden hin zu ergänzen. Überfährt das Fahrzeug auf der Straße Objekte (z. B. abgebrochene Äste) wird durch diese Lösung ein Hängenbleiben des Fremdkörpers an der Spulenkante verhindert. Ebenso wird vermieden, dass die Spulenkante beim Überfahren von Bordsteinen an der Bordsteinkante anstößt und größerer Schaden am Spulensystem oder dessen Aufhängung erzeugt wird. Abbildung 2-25 zeigt den Querschnitt durch die Gehäusekonstruktion der Sekundärseite.

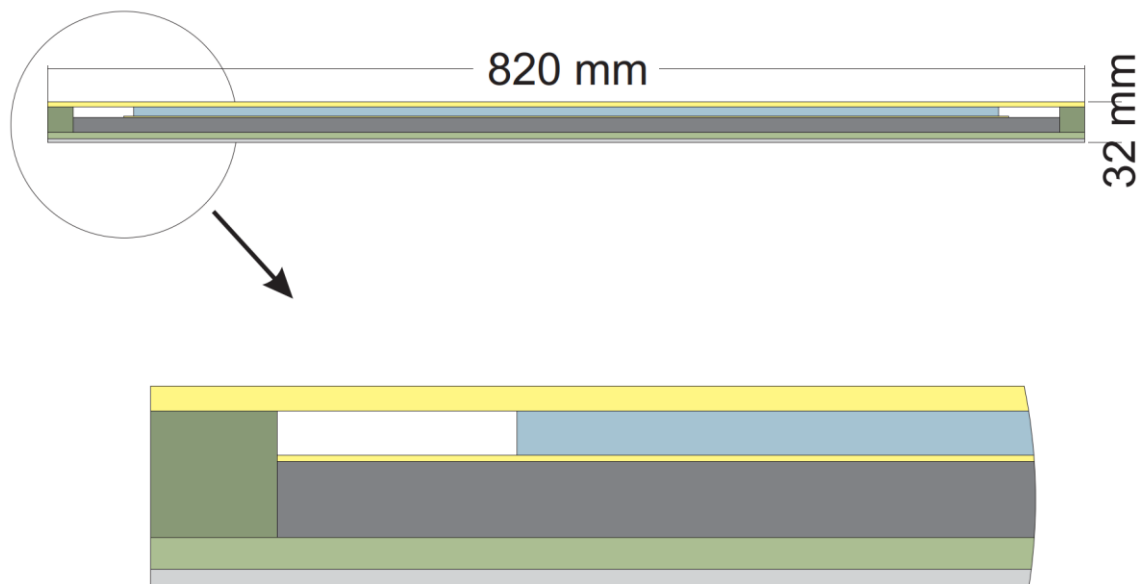


Abbildung 2-25: Querschnitt durch die Sekundärspule

Die entworfene Sekundärspule wurde anschließend entsprechend der vorhergehenden Entwürfe und Berechnungen als Labormuster aufgebaut und in ersten Leistungstests auf ihre Funktionsfähigkeit zusammen mit einem Labormuster der Primärspule untersucht. Dazu kamen soweit möglich auch schon die Prototypen der übrigen Komponenten des Leistungspfades zum Einsatz. Bei den Untersuchungen konnte das Spulensystem in einzelnen und gemeinsamen Untersuchungen bei den Projektpartnern als funktionsfähig eingestuft werden. Abbildung 2-26 zeigt den Versuchsaufbau an der TU Braunschweig. Im Zuge der Versuche konnte die übertragbare Leistung verifiziert werden.

Abbildung 2-27 zeigt die Verläufe von Strom und Spannung bei einer Leistungsübertragung von 22 kW mit dem abgebildeten Versuchsaufbau. Das System speist die übertragene Leistung in eine elektronische Senke, die in dieser Anordnung die Batterie simuliert. Der Innenwiderstand wird mit $100\text{ m}\Omega$ verhältnismäßig hoch gewählt, um bei ersten Tests der Regelung ein gutmütiges Verhalten zu erzielen. Wie zu erkennen ist der Strom des

Wechselrichters sinusähnlich, die Ströme der Primär- und Sekundärspule sind praktisch sinusförmig. Die Primärspule wird entsprechend der festgelegten Topologie vom Wechselrichtervierpol (Gyrator) gespeist. Das System ist in diesem Versuch induktiv abgestimmt, was in einer Phasenverschiebung zwischen Wechselrichterspannung und Strom resultiert. Die gewünschte Übertragungsleistung wird erreicht, thermisch ist keine unzulässige Erwärmung der Spulen oder der Ferrite erkennbar.

In weiteren Versuchen wird zusätzlich die Regelung überprüft. Diese verhält sich bis hin zu hohen Leistungen stabil und zeigt nur im Bereich nahe der Wechselrichtervollaussteuerung eine Pulsation der Leistung.

Das in der Systementwicklung vorgesehene Verhalten des induktiven Ladesystems konnte mit den durchgeführten Messungen verifiziert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in die Weiterentwicklung des Systems und der Komponenten (Leistungselektronik, Kompensation, Regelung, etc.) eingeflossen.

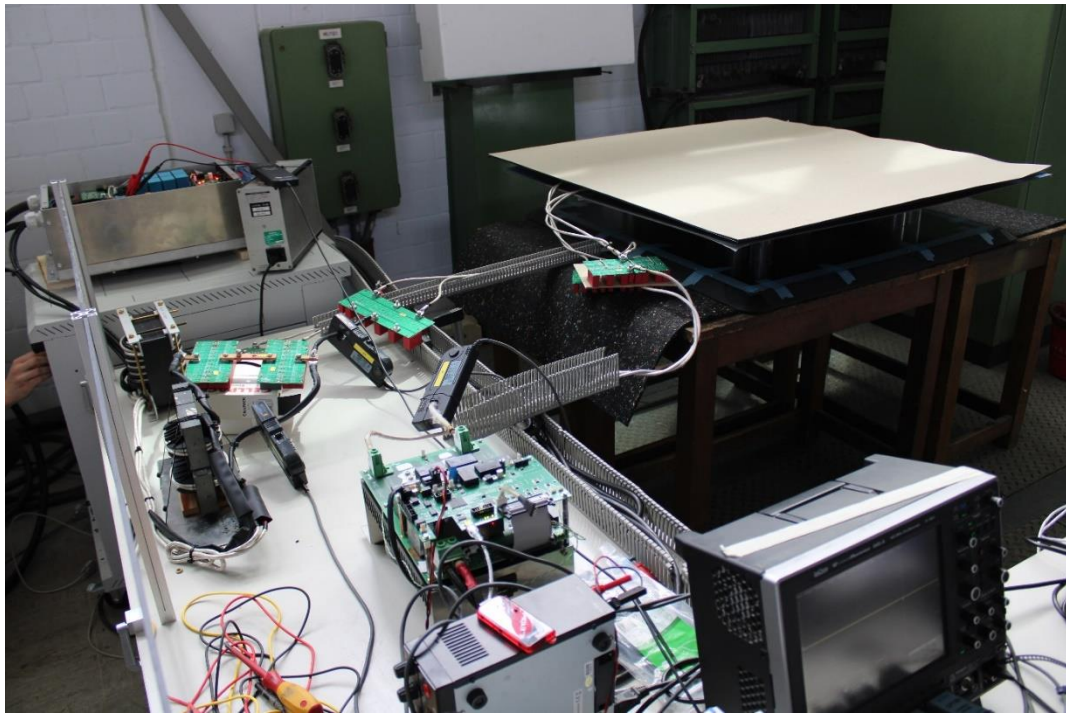


Abbildung 2-26: Leistungstest mit Labormustern der Spulen

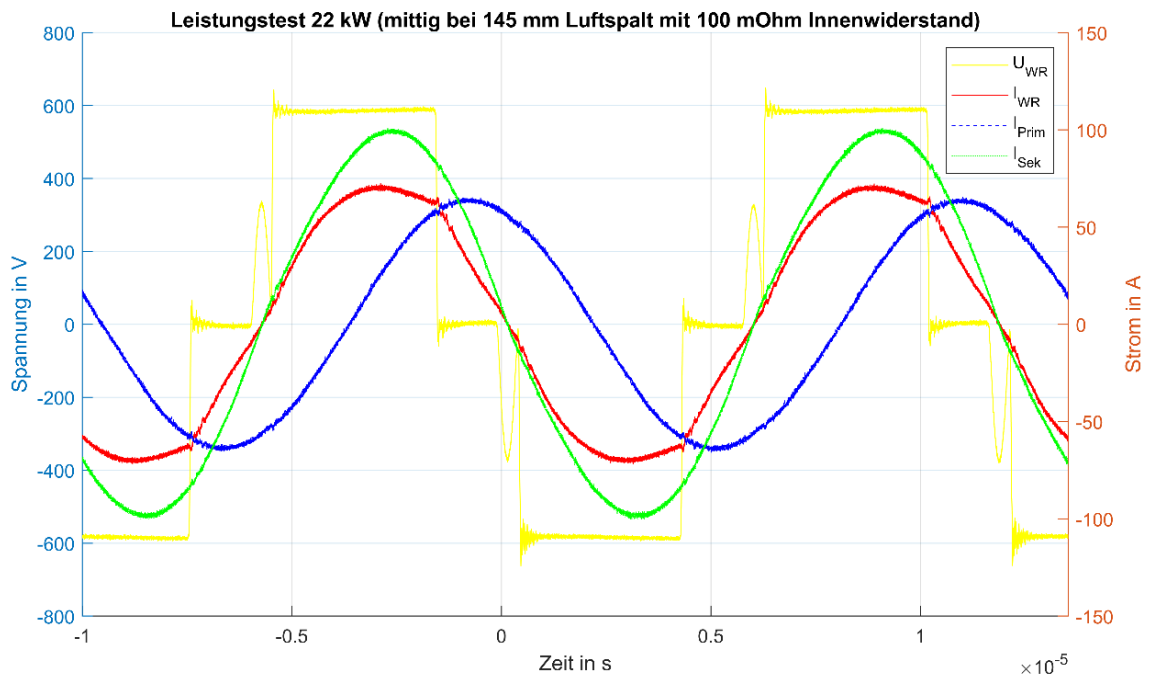


Abbildung 2-27: Strom- und Spannungsverläufe während eines Leistungstests bei 22 kW

Nach den Untersuchungen an den Labormustern der Spulen erfolgte die Überführung in eine fahrzeugtaugliche Ausführung, die bei den im späteren Verlauf beschriebenen Systemtests ebenfalls erprobt und für funktionsfähig befunden wurde.

Kompensation

Entsprechend der festgelegten Topologie kommt auf der Sekundärseite eine serielle Kompensation zum Einsatz. Die zur Ausbildung des Resonanzkreises mit der Sekundärspule notwendige Kapazität wird im Sinne der Symmetrie und der Spannungsaufteilung jeweils zu gleichen Teilen an den beiden Abgängen der Spule angeschlossen. Zum Aufbau der Kompensation kommen ebenso wie auf der Primärseite die bereits entwickelten Leiterkarten und die zuvor erprobten Keramikcondensatoren in angepasster Stückzahl zum Einsatz. Neben den durch thermische Ausdehnung entstehenden mechanischen Spannungen an den Keramikcondensatoren kommen bei den im Fahrzeug montierten Komponenten auch mechanische Belastungen durch Stöße und Erschütterungen im Fahrbetrieb hinzu. Um die mechanische Belastung der Condensatoren möglichst gering zu halten, werden die Leiterkarten mithilfe von Metall-Gummi-Puffern am Geräteträger befestigt, sodass Stöße gedämpft werden und eine Krümmung der Platine durch die thermisch bedingte Längenänderung reduziert wird. Die mit den Kompensationscondensatoren bestückten Leiterkarten sind in Abbildung 2-28 dargestellt.

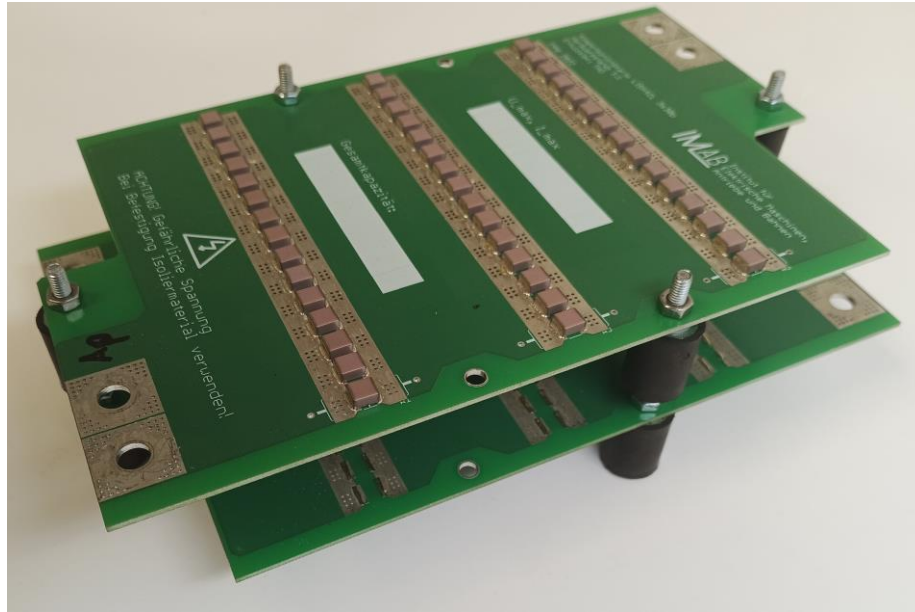


Abbildung 2-28: Kompensationsleiterkarten mit elastischer Befestigung

Zum Zeitpunkt des Projektendes sind im Fahrzeug keine Ausfälle durch beschädigte Kondensatoren bekannt gewesen.

Sekundärseitige Leistungselektronik

Die Leistungselektronikbaugruppe der Sekundärseite hat die Aufgabe mithilfe eines Gleichrichters die induzierte Wechselspannung der Sekundärspule gleichzurichten und soweit zu glätten, dass der über den Gleichrichter in die Fahrzeugbatterie gespeiste Ladestrom die Anforderungen des Fahrzeugs erfüllt. Zu diesen Anforderungen zählen in erster Linie ein ausreichend geringer Stromrippel des Ladestroms in allen Betriebspunkten und die Überwachung des Stroms während des Ladebetriebs.

Zusätzlich muss die Leistungselektronik jedoch auch die notwendige Peripherie für Messung, Überwachung und Regelung, sowie die notwendigen Schnittstellen zur Verfügung stellen.

Die Anforderungen an die Leistungselektronik wurden wie folgt festgelegt.

Leistungspfad

- Ausgangsspannungsbereich: 280...400 V Gleichspannung
- Ausgangsleistung: mindestens 22 kW
- Glättung des Ausgangsstroms, Wechselstromanteil kleiner 1 A (Spitze-Spitze-Wert)
- Allpolige Trennung des Ausgangs über geeignete Schütze
- Umschaltfunktion zwischen konduktiver und induktiver Ladefunktion
- Zuschaltbarer Belastungskreis für den Fahrzeugpositionierungsvorgang und zur Zwischenkreisentladung

Messtechnik

- Erfassen der Zwischenkreisspannung
- Erfassen des Ausgangsstroms
- Temperaturmessung an den relevanten Stellen des Systems

Schnittstellen und Peripheriefunktionen

- CAN-Bus-Kommunikation zur internen Vernetzung der beteiligten Komponenten
- Einbindung der Funktionalität zur Zwischenraumüberwachung des Luftspaltes
- WLAN-Verbindung zur Primärseite für die Steuerung des Ladevorgangs
- Ansteuerung und Überwachung der Leistungsschütze
- Anbindung an das 12-V-Bordnetz mit bedarfsgerechter Selbsthaltungsfunktion
- Integrierte Fehlerüberwachung mit selbstständiger Abschaltung im Fehlerfall

Benutzerschnittstelle

- Einbindung einer Benutzerschnittstelle (HMI) im Fahrgastraum
- Detektion und Rückmeldung der korrekten Fahrzeugpositionierung
- Auswahloption zwischen induktiver und induktiver Ladefunktion

Leistungselektronische Auslegung

Entsprechend der zuvor aufgestellten Anforderungen wurde für den Leistungspfad ein Gesamtkonzept erstellt, in dem alle relevanten Funktionen berücksichtigt sind. Abbildung 2-29 zeigt das resultierende Prinzipschaltbild mit den wichtigsten Komponenten, deren Funktion nachfolgend erläutert wird.

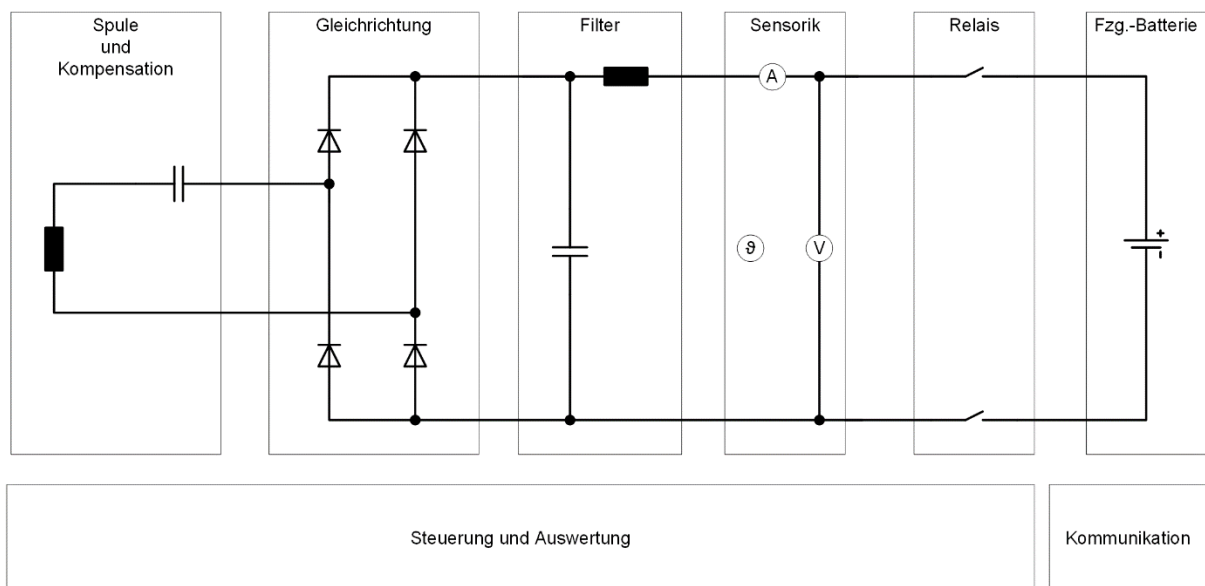


Abbildung 2-29: Blockschaltbild der Sekundärseite

Ausgehend von der Sekundärspule und der notwendigen Kompensation erfolgt die Gleichrichtung mithilfe von vier Dioden. Die nachgeschaltete Filterstufe ist so dimensioniert, dass eine hinreichende Glättung des Ladestroms für die Batterie erzielt wird und zusätzlich Rückwirkungen auf das Kompensationsnetzwerk der Sekundärspule vermieden werden. Alle Größen, die für die Regelung (z. B. Batteriespannung und Ladestrom) und Überwachung (Temperatur, Überschreitung der elektrischen Grenzwerte für Ladestrom und Spannung) notwendig sind, werden erfasst und von der Steuerung ausgewertet. Mithilfe der Kommunikationsschnittstellen erfolgt die Anbindung zum CAN-Bus des Ladesystems und damit die Verbindung zu den übrigen Komponenten des Ladesystems. Für die Verbindung der Leistungselektronik mit der Fahrzeugbatterie sind zwei DC-Schütze vorgesehen, mit denen bei deaktiviertem Ladesystem oder bei einem konduktiven Ladevorgang das induktive Ladesystem allpolig vom HV-Netz des Fahrzeugs getrennt wird. Zusätzlich zu der funktionalen Freischaltung bei inaktivem System stellen die Schütze einen wesentlichen Punkt im Sicherheitskonzept dar und erlauben eine Freischaltung des Ladesystems von der Batterie im Fehlerfall. Die aktuelle Schaltstellung der Schütze wird von der Steuerung überwacht. Beim Auftreten von Fehlerfällen (z. B. unsymmetrisches Umschalten der Schütze oder der unerwünschte Abfall eines Schützes während des Ladebetriebs) wird die Vorbereitung zum Laden oder der aktive Ladevorgang abgebrochen. Durch den Einsatz von zwei Schützen je Leistungspfad ist auch bei Ausfall eines Schützes die Abschaltung des jeweiligen Leistungspfades möglich.

Auslegung der Gleichrichtung

Der Gleichrichter hat zusammen mit der nachgelagerten Glättung die Aufgabe aus der induzierten Wechsellspannung des Spulensystems eine Gleichspannung zu erzeugen, deren Rippel unterhalb der zuvor festgelegten Grenze liegt. Im Interesse des Gesamtsystemwirkungsgrades muss auch diese Einzelkomponente auf größtmögliche Effizienz ausgelegt werden.

Für die Auslegung des Gleichrichters wurden die elektrischen Anforderungen gesammelt und das Verhalten der Schaltung wurde mithilfe von Schaltungssimulationen untersucht. Die betrachteten Auslegungseckpunkte wurden anhand der elektrischen Eigenschaften der Fahrzeugbatterie (Spannungsbereich, zulässiger Ladestrom) und den Vorgaben des induktiven Ladesystems festgelegt. Unter Berücksichtigung einer Auslegungsreserve gegenüber der im Betrieb des Fahrzeugs auftretenden Batteriespannungen ergibt sich dabei ein Batteriespannungsbereich zwischen 280 ... 400 V. Die Ladeleistung wird mit nominalen 22 kW, sowie maximalen 25 kW angesetzt. Die Frequenz des Übertragungssystems liegt definitionsgemäß bei 85 kHz. Diese verhältnismäßig hohe Frequenz stellt zusammen mit den mit der Ladeleistung einhergehenden Strömen und der gleichzeitigen Forderung nach einem größtmöglichen Wirkungsgrad hohe Anforderungen an die verwendeten Halbleiterbauteile. Daher wurden verschiedene Modelle von verlustarmen SiC-Dioden unter den Aspekten geringer Verluste und guter Wärmeabfuhr verglichen. Für den Vergleich der Dioden wurden mithilfe eines Modells zur Verlustleistungsberechnung systematisch mehrere Betriebspunkte

als Kombination unterschiedlicher Batteriespannungen und Ausgangsleistungen betrachtet, um über den gesamten möglichen Betriebsbereich des Gleichrichters Wirkungsgrade bestimmen und eine Abschätzung der auftretenden Erwärmung durchführen zu können. Mögliche Einflüsse durch die Umgebungstemperaturen im Fahrzeug und die durch die Einbausituation bedingten Einschränkungen der Wärmeabfuhr wurden zu diesem Zweck abgeschätzt und in der Parametrierung des Modells berücksichtigt. Abbildung 2-30 zeigt exemplarisch die Einzel- und Gesamtverluste, den Wirkungsgrad des gesamten Gleichrichters und die berechneten Sperrschichttemperaturen der Gleichrichterdiode für den gesamten Bereich der möglichen Batteriespannungen und Ladeleistungen für eine SiC-Diode mit einem maximalen Durchlassstrom von 200 A.

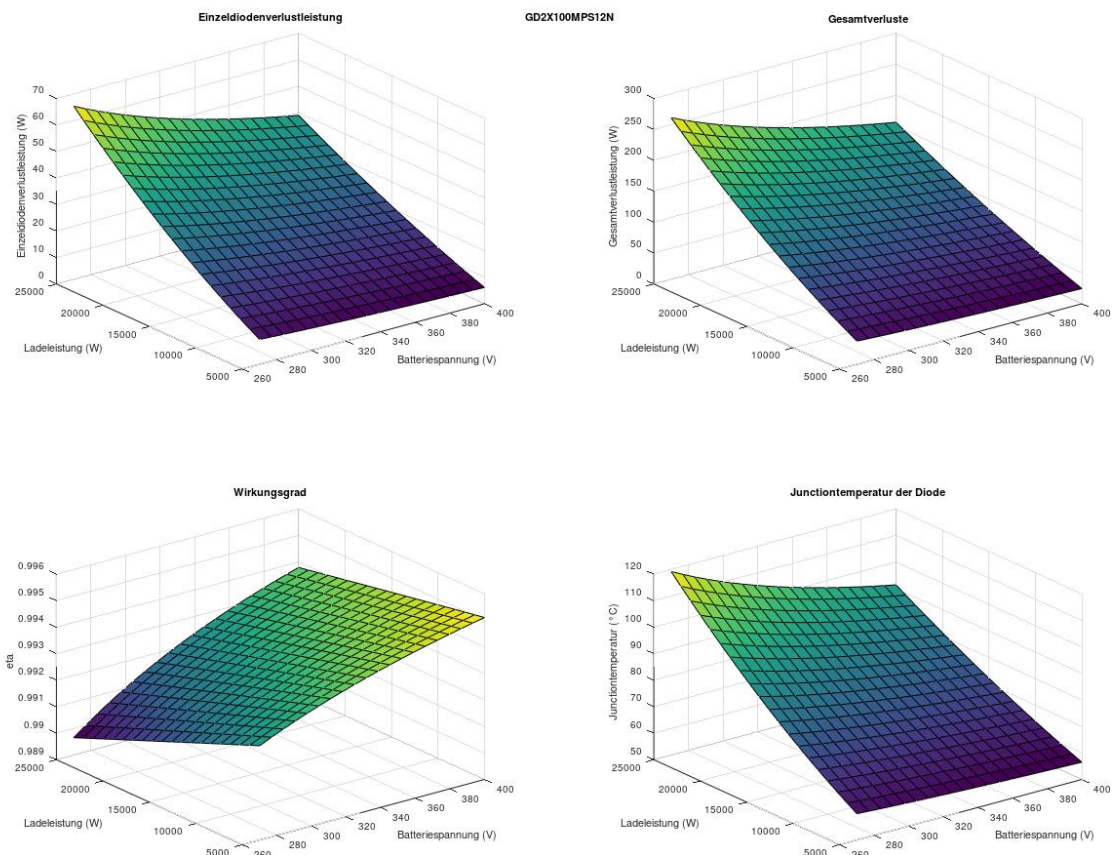


Abbildung 2-30: Exemplarisches Verlustverhalten, Wirkungsgrad und Sperrschichttemperatur der Gleichrichterdiode

Wie zu erkennen, treten insbesondere bei hohen Leistungen und gleichzeitig niedriger Spannung höhere Verluste auf, die im Wesentlichen durch die bei diesen Betriebspunkten hohen Diodendurchlassströme entstehen. Geeignete Halbleiter wurden entsprechend untersucht und die Resultate wurden im Hinblick auf einen verlustarmen Betrieb verglichen. Als weiteres Auslegungskriterium wurde festgelegt, dass das Halbleitergehäuse eine möglichst gute Wärmeabfuhr an den ausgewählten Kühlkörper ermöglichen soll. Für den Gleichrichter werden die Dioden vom Typ GD2X100MPS12N des Herstellers GeneSiC eingesetzt. Neben den im Vergleich niedrigen Verlusten wird auch der Aufbau der Diode im

TO-227-Gehäuse als vorteilhaft angesehen, da die Kühlfläche des Gehäuses bereits durch den inneren Aufbau isoliert ist und gleichzeitig eine vergleichsweise große Kühlfläche bietet.

Die Filterung der gleichgerichteten Spannung erfolgt mithilfe einer aus Folienkondensatoren gebildeten Zwischenkreiskapazität. Zur Fahrzeugseite hin wird zusätzlich eine Glättungsdrossel vorgesehen. Diese Anordnung wird gewählt, um eine ausreichende Glättung des Batteriestroms zu erreichen, ohne den Resonanzkreis der Sekundärseite zu beeinflussen. Dabei ist zu beachten, dass durch diese Anordnung bei großen Batterieströmen und dem gleichzeitigen Abschalten im Fehlerfall die Spannungsbelastung an der Trennstelle steigt, sodass hier Gegenmaßnahmen zum Begrenzen der Spannung ergriffen werden müssen.

Um den Zwischenkreis aktiv entladen zu können und um während der Positionierungsphase des Fahrzeugs eine Aussage über die induzierte Spannung auf der Sekundärseite treffen zu können, verfügt die Schaltung parallel zum Zwischenkreis über einen schaltbaren Belastungswiderstand. Die thermische Auslegung erfolgt dabei dauerlastfest, sodass der Belastungswiderstand nicht durch zu langes Einschalten überlastet werden kann.

Mess- und Steuertechnik

Die Erfassung der betriebsrelevanten elektrischen und thermischen Größen erfolgt galvanisch getrennt zwischen Leistungskreis und Steuerungselektronik. Zur Bestimmung der abgegebenen Leistung und für die Regelung des Systems werden die Ausgangsgleichspannung und der Ausgangsgleichstrom des Gleichrichters erfasst. Zusätzlich werden die Kühlkörpertemperaturen im Bereich der Gleichrichterdiode und der Lastwiderstände des Belastungskreises gemessen. Außerdem stehen weitere Temperaturmesseingänge zur Auswertung zusätzlicher Temperaturen, z. B. der Temperatur der Sekundärseite oder der Kompensationskartentemperatur, zur Verfügung.

Die Steuerung und Überwachung der Baugruppe wird über eine separate Steuerkarte realisiert, die mit einem Mikrocontroller und einem Complex Programmable Logic Devices (CPLD) ausgestattet ist. Der Mikrocontroller nimmt die Erfassung und Auswertung der Messsignale vor und steuert je nach Bedarf die notwendige Peripherie (Belastungskreis, Lüfter, Schütze der Konduktiv-Induktiv-Umschaltung usw.). Ebenfalls wird die CAN-Kommunikation mit den übrigen Komponenten des Ladesystems über den Mikrocontroller realisiert.

Mittels einer fest in das CPLD einprogrammierten Logik wird zusätzlich zu den im Programm des Mikrocontrollers implementierten Schutzfunktionen eine weitere Sicherheitsebene hinzugefügt. Alle analogen Messsignale werden bereits vor der Digitalisierung im Mikrocontroller mittels Komparatoren mit fest eingestellten Maximalwerten verglichen. Überschreitet ein Messsignal seinen vorgegebenen Maximalwert, kann das CPLD beispielsweise die Schütze des Leistungskreises abwerfen, noch bevor die Auswertung des kritischen Signals im Mikrocontroller erfolgt ist. Zusätzlich wird auch die Überwachung des Schaltzustandes der einzelnen Schütze im CPLD ausgewertet und bei fehlerhaftem Schaltverhalten wird eine Trennung aller Schütze vorgenommen. Die softwareunabhängige

Überwachung des Systems bietet somit einen Schutz, selbst wenn der Mikrocontroller beispielsweise durch einen Programmfehler eine Fehlersituation nicht korrekt auflösen kann.

Alle aufgeführten Funktionen und Schaltungsbestandteile wurden im Zuge der Entwicklung zunächst in einem Labormuster realisiert und umfassend erprobt. Das Labormuster wurde dabei wie in Abbildung 2-31 erkennbar auf einen übersichtlichen Aufbau ausgelegt.

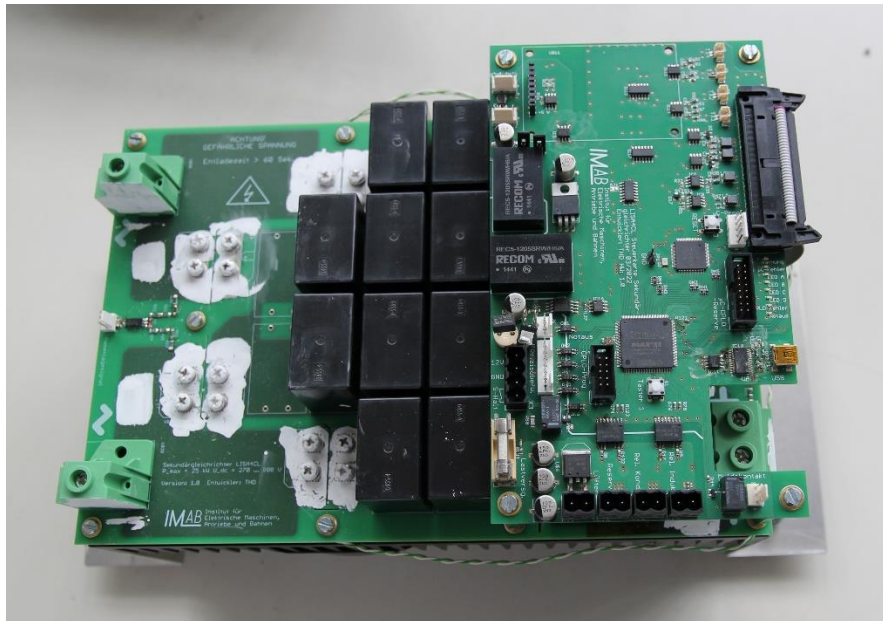


Abbildung 2-31: Labormuster der sekundärseitigen Leistungselektronik

Das Labormuster wurde bei mehreren Erprobungen des Gesamtsystems eingesetzt und auch für verschiedene Messungen im Prüfstandbetrieb verwendet. Basierend auf den Ergebnissen der Prüfstandversuche wurde die sekundärseitige Leistungselektronik für den Einsatz im Fahrzeug weiterentwickelt. Da in der Auslegung des Leistungspfades kein Änderungsbedarf bestand, blieb die Auswahl der Leistungshalbleiter und der passiven Bauelemente unverändert. Wesentliche Änderungen ergaben sich hingegen in der Bauform und dem Kühlkonzept. Ausgehend vom Labormuster, dessen Kühlkonzept für die ursprünglich geplante Montage der Sekundärkomponente am Fahrzeugunterboden ausgelegt war, erfolgte der Umbau des Kühlkonzepts auf den Einsatzbereich im Fahrzeuginnenraum, wodurch die Anforderungen an die Witterungsfestigkeit der Lüfter erheblich reduziert werden konnten. Die überarbeitete Komponente setzt daher auf einen bauraumsparenden Strangprofilkühlkörper mit zwei Lüftern, wodurch die Kühlleistung im Vergleich zu der Kühlung über die Gehäuseaußenseite am Fahrzeugunterboden nur geringfügig verschlechtert wird. Weitere Änderungen betreffen die Ansteuerung der Peripherie, das Hinzufügen weiterer notwendiger Schnittstellen und die Implementierung der vier HV-DC-Schütze in den Bauraum der Leistungselektronik, die einerseits für die Umschaltung zwischen konduktiver und induktiver Ladetechnik notwendig sind und zusätzlich die Trennung des Induktivladesystems bei Nichtbenutzung sicherstellen. Abbildung 2-32 zeigt die überarbeitete Bauform der sekundärseitigen Leistungselektronik.

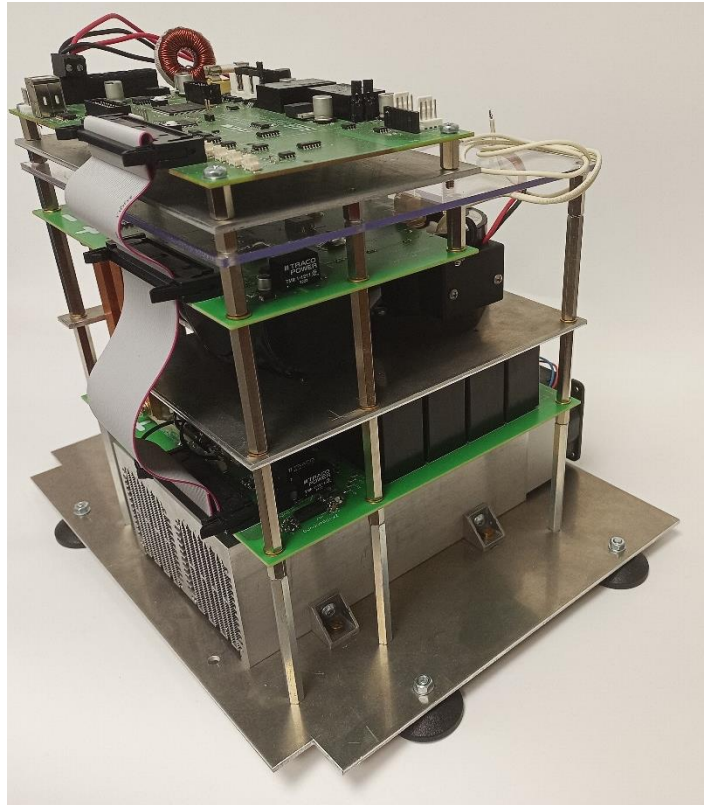


Abbildung 2-32: Überarbeitete Bauform der sekundärseitigen Leistungselektronik

Für den Einbau der Sekundärleistungselektronik in den Laderaum des Fahrzeugs wurde ein Gehäusekonzept entwickelt, das die benötigten Bauräume für die Baugruppen zur Verfügung stellt und gleichzeitig die notwendige Stabilität aufweist, um Schäden an der Komponente im Feldtestbetrieb zu vermeiden. Hierzu wurde der Aufbau eines Grundgerüsts aus Aluminiumprofilen gewählt, das auf mehreren Etagen die jeweiligen Baugruppen beherbergt. Abbildung 2-33 zeigt den Aufbau des Gehäuses während des Fahrzeugeinbaus.



Abbildung 2-33: Sekundärseitige Leistungselektronik während des Einbaus in das Fahrzeug

Im unteren Bereich befinden sich die Kompensation und die beiden HV-DC-Schütze, die beim konduktiven Laden die Verbindung zwischen Ladebuchse und der HV-Batterie herstellen. Auf der nächsten Etage befindet sich der Gleichrichter für die induzierte Spannung sowie der zugehörige Zwischenkreis. Um die Platinengrundfläche zu verkleinern, wird die Gleichrichterplatine im Vergleich zum Prototyp zweigeteilt und gestapelt. Auf der höheren Ebene befinden sich die ausgangsseitigen Glättungsdrosseln, die in diesem Falle von unten an der Platine befestigt werden. Die dadurch entstehende Bauhöhe wird genutzt, um auf der gleichen Ebene die beiden HV-DC-Schütze zu platzieren, die für das Zuschalten des induktiven Ladesystems auf die HV-Batterie des Fahrzeugs zuständig sind.

Auf der obersten Ebene des Gehäuses befindet sich, separiert vom Leistungsteil, der Steuerungsbereich, in dem alle Komponenten für die Steuerung und Kommunikation der Sekundärseite untergebracht sind. Neben der Steuerkarte für den Gleichrichter sind auf dieser Ebene auch die Komponenten für das CCS-Interface, die Auswerteelektronik der Leberobjekterkennung (LOD), die Spannungsversorgung und die WLAN-Kommunikationstechnik für die Funkverbindung zur Primärstation untergebracht.

Das Grundgerüst des Gehäuses ist mit Aluminiumplatten verkleidet. Alle Öffnungen im Gehäuse, Leitungszuführungen, Lüftergitter, usw. sind berühr- und fingersicher ausgeführt. Abbildung 2-34 zeigt die im Fahrzeug integrierte Baugruppe.



Abbildung 2-34: Fahrzeugseitige Baugruppe mit geschlossenem Gehäuse

Spannungsversorgung

Alle Baugruppen der sekundärseitigen Elektronik werden aus dem 12-V-Bordnetz des Fahrzeugs versorgt. Dabei muss im Fahrzeug zwischen der durchgehend verfügbaren Spannungsversorgung (nachfolgend auch *Dauerplus* oder *Klemme 30* genannt) und der nur

bei eingeschalteter Zündung aktiven Spannungsversorgung (*Zündplus* bzw. *Klemme 15*) unterschieden werden. Grundsätzlich soll das induktive Ladesystem nur bei eingeschalteter Zündung aktiviert werden, wofür sich eine Versorgung aus Klemme 15 anbietet. Für das Durchführen des Ladevorgangs muss die Spannungsversorgung jedoch auch aufrechterhalten werden, wenn das Fahrzeug abgestellt wurde. Zu diesem Zweck wurde eine Spannungsversorgungsschaltung für alle Komponenten verbaut, die das System bei Aktivieren der Klemme 15 einschaltet und umgehend eine Selbsthaltung zuschaltet, die das System anschließend aus Klemme 30 des Fahrzeugs speist. Während des Ladevorgangs aktiviert das Fahrzeug außerdem den DC-DC-Wandler, der die 12-V-Batterie des Fahrzeugs aus der HV-Batterie nachlädt. Sobald der Ladevorgang beendet wurde, muss das induktive Ladesystem deaktiviert werden, um die 12-V-Batterie nicht zu entladen. Die Steuerung der Sekundäreinheit prüft zu diesem Zweck den Zustand der Klemme 15, kommuniziert die Systemabschaltung zu den übrigen Bus-Teilnehmern und schaltet das Ladesystem nach Erreichen eines sicheren Zustandes ab. Bei erneutem Starten des Fahrzeugs wird die 12-V-Versorgung des Ladesystems erneut über Klemme 15 aktiviert.

Soll nach dem Abstellen des Fahrzeugs nicht kabellos geladen werden, sondern kabelgebunden an einer DC-Schnellladesäule, muss die Spannungsversorgung ebenfalls aufrechterhalten werden, da die Schütze der Konduktiv-Induktiv-Umschaltung während des kabelgebundenen Ladevorgangs versorgt werden müssen. Zu diesem Zweck wird die 12-V-Versorgung für einen definierten Zeitraum aktiv gehalten und der Beginn eines kabelgebundenen Ladevorgangs wird über die Sensorik an der CCS-Schnittstelle überwacht. Sobald aus der Kommunikation an der CSS-Schnittstelle ersichtlich wird, dass das konduktive Laden beendet wurde, schaltet das System die Versorgung bis zum nächsten Fahrzeugstart ab. Dieser Vorgang wird im Abschnitt 2.1.5 detaillierter dargestellt.

Benutzerschnittstelle

Für die Verwendung des Ladesystems ist im Fahrgastraum ein Bediengerät vom Typ *OPUS A3 STANDARD Basic* des Herstellers *Wachendorff Elektronik* verbaut. Das Gerät bietet ein Farbdisplay und frei programmierbare Tasten und Drehgeber, deren Funktion über eine Software programmiert werden kann. Über den CAN-Bus werden getätigte Eingaben an das System gemeldet. Ebenso können über Busnachrichten die jeweils notwendigen Informationen für den Benutzer angezeigt werden.

Das Bediengerät wird auf dem Armaturenbrett des Fahrzeugs befestigt und mit einer 12-V-Versorgung und einer CAN-Bus-Schnittstelle an die übrige fahrzeugseitige Elektronik des Ladesystems angebunden. Abbildung 2-35 zeigt das installierte Bediengerät.



Abbildung 2-35: Benutzerschnittstelle mit Anzeige der Daten während des Ladevorgangs

2.1.4 Sicherheitskonzept und zugehörige Sensorik (AP 1.4)

Mit dem Einstieg in das Arbeitspaket 1.4 begann die Analyse von Sicherheitsanforderungen an das induktive Ladesystem. In die Analyse wurden insbesondere Anforderungen aus der IEC Norm 61980-1 „Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (IEC 61980-1:2020)“ einbezogen. Hierzu zählten Anforderungen an:

- Umgebungsbedingungen
- Elektrische Verbindung zum Versorgungsnetz
- Zugangsbeschränkungen
- Schutz gegen elektrischen Schlag und Zugang zu gefährlichen aktiven Teilen
- Fehlerschutz
- Berührungsstrom
- Isolationswiderstand
- Wechsellspannungsfestigkeit
- Überstromschutz und Kurzschlussfestigkeit
- Temperaturanstieg und Schutz gegen thermische Störfälle
- Schutz vor Verbrennungen durch Erhitzen von Fremdkörpern
- Schutz gegen elektromagnetische Felder
- Notfallabschaltung
- Lastschalter und Lasttrennschalter, Leitungsschutzschalter
- Festigkeit von Werkstoffen und Bauteilen (Anprallschutz)
- Korrosionsbeständigkeit, insbesondere elektrischer Verbindungen
- Thermische Stabilität von Gehäusen

Die Gesamtsystemauslegung erfolgte unter Berücksichtigung dieser für induktive Ladesysteme spezifischen Sicherheitsanforderungen. Im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung in Anlehnung an DIN EN ISO 12100 wurden Gefährdungen

identifiziert und Risiken bewertet. Wenn erforderlich, wurden zusätzliche technische oder organisatorische Maßnahmen zur Risikominimierung definiert und umgesetzt, bis die Restrisiken als „tolerabel“ eingestuft werden konnten.

Vor der Auslieferung ist eine Prüfung nach DIN EN 61439 „Ortsfeste Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ durchgeführt worden.

Da das System für einen Einsatz im öffentlichen Raum vorzusehen war, erfolgte eine Begutachtung durch eine Prüforganisation mit Ausstellung eines entsprechenden Prüfprotokolls. Mit dem Prüfprotokoll hat der Fahrzeughalter (VW-Nutzfahrzeuge) bei der zuständigen Zulassungsstelle die Eintragung des induktiven Ladesystems in die Fahrzeugpapiere veranlasst.

Datenaustausch zwischen Fahrzeug und Primäreinheit

Entsprechend der IEC 61980-Normenreihe dürfen sicherheitsrelevante Ablaufschritte eines induktiven Ladeprozesses (z. B. „Alignment Check“, „Start-, Perform- und Stop Power Transfer“) nur erfolgreich abgearbeitet werden, wenn eine bidirektionale Drahtloskommunikation (WLAN → „Command & Control Communication“) zwischen der Primär- und der Sekundäreinheit besteht und festgelegte Parameter erfolgreich ausgetauscht worden sind. Sollte diese Kommunikationsverbindung abbrechen, ist ein Ladeprozess nach festgelegten Vorgaben (z. B. Time Outs → siehe auch ISO15118) zu unterbrechen. Es ist sicherzustellen, dass die Ladeleistung schnell auf ein niedriges Niveau reduziert wird (Einhaltung festgelegter Magnetfeldgrenzwerte) und weiter auf den Wert Null reduziert wird. Der Drahtloskommunikationsverbindung darf keinerlei Sicherheitsrelevanz zukommen. Folglich müssen die Primär- und die Sekundäreinheit für eigenständiges und sicheres Herunterfahren eines Ladeprozesses ausgelegt sein. Mit der Entscheidung, im Primärteil einen Gyrator zwischen Ausgangstransformator und serieller Kompensation zu verbauen (siehe auch Arbeitspaket 1.1) wurde bereits einigen grundlegenden Sicherheitsanforderungen entsprochen:

- Der Gyrator mit seiner Filterwirkung sorgt bereits dafür, dass nicht nur der Primärspulenstrom nahezu sinusförmig ist (Wirkung der Kompensation), sondern auch die an der Primärspulenwicklung anliegende Spannung annähernd sinusförmig ist. Es ist zu erwarten, dass dies zur Reduzierung von Störabstrahlungen (EMV) führen wird.
- Mit dem Gyrator und den beiden Kompensationsnetzwerken im Leistungspfad ließ sich ein Spannungsquellenverhalten am Eingang des Gleichrichters realisieren, womit der Wechselrichter bei einem eventuellen Lastabwurf (Batterieabschaltung seitens des Fahrzeugs) im Leerlauf betrieben wird. Um zu vermeiden, dass der Primärspulenstrom und die Spannung am Fahrzeugzwischenkreis bei Lastabwurf zu stark ansteigen, wurde wechselrichterseitig eine Lastabwurferkennung implementiert.
- Für den Fall des Auftretens eines Batteriekurzschlusses während des Ladens würde der Wechselrichterstrom ansteigen. Um den Wechselrichter und weitere Bestandteile des Leistungspfads vor Überlastung zu schützen, wurde eine wechselrichterseitige,

hardwarebasierte Überstromerkennung bzw. -abschaltung implementiert. Diese wird redundant unterstützt von der zusätzlichen Erkennung eines übermäßigen Stromanstiegs („di/dt-Erkennung). Wird ein übermäßiger Stromanstieg im Wechselrichter erkannt, folgt seine Abschaltung.

Der Nutzer des Systems wünschte eine möglichst einfache Fahrzeugpositionierungsassistenz. Deshalb wurden zwei Barrieren im Bereich der Ladeposition verbaut und der Fahrzeugführer ist aufgefordert vor Ladebeginn mit beiden Vorderrädern an die Barrieren, möglichst symmetrisch (quer zur Fahrtrichtung) heranzufahren. Bei Beachtung dieses Vorgehens wird eine ausreichend genaue Positionierung der beiden Spulen zueinander gewährleistet. Sollte der Nutzer/ Fahrer dieser Vorgehensweise jedoch nicht folgen, kann grundsätzlich nicht ausgeschlossen werden, dass magnetische Felder außerhalb des durch das Fahrzeug abgedeckten Spulen/ Straßenbereichs die zulässigen Magnetfeldgrenzwerte (EMF) überschreiten. Um dies zu vermeiden wird vor einem Ladebeginn die Kopplung zwischen den beiden Spulen gemessen. Hierzu wird nach Ladeanforderung ein geringer Strom eingepreßt (→ *Low Power Excitation* mit Einhaltung von Magnetfeldgrenzwerten auf der Primärspule).

Analyse der Sicherheitsanforderungen und Ableitung der nötigen Maßnahmen

Zusammengefasst ergeben sich folgende Maßnahmen zur Umsetzung des Sicherheitskonzepts:

- Der Kommunikation zwischen Fahrzeug- und Straßenseite wird keinerlei Sicherheitsrelevanz zugeordnet. Sicherheitsfunktionen wie beispielsweise die Schnellabschaltung im Fehlerfall werden daher nicht über die Kommunikationsstrecke realisiert.
- Etwaige Baugruppen zur Erkennung von Fremdkörpern und Lebewesen werden von INTIS geliefert oder als betrieblich/ organisatorische Maßnahmen festgeschrieben. Diesbezügliche mechanische und elektrische Schnittstellen wurden vereinbart und sind in der Entwicklung der sekundären Leistungselektronik berücksichtigt worden.
- Obwohl der Ladestandort in Berlin mit einer mechanischen Positionierhilfe in Form von Anfahrschwellen ausgestattet werden wird, erhält das induktive Ladesystem ein elektronisches System zur Bestimmung einer geeigneten Spulenüberlappung vor Ladebeginn. Hierfür kommt ein bei INTIS entwickeltes Positionierungsassistenzsystem zum Einsatz. Die Einbauorte der diesbezüglich fahrzeugeitig unterzubringenden Sensoren wurden festgeschrieben.

Das Gefährdungspotenzial für Lebewesen und Fremdkörper im näheren Spulenumfeld bzw. im Luftspalt wurde analysiert und insgesamt als tolerabel eingestuft.

Es wurden verschiedene mögliche Verfahren zur Erkennung von Lebewesen im näheren Spulenumfeld untersucht. Letztlich kam ein Verfahren zum Einsatz, das von INTIS entwickelt wurde und auf der Dämpfung von Hochfrequenzsignalen im SRD-Frequenzbereich von 868 MHz durch den Eintritt von Lebewesen in das nähere Spulenumfeld basiert.

Es wurden verschiedene mögliche Verfahren zur Erkennung von Fremdkörpern im Luftspalt zwischen den Spulen untersucht. Für die im Rahmen des Projekts neu entwickelte zirkulare Spulentopologie wurde in der Projektlaufzeit keines der untersuchten Verfahren als ausreichend robust eingestuft. Jedoch kann das System zur Lebewesenerkennung in gewissem, aber eingeschränktem Umfang auch Fremdkörper erkennen.

Mit Sicht auf die diesbezüglich erreichten Projektergebnisse und umgesetzten Verfahren wurde festgelegt, dass die technischen Maßnahmen durch betriebliche Maßnahmen zur Vermeidung übermäßiger Erwärmung von Fremdkörpern und zur Vermeidung des Eindringens von Lebewesen in Bereiche mit magnetischen Flussdichten oberhalb 27 μT zu ergänzen sind, was mit Sicht auf die Gegebenheiten an den im Projekt genutzten Standorten gerechtfertigt werden kann. Das Bedienpersonal ist geschult (eingewiesenes Personal) und die Bedienungsleitung ist im Fahrzeug hinterlegt worden.

Erprobung des Sicherheitskonzepts

Im Rahmen der Bearbeitung des Arbeitspakets 3.2 erfolgte die umfassende Überprüfung aller Sicherheitsfunktionen anhand des aufgestellten Prüfplans. Prüfungen verliefen allesamt positiv, sodass das Sicherheitskonzept als hinreichend entwickelt und vollständig implementiert angesehen werden kann. Detaillierte Ausführungen zu den getätigten Prüfungen finden sich im entsprechenden Abschnitt.

Zusätzlich wurde zusammen mit der INTIS GmbH ein umfangreicher Prüfplan erstellt, in dem mögliche Fehlerfälle definiert wurden. Dieser Prüfplan wurde dann im Zuge des AP 1.8 am fertig ausgerüsteten Fahrzeug und der Primärstation abgearbeitet. Durch dieses Vorgehen konnte die Funktionsfähigkeit der zuvor entwickelten Sicherheitsmechanismen überprüft werden.

Das Verhalten der Software im Fehlerfall wurde ebenfalls überprüft und durch die Projektpartner für die jeweiligen Komponenten im Rahmen der mehrtätigen Inbetriebnahmetests (AP 1.8) bei Bedarf optimiert.

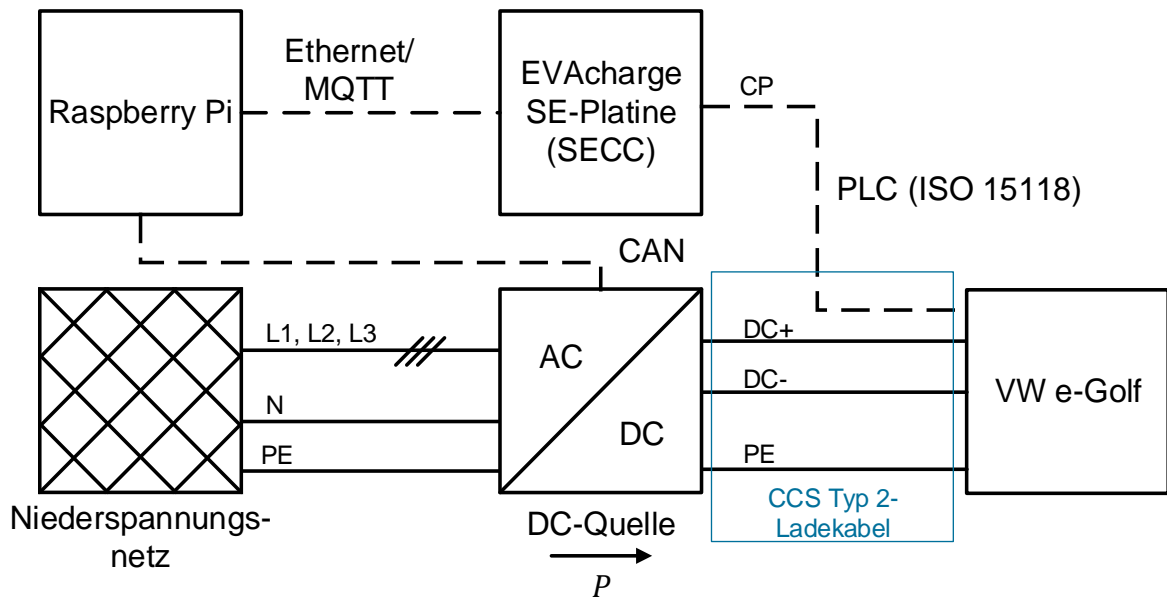
2.1.5 Anbindung an Fahrzeug-Systemarchitektur, Kommunikation und Steuerungsabläufe (AP 1.5)

Die Kommunikation zwischen der Primär- und der Sekundärseite des induktiven Ladesystems wird in Anlehnung an die Norm ISO 15118-8, welche Anforderungen an die Bitübertragungsschicht und die Sicherungsschicht für drahtlose Kommunikation beim Laden von Elektrofahrzeugen stellt [DIN21], über WLAN realisiert. Abweichend von der Norm wird jedoch ausschließlich das 2,4 GHz-Frequenzband genutzt. Auf die genutzten Use-Cases und die Daten, welche innerhalb eines induktiven Ladevorgangs ausgetauscht werden, wird im Rahmen des ganzheitlichen Kommunikationssystems im folgenden Abschnitt eingegangen.

Die Sekundärseite des induktiven Ladesystems ist sowohl leistungstechnisch als auch kommunikativ über die CCS-Schnittstelle an die Systemarchitektur des e-Crafter angebunden. Dies ist erforderlich, weil ein e-Crafter im Serienzustand kein induktives Laden unterstützt.

Folglich wird dem e-Crafter bei der Durchführung eines induktiven Ladevorgangs vermittelt, dass ein DC-Ladevorgang stattfindet. Die Ladekommunikation mit dem e-Crafter erfolgt nach der Norm ISO 15118-2, welche Anforderungen an das Netzwerk- und Anwendungsprotokoll der Kommunikationsschnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und Ladepunkt stellt [DIN16]. Hierfür wird ein handelsüblicher Supply Equipment Communication Controller (SECC) für DC-Ladepunkte genutzt. Speziell kommt eine EVAcharge SE der Firma chargebyte GmbH zum Einsatz [INT20].

Das entwickelte Konzept für die Kommunikation zum Fahrzeug via CCS wurde mittels DC-Laden getestet. Hierfür wurde der Aufbau in Abbildung 2-36 genutzt. Als Fahrzeug dient im Aufbau ein VW e-Golf. Das entwickelte Programm für die übergeordnete Ladesteuerung, das im induktiven Ladesystem zum Einsatz kommt, wird für die Tests in einem Raspberry Pi implementiert. Der Datenaustausch mit dem SECC erfolgt mittels des Kommunikationsprotokolls MQTT. Als Ladegerät wird in dem Aufbau ein DC-Labornetzteil mit einer Leistung von 10 kW verwendet. Die Steuerbefehle für das Netzteil, speziell die Einstellung der Ladespannung und des Ladestroms, erfolgt via CAN-Bus. Die Verbindung des Labornetzteils und der EVAcharge SE mit dem e-Golf wird mit einem CCS Typ 2-Ladekabel realisiert. Der Control Pilot (CP) ist dabei die kommunikative Verbindung, mittels der die Powerline Communication (PLC) nach ISO 15118 erfolgt. Mit diesem Aufbau wurden mehrere Iterationsschleifen durchgeführt, um die CCS-Ladesteuerung für das induktive Ladesystem zu optimieren. Auf die Einbindung der CCS-Kommunikation in das Gesamtsystem wird im folgenden Abschnitt eingegangen.



Legende:

- Signalleitung
- Energieleitung

Abbildung 2-36: Laboraufbau zum Testen der Kommunikation zum Fahrzeug mittels CCS

Da beim induktiven Laden der Leistungspfad der Sekundärseite mit dem CCS-Leistungspfad verbunden werden muss, wird wie in den vorigen Abschnitten bereits erläutert eine Umschaltfunktion mittels zusätzlicher HV-DC-Schütze realisiert. Hierfür wurde der CCS-Leistungspfad zwischen dem CCS-Fahrzeuginlet und dem DC-Schütz des Fahrzeugs, welches die Fahrzeugbatterie während eines Ladevorgangs zuschaltet, aufgetrennt. Vor der Batterie im CCS-Leistungspfad besitzt jedes Elektrofahrzeug ein DC-Schütz, das das Fahrzeug erst bei Initialisierung eines DC-Ladevorgangs per Ladekommunikation über die CP-Leitung zuschaltet. Das Umschaltsystem für das induktive Ladesystem hat drei Schaltpositionen für den Leistungspfad. Im Grundzustand ist der CCS-Leistungspfad zum Fahrzeug offen. Dies ist der Fall, wenn die Steuerelektronik des induktiven Ladesystems ausgeschaltet ist. Wenn die Steuerelektronik angeschaltet ist, wird das CCS-Inlet des Fahrzeugs mit dem CCS-Leistungspfad zur Fahrzeugbatterie verbunden. Wenn ein induktiver Ladevorgang initiiert wird, erfolgt eine Umschaltung, sodass der Leistungspfad der Sekundärseite des induktiven Ladesystems mit dem CCS-Leistungspfad zur Batterie verbunden ist. Der e-Crafter schaltet das induktive Ladesystem erst auf die Batterie, wenn mit der EVCharge SE-Platine ein Ladevorgang eingeleitet wird. Die Trennung des CCS-Inlets während eines induktiven Ladevorgangs ist aus sicherheitstechnischen Aspekten erforderlich, damit am CCS-Fahrzeuginlet während eines induktiven Ladevorgangs keine Spannung anliegt. Die Umschaltfunktion ermöglicht, dass mit dem e-Crafter weiterhin auch konduktives DC-Laden umsetzbar ist. Da in den Leistungspfad für AC-Laden nicht eingegriffen wird, ist konduktives AC-Laden ebenso weiterhin möglich.

Die fahrzeugseitige Kommunikationstechnik des induktiven Ladesystems schaltet sich nach einer Wartezeit von 10 min, in der kein induktiver Ladevorgang gestartet wird und die Zündung abgeschaltet ist, ab. Dies erfolgt durch eine Trennung von der 12 V-Versorgung des e-Crafter. Dies wird umgesetzt, um die 12 V-Batterie des e-Crafter bei abgeschalteter Zündung ohne Ladevorgang nicht zu belasten. Um bei einem konduktiven DC-Ladevorgang zu vermeiden, dass die Steuerelektronik abgeschaltet wird und das CCS-Inlet vom Leistungspfad zur Fahrzeugbatterie getrennt wird, ist eine Erkennung des DC-Ladevorgangs erforderlich. Für diese Funktion wurde eine Platine entwickelt, welche durch Messung der Spannung der CP-Leitung die Ladezustände erkennt und somit auch, ob ein Ladevorgang vorliegt. Die möglichen CP-Status sind im Anhang B der Norm IEC 61851-1 beschrieben [DIN19]. Sobald ein DC-Ladevorgang erkannt wird, erfolgt keine Abschaltung der Steuerelektronik. Bei einem AC-Ladevorgang wird die Steuerelektronik abgeschaltet, weil keine Eingriffe durch das entwickelte System erforderlich sind. Die Unterscheidung zwischen einem DC- und AC-Ladevorgang erfolgt anhand des Tastgrades des PWM-Signals der CP-Leitung während eines Ladevorgangs. Abbildung 2-37 zeigt den Schaltplan und Abbildung 2-38 das Layout der entwickelten Platine, welche im Folgenden als CP-Platine bezeichnet wird.

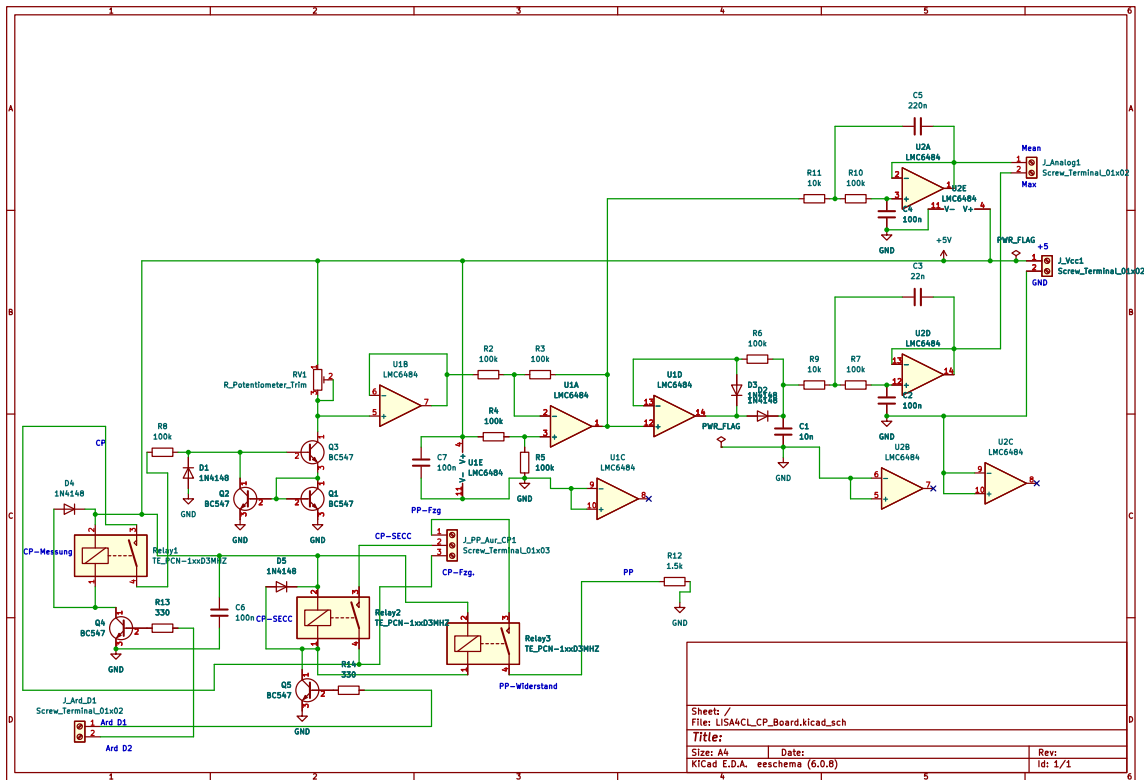
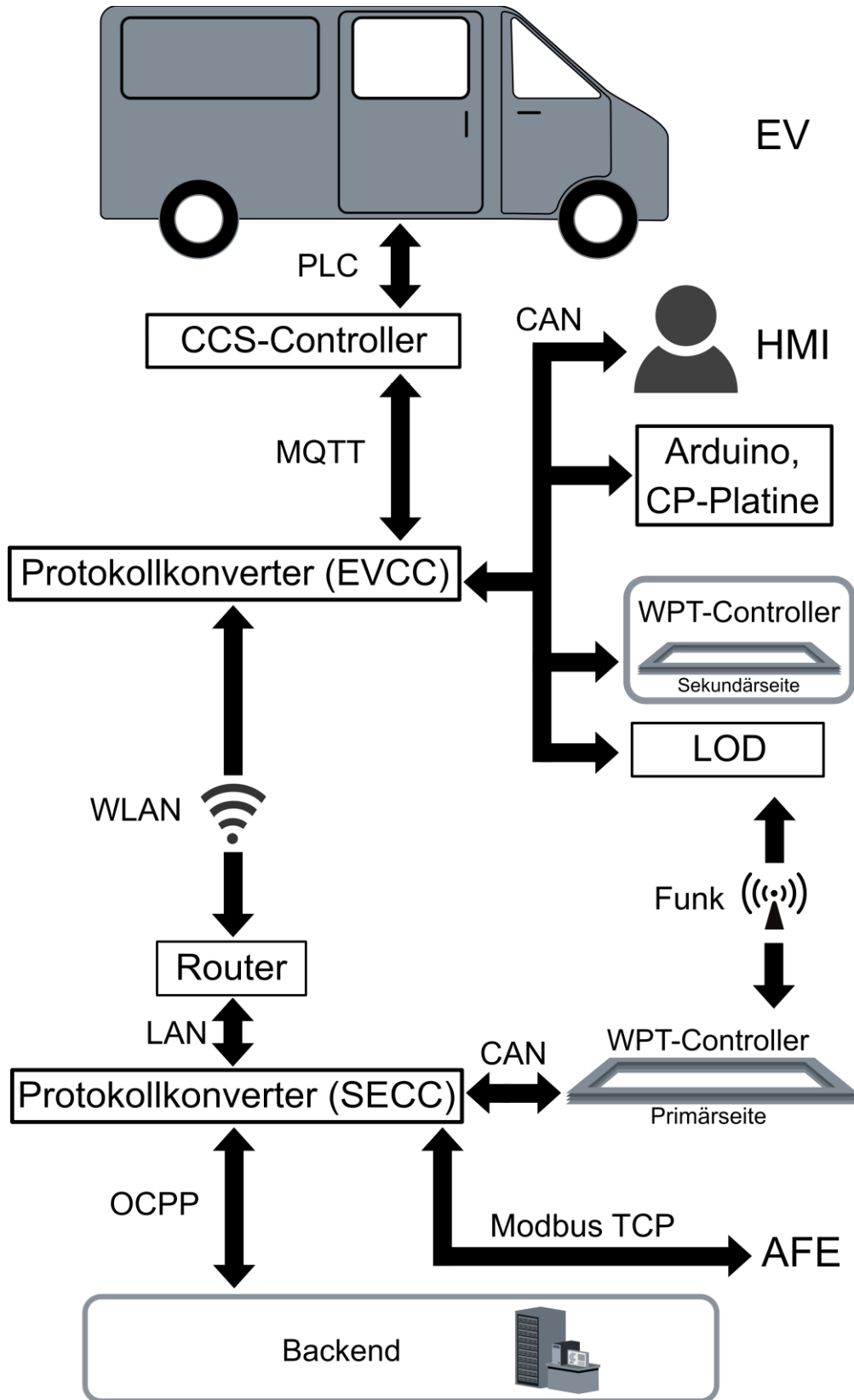


Abbildung 2-37: Schaltplan CP-Platine

Abbildung 2-39 zeigt die aufgebaute CP-Platine. Mit der CP-Platine wird auch die EVCharge SE-Platine während eines induktiven Ladevorgangs auf die CP-Leitung des e-Crafter geschaltet, um die kommunikative Verbindung zum Fahrzeug aufzubauen. Weiterhin schaltet die CP-Platine zeitgleich einen Widerstand von 1,5 kΩ zwischen der Proximity Pilot (PP)-Leitung des e-Crafter und PE. Dies aktiviert die Steckererkennung des e-Crafter und resultiert in der Verriegelung des CCS-Inlets. Der Widerstand entspricht dem, der in einem CCS-Stecker integriert ist. Ohne die Verriegelung des CCS-Inlets ermöglicht der e-Crafter keinen Ladevorgang. Die Versorgung und Steuerung der CP-Platine sowie die Auswertung der CP-Signale der Platine erfolgt mit einem Arduino Uno Rev3.

Controller bezeichnet wird, per MQTT. Der CCS-Controller ist die kommunikative Schnittstelle zum e-Crafter. Über einen CAN-Bus kommuniziert der EVCC mit dem sekundärseitigen WPT-Controller, der im vorigen Abschnitt vorgestellten CP-Platine bzw. dem vorgelagerten Arduino, und einem HMI. Der Arduino wird mittels des Erweiterungsboards *Analog Devices EVAL-ADM3055E-ARDZ* mit dem CAN-Bus verbunden. Das Programm für den Arduino zur Umsetzung der Funktionen aus dem vorigen Abschnitt ist in der Programmiersprache C umgesetzt. Der sekundärseitige WPT-Controller realisiert die Steuerung und Regelung des Gleichrichters im Fahrzeug. Ein LOD-Controller für die Objekterkennung ist ebenfalls an den CAN-Bus angeschlossen.

Der EVCC verbindet sich, wie im vorigen Abschnitt erwähnt, in Anlehnung an die ISO 15118-8 per WLAN als Client mit der Primärseite. Als Access Point dient auf der Primärseite ein Router für industrielle Anwendungen. Es wird ein Teltonika RUT950 eingesetzt. Über den Router kommuniziert der EVCC mit dem SECC. Die ausgetauschten Daten zwischen EVCC und SECC sind an die ISO 15118-20 [DIN22b], die verglichen zur ISO 15118-2 auch Kommunikation für induktives Laden beinhaltet, und der IEC 61980-2 angelehnt. Abweichend von der ISO 15118, die Datenaustausch in XML-Format beschreibt, werden die Daten mittels MQTT in JSON-Format ausgetauscht. Das XML-Format war hinsichtlich Komplexität und Umfang im Rahmen des Projekts nicht realisierbar. Der SECC ist mit einem Backend verbunden. Zusätzlich steuert er das AFE und kommuniziert über einen CAN-Bus mit dem primärseitigen WPT-Controller. Der primärseitige WPT-Controller setzt die Steuerung sowie die Regelung des Wechselrichters und die Objekterkennung um. Für die Objekterkennung steht ein separater Funkpfad zur Verfügung. Der sekundärseitige LOD-Controller ist über diesen mit dem primärseitigen WPT-Controller verbunden. Wenn während eines Ladevorgangs ein Objekt zwischen den Ladeplatten erkannt wird, erfolgt zunächst eine Warnung durch primärseitigen WPT-Controller. Nach einer Toleranzzeit wird der Ladevorgang beendet, wenn das Objekt sich nicht aus dem Bereich der Ladeplatten entfernt.



@elenia, TU Braunschweig

Abbildung 2-40: Kommunikationskonzept für das Gesamtsystem

Über das HMI (siehe Abbildung 2-35) kann ein induktiver Ladevorgang gestartet werden, sobald sich der e-Crafter in Reichweite der Primärseite befindet. Weiterhin enthält das HMI einen Positionsassistenten. Darüber hinaus zeigt das HMI die Ladedaten (aktueller SoC, Ladeleistung, verbleibende Ladezeit etc.) und im Falle eines Ladeabbruchs Informationen zur Ursache. Weiterhin kann über das HMI ein Ladevorgang abgebrochen werden.

Das induktive Ladesystem ist primärseitig via OCPP 1.6 JSON mit dem EAAZE-Backend verbunden. Abbildung 2-41 zeigt den induktiven Ladepunkt in der Oberfläche des EAAZE-Backends. Die vom SECC an das Backend gesendeten Ladedaten werden aufgezeichnet. Abbildung 2-42 zeigt beispielhaft einen aufgezeichneten Ladevorgang. Es ist zu erkennen, dass bei diesem Ladevorgang die Fahrzeugbatterie bei Ladestart bereits einen hohen SoC hatte, weil nach kurzer Zeit die Ladeleistung reduziert wird. Die Abbildung zeigt folglich den Leistungsverlauf der Konstantspannungsphase des CCCV-Ladeverfahrens.

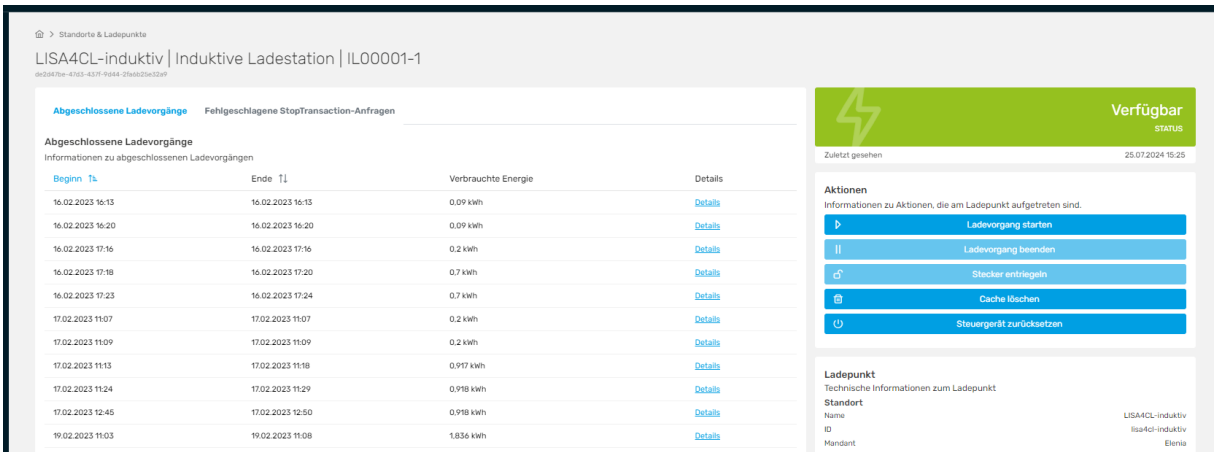


Abbildung 2-41: EAAZE-Backendoberfläche für das induktive Ladesystem

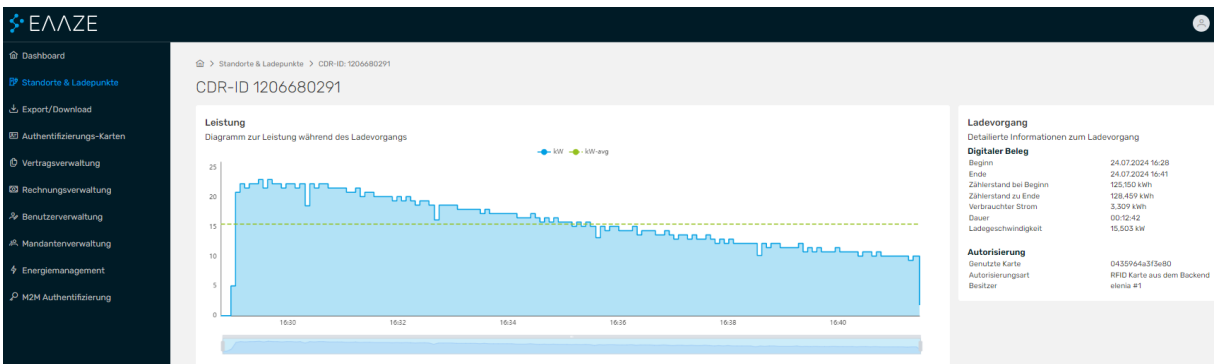


Abbildung 2-42: Aufgezeichneter Ladevorgang im EAAZE-Backend

Neben der Darstellung im Backend werden auch Daten in einem Webserver, den der primärseitige WPT-Controller erzeugt, angezeigt. Über den Webserver können vom aktuellen Ladevorgang die Ladedaten sowie Errorcodes im Fall eines Fehlers abgerufen werden. Abbildung 2-43 zeigt die Weboberfläche während eines Ladevorgangs.

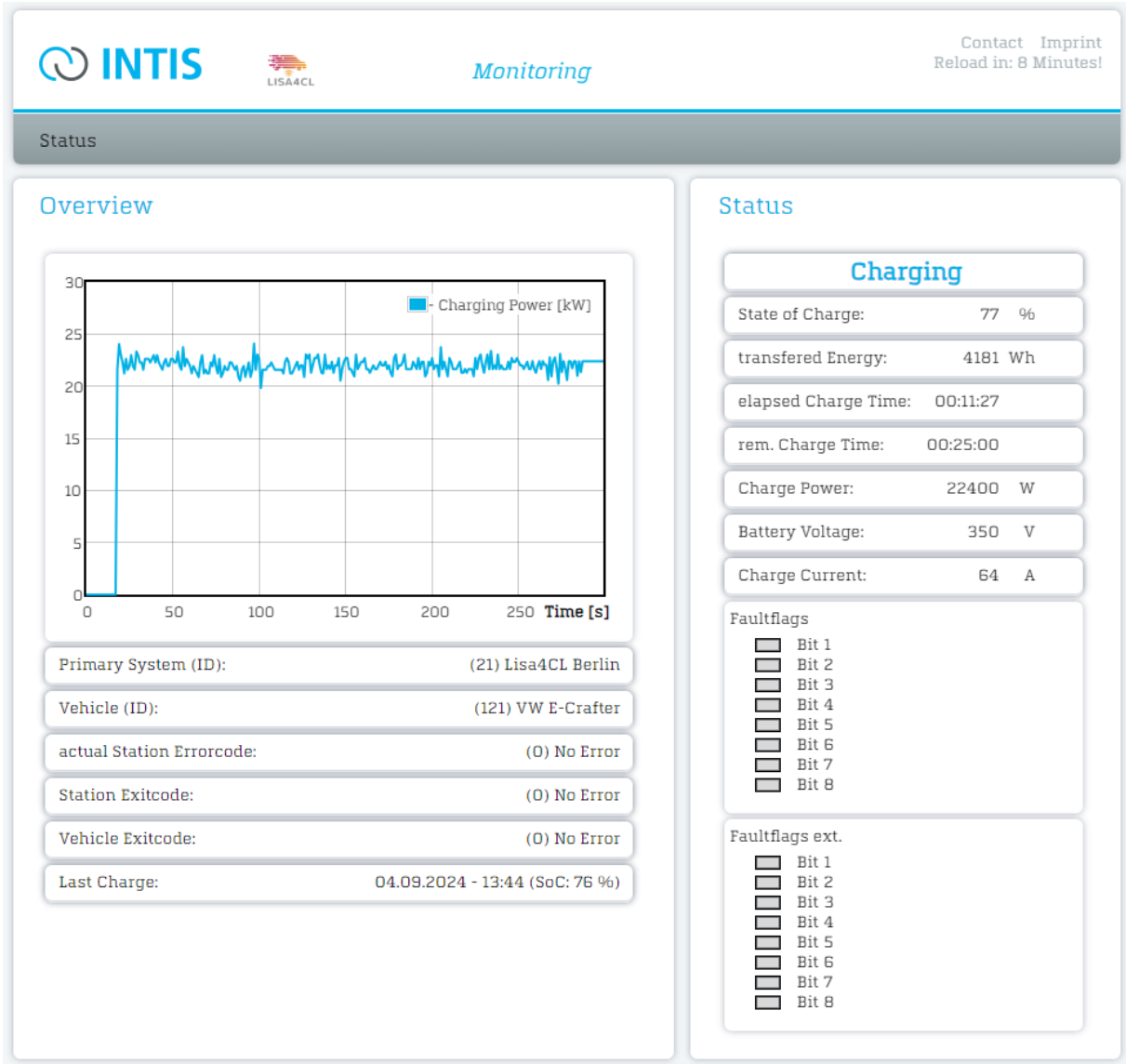


Abbildung 2-43: Weboberfläche des primärseitigen WPT-Controllers

Für den kommunikativen Ablauf eines induktiven Ladevorgangs wurde ein Zustandsautomat erstellt, der auf der ISO 15118-20 und der IEC 61980-2 basiert. Der Ablaufplan ist in einzelne Ladephasen unterteilt und beschreibt, welche Nachrichten und Daten zwischen den verschiedenen Steuergeräten ausgetauscht werden. Vor diesen Hintergrund wurde ein Ablaufdiagramm für die gesamte Kommunikation sowie Subdiagramme für die einzelnen Ladephasen erstellt. Zusätzlich ist der Ablauf im Falle von Fehlern enthalten. Hierfür wurde eine Liste mit möglichen Fehlern erstellt und für jeden Fehler ein Ablauf und Maßnahmen entwickelt.

Abbildung 2-44 zeigt die Ladephasen des Ablaufplans. Diese orientieren sich an der IEC 61980-2. SECC und EVCC tauschen Daten in den einzelnen Ladephasen per Request-Response aus, wobei der EVCC die Anfrage stellt und der SECC daraufhin die Antwort sendet. Für die Umsetzung der Ladephasen tauschen SECC und EVCC Daten und Befehle mit den anderen Steuergeräten aus. Die Dummy-Phasen sind Platzhalter für Weiterentwicklungen des Systems. Im aktuellen System erfolgt keine Feinpositionierung, weil die Positionierung

mechanisch durch Anfahrschwellen unterstützt wird. Da ein induktives Ladesystem im privaten Bereich umgesetzt wird, erfolgt keine Autorisierung und auch keine Bereitstellung zusätzlicher Services. Ein Alignment-Check wird ebenfalls nicht durchgeführt. In den Dummy-Phasen werden ausschließlich die Parameter der Norm als leere Werte per Request-Response durch den EVCC und SECC ausgetauscht. Es erfolgt in diesen Phasen folglich auch kein Datenaustausch mit den anderen Steuergeräten. Eine Fehlerüberwachung erfolgt kontinuierlich. Wenn während einer Ladephase ein Fehler auftritt, wird ein Ladevorgang beendet. Wenn eine Abweichung von dem Normzustand auftritt, die jedoch noch keinen Abbruch des Ladevorgangs erfordert, werden eine Warnung versendet und Maßnahmen ergriffen. Ein Beispiel ist eine unzulässige Temperaturerhöhung während des Ladens, der durch eine Reduzierung der Ladeleistung entgegengewirkt wird. Erst wenn die Temperatur eine kritische Grenze überschreitet, wird ein Fehlerfall eingeleitet und der Ladevorgang beendet. Eine Übersicht der Fehlerkategorien ist in Abschnitt 2.1.8 dargestellt. Innerhalb jeder Ladephase aus Abbildung 2-44 ist im Zustandsautomaten der Datenaustausch der einzelnen Steuergeräte definiert. Abbildung 2-45 zeigt dies beispielhaft für die Ladephase *Final Compatibility Check*. Die anderen Ladephasen sind vom Aufbau ähnlich. Sie werden der Übersichtlichkeit halber nicht dargestellt.

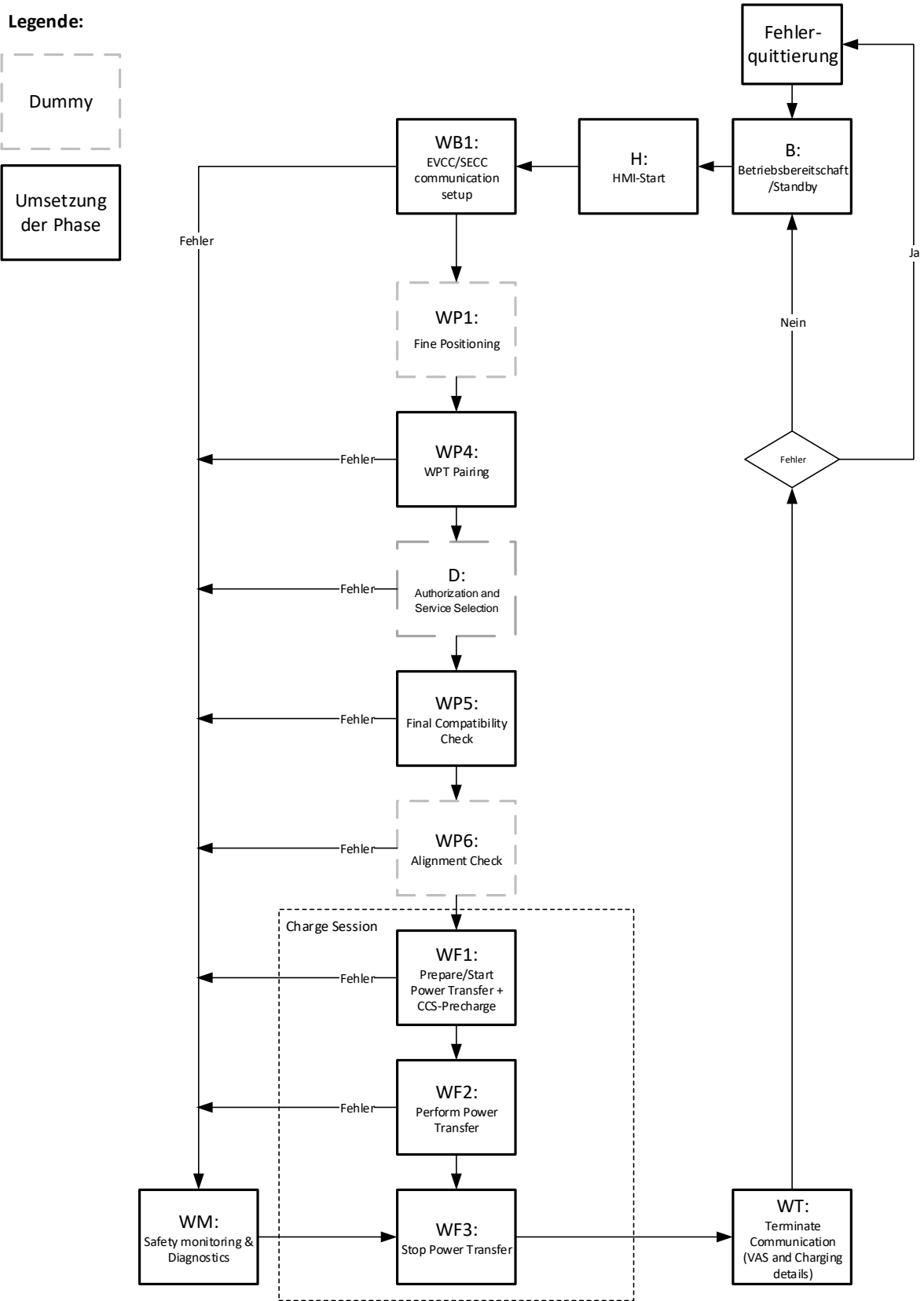


Abbildung 2-44: Ablaufplan Ladevorgang in Anlehnung an [DIN22a]

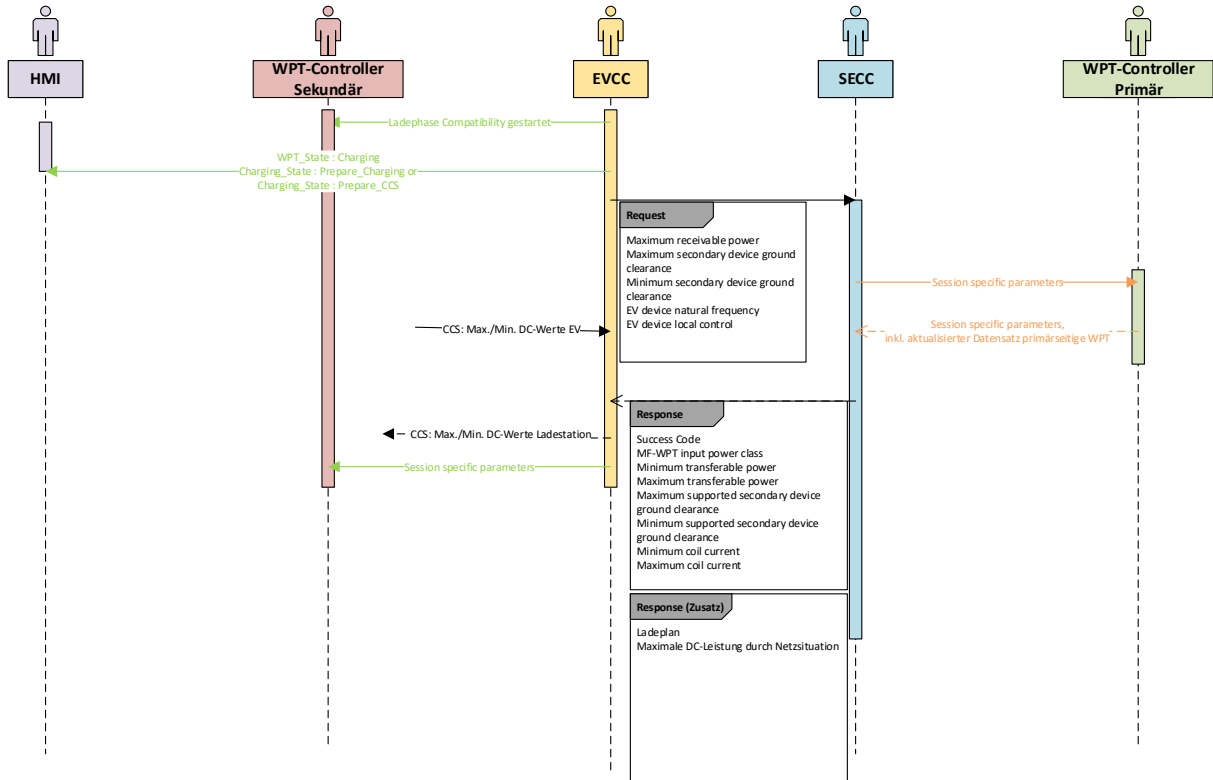


Abbildung 2-45: Ablauf in der Ladephase Final Compatibility Check

Da bei den CAN-Bussen der Primär- und Sekundärseite mehrere Komponenten der Projektpartner miteinander interagieren, wurde für die Kommunikation eine Spezifikation erarbeitet. Das Ergebnis ist eine CAN-Datenbank im DBC-Dateiformat mit allen Nachrichten der einzelnen Geräte und den enthaltenen Daten. Die CAN-Datenbank ist einerseits unterteilt in die verschiedenen CAN-Nachrichten. Die Untergliederung der Nachrichten erfolgt anhand der CAN-ID und der Benennung. Abbildung 2-46 zeigt beispielhaft eine Nachricht, die der SECC an den primärseitigen WPT-Controller sendet. Es ist die Aufteilung der Nachricht dargestellt mit den einzelnen Daten wie der fahrzeugseitige Ladestrom und die fahrzeugseitige Ladespannung. Der primärseitige WPT-Controller nutzt die Istwerte des Ladestroms und der Ladespannung für die Regelung des Wechselrichters. Der SECC erhält die Istwerte vom EVCC, der sie vom sekundärseitigen WPT-Controller abfragt. Dieses Beispiel verdeutlicht die Vernetzung der einzelnen Steuergeräte. Für bestimmte Daten einer Nachricht sind in der Datenbank auch Werte definiert. Dies ist in Abbildung 2-47 beispielhaft für das WPTCP_Req_CMD-Byte der Nachricht aus Abbildung 2-46 dargestellt. Über das WPTCP_Req_CMD-Byte steuert der SECC den Status des Wechselrichters.

Name	Message	Multiplexing/...	Startbit	Leng...	Byte Order	Value Type	Initial Value	Factor	Offset	Mini...	Maxi...	Unit
WPTCP_Req_CMD	WPT_Controller_PRI_Request	-	0	8	Intel	Unsigned	0	1	0	0	255	
WPTCP_Req_Voltage_SP	WPT_Controller_PRI_Request	-	8	16	Intel	Unsigned	0	1	0	0	65535	V
WPTCP_Req_Current_SP	WPT_Controller_PRI_Request	-	24	8	Intel	Unsigned	0	1	0	0	255	A
WPTCP_Req_Act_Voltage	WPT_Controller_PRI_Request	-	32	16	Intel	Unsigned	0	1	0	0	65535	V
WPTCP_Req_Act_Current	WPT_Controller_PRI_Request	-	48	8	Intel	Unsigned	0	1	0	0	255	A
WPTCP_Req_IC	WPT_Controller_PRI_Request	-	56	8	Intel	Unsigned	0	1	0	0	255	

Abbildung 2-46: Eine CAN-Nachricht der CAN-Datenbank

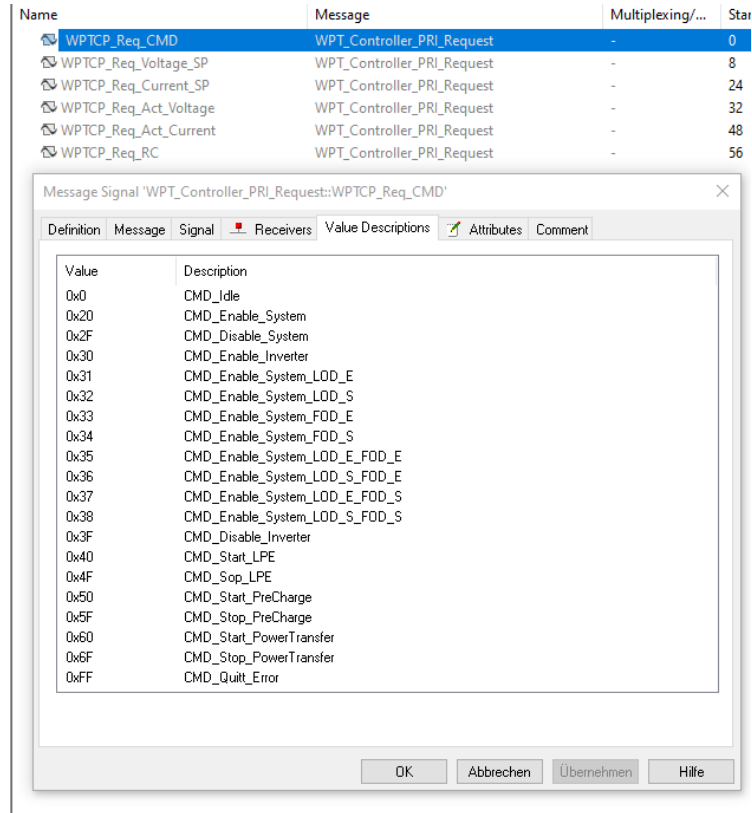


Abbildung 2-47: WPTCP_Req_CMD der CAN-Nachricht mit der ID 0x0

Weiterhin ist die CAN-Datenbank nach den einzelnen Steuergeräten unterteilt. Dies sind die Network nodes bzw. ECUs. Die Network nodes enthalten die Nachrichten, welche die Steuergeräte senden. Dies ist in Abbildung 2-48 beispielhaft für den SECC gezeigt.

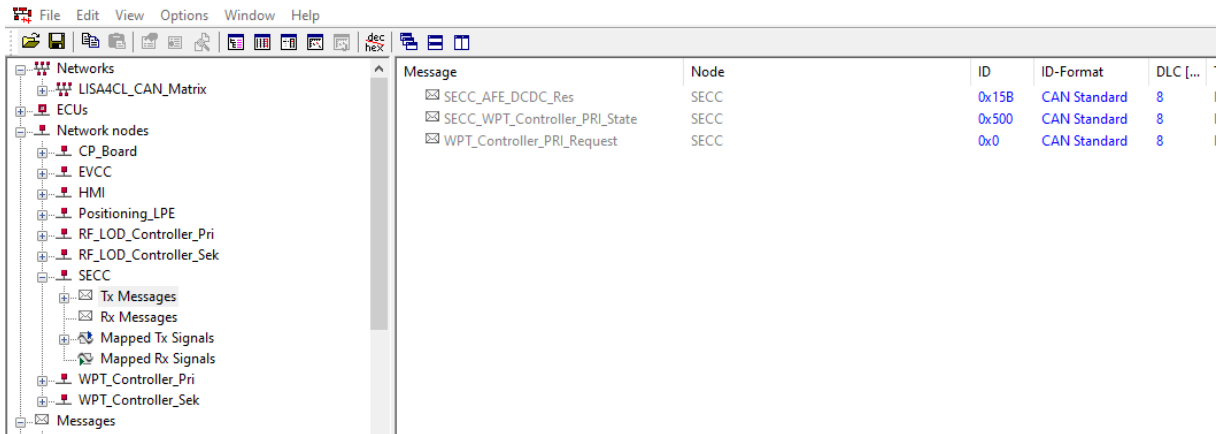


Abbildung 2-48: Steuergerät SECC in der CAN-Datenbank

Die entwickelte Software für den EVCC und den SECC realisieren den Kommunikations- und Steuerablauf in den einzelnen Ladephasen und den Datenaustausch mit den verschiedenen Komponenten gemäß des Zustandsautomaten. Die Umsetzung erfolgt objektorientiert mit der Programmiersprache Python. Dies erleichtert die Wartung der Software. Für die einzelnen Aufgaben wie z. B. die MQTT-Kommunikation mit dem CCS-Controller wurde jeweils ein Programmmodul erstellt. Dies ermöglicht, dass die einzelnen Programmteile separat getestet

und optimiert werden können. Im ersten Schritt wurden die einzelnen Module separat auf ihre Funktionsfähigkeit getestet. Auf die Tests im Gesamtsystem wird in Abschnitt 2.1.8 eingegangen. Das Modul des SECC für die Backendanbindung wurde zunächst mit einer Entwicklungsumgebung, die das EAAZE-Backend nachbildet, getestet. Nach erfolgreichem Test der Verbindung zum Test-Backend erfolgte die Erprobung am EAAZE-Backend. Weiterhin werden von SECC und EVCC diverse Logdateien während des Betriebs des Systems erstellt. Dies beinhaltet das Logging des aktuellen Status des Ladesystems inklusive der Spezifizierung von Warnungen und Errors im Fehlerfall. Zusätzlich wird der CAN-Bus geloggt. Die CAN-Logs beinhalten auch die DC-Ladedaten und den SoC. Der SoC stammt vom e-Crafter, der diesen Wert über PLC an den CCS-Controller sendet.

2.1.7 Mechanische Integrationsuntersuchungen und Einbau der Sekundärladeeinheiten in die Fahrzeuge (AP 1.7)

Die mechanischen Integrationsuntersuchungen waren maßgebliche Vorarbeit für die Integration des Induktivladesystems in das Fahrzeug. Neben der Analyse möglicher Bauräume und der Identifikation der geeigneten elektrischen Schnittstellen sind die mechanischen Gegebenheiten am Fahrzeug (Federwege bei Beladung, Bodenfreiheit des Fahrzeugs, Beschaffenheit des Unterbodens etc.) für die Auslegungen des Ladesystems von elementarer Bedeutung und lieferten wesentliche Beiträge und Randbedingungen für die Entwicklung der Hardwarekomponenten des Ladesystems. Für das Aufstellen der Anforderungen an das Induktivladesystem wurde daher zunächst eine Untersuchung des Fahrzeugs durchgeführt.

Einbauort der Fahrzeugspule und HV-Leitungsführung von der Spule zur Ladeelektronik

Verdeckt durch eine Kunststoff-Unterbodenverkleidung befindet sich die Traktionsbatterie des e-Crafters am Fahrzeugunterboden, oberhalb eines Rahmens mit Querstreben (siehe Abbildung 2-49).



Abbildung 2-49: Unterboden ohne Kunststoff-Verkleidung in Fahrtrichtung gesehen

Die DC-Ladeanschlüsse sind bezogen auf die Fahrtrichtung nach hinten herausgeführt und werden entlang der linken Fahrzeugseite bis hin zur Ladebuchse auf Höhe der Fahrertür geführt. Die Zugänglichkeit des Ladeanschlusses ist für die Integration des Ladesystems von großer Bedeutung, da für die Umschaltfunktion zwischen induktiver und konduktiver Ladefunktion zusätzliche HV-Leitungen in die originale Leitungsführung eingeschleift werden müssen.

Die Fahrzeugspule soll am Rahmen mit den Querstreben (Breite ca. 123 cm) befestigt werden. Dadurch wäre sie auch, bezogen auf die lenkbare Vorderachse, günstig positioniert.

Schirmungsmaßnahmen

Für die gewählte zirkulare Spulentopologie erfolgt der magnetische Rückfluss bekanntermaßen außerhalb des Ferrits der Spulen. Insofern war es wichtig zu analysieren, ob

magnetische Schirmungsmaßnahmen für dieses äußere magnetische Feld erforderlich sind, um z. B. eine übermäßige Erwärmung metallischer Gegenstände im unmittelbaren Umfeld der Fahrzeugspule, einhergehend mit steigenden Übertragungsverlusten, zu vermeiden. Die Notwendigkeit des Anbringens von Schirmblechen wurde erkannt, die Möglichkeiten zur Anbringung von Schirmblechen im Spulenumfeld wurden untersucht.

Ladeelektronik

Für die Installation der zusätzlichen Baugruppen der Sekundärseite (Gleichrichter, Kompensation, Peripherie) kommen mehrere Bauräume in Frage. Am Fahrzeugunterboden befindet sich im Bereich zwischen Hinterachse und dem Fahrzeugheck ein Freiraum zwischen den Längsträgern (siehe Abbildung 2-50), der bezüglich seiner Abmessungen für den Einbau der genannten Baugruppen in einem geeigneten Gehäuse geeignet wäre. Die Bauhöhe des Gehäuses ist dabei so zu begrenzen, dass der Böschungswinkel des Fahrzeugs unverändert bleibt. Die Befestigungsbügel des heckseitigen Trittbretts definieren als niedrigste Punkte am Fahrzeugheck die mögliche Höhe. Mit Sicherheitsabständen zur Unterkante der Bügel weist das Komponentengehäuse eine Höhe von ca. 20 cm auf.

Ein weiterer potentiell möglicher Bauraum befindet sich zwischen Hinterachse und Batteriepaket und ließe im Vergleich zum hinteren Bauraum eine kürzere Leitungsführung zu, ist jedoch aufgrund der dort verlaufenden Feststellbremszüge nur eingeschränkt nutzbar.



Abbildung 2-50: Unterbodenbereich zwischen Hinterachse und Fahrzeugheck

Für den Einbau der Komponenten im Bereich des Fahrzeugunterbodens spricht vor allem, dass das dort verfügbare Volumen ungenutzt ist. Es kommt daher nicht zu einer Reduzierung des Lade- oder Fahrgastraumes des Fahrzeugs. Gegen die Einbauposition spricht die eingeschränkte Zugänglichkeit zu den Komponenten während der Erprobung und im Feldtest, wenn keine Hebebühne oder Grube zur Verfügung steht, sowie die erhöhten Anforderungen an die Gehäusekonstruktion durch die direkten Witterungseinflüsse am Fahrzeugunterboden.

Alternativ können die Sekundärbaugruppen auch im Laderaum des Fahrzeugs verbaut werden. Abbildung 2-51 zeigt die geeignete Einbausituation hinter der Trennwand zum Fahrgastraum. Mittels Durchführungen durch den Fahrzeugboden können die notwendigen Anschlüsse zum Batteriesystem und der Sekundärspule hergestellt werden. Abweichend von der Einbauposition am Fahrzeugunterboden sind die Anforderungen an die Witterungsbeständigkeit im Innenraum reduziert. Allerdings muss das Gehäuse der Sekundärkomponenten so robust ausgeführt werden, dass keine unzulässigen mechanischen Beschädigungen durch das Be- und Entladen des Laderaums oder durch Stoß- und Schwingungsbeanspruchungen während der Fahrt entstehen können.



Abbildung 2-51: Einbauposition der sekundärseitigen Komponenten im Laderaum

Abschließend wurde der Fahrzeugladeraum als Einbauort für die elektronischen Baugruppen des Induktivladegeräts gewählt. Für zukünftige Realisierungen wäre die Positionierung der Komponenten am Fahrzeugunterboden zu bevorzugen, da dann ihre ständige Zugänglichkeit nicht mehr als Entscheidungskriterium im Vordergrund stehen würde.

Untersuchungen zum Luftspalt

Für die Auslegung des Übertragungssystems muss die Bodenfreiheit des Fahrzeugs am vorgesehenen Einbauort der Spule bekannt sein, weil aus dieser Größe zusammen mit den Bauhöhen der Spulen der Luftspalt abgeleitet werden kann. Da der Luftspalt vom Beladungszustand abhängig ist, muss sie an der Einbauposition der Sekundärspule bei leerem Fahrzeug und bei maximal zulässiger Beladung bestimmt werden, wobei die Blattfederung der Hinterachse bei bodenstehendem, leeren Fahrzeug einen Federweg von ca. 10 cm zulässt (siehe Abbildung 2-52).

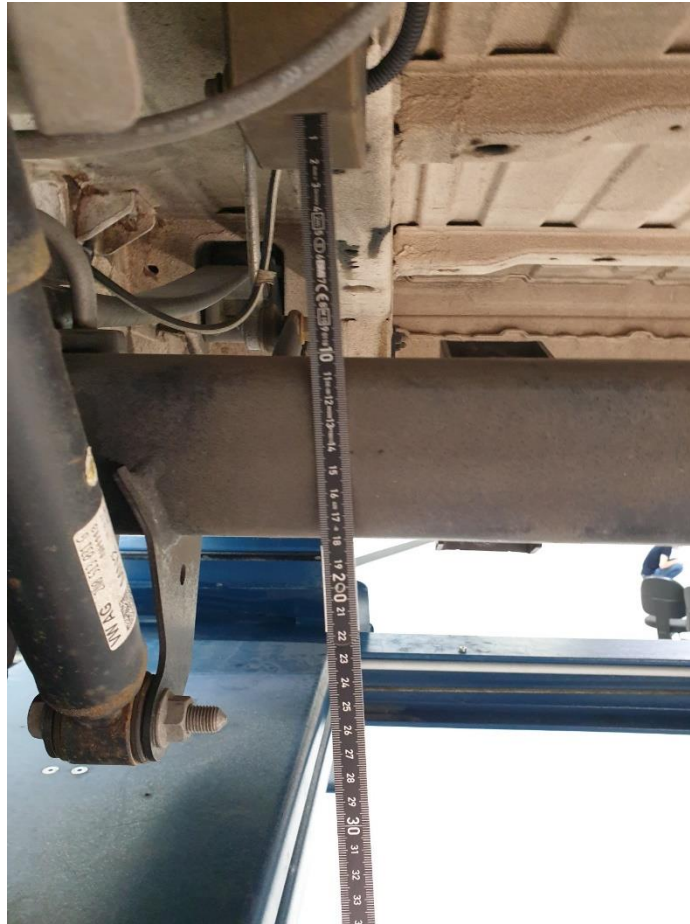


Abbildung 2-52: Maximal möglicher Federweg der Hinterachse bei Fahrzeug ohne Beladung

Die Aussagekraft dieses maximal möglichen Federwegs ist allerdings eingeschränkt, da für den Fahrbetrieb auch bei voller Beladung ausreichend Federwegreserve vorhanden sein muss, sodass das beladungsabhängige Einfedern des Fahrzeugs im Stand aus diesem Maß nicht direkt abgeleitet werden kann. Zusätzlich befindet sich die Sekundärspule nicht unterhalb der Hinterachse, sodass die Luftspaltänderung für die Spule in der Fahrzeugmitte aus der Einfederung von Vor- und Hinterachse resultiert. Zur endgültigen Bestimmung der Luftspaltvariation bei Beladung wurden das Fahrzeug daher gezielt an der Hinterachse beladen und die Veränderung der Bodenfreiheit am vorgesehenen Montagepunkt gemessen. Die tatsächliche Veränderung beträgt an dieser Stelle 2 cm.

Mechanische Integration

Nach der Entwicklung der Komponenten und der Erprobung des Ladesystems im Labor bzw. auf einem Prüfstand erfolgte die mechanische Integration des Ladesystems in das Versuchsfahrzeug. Zu diesem Zweck wurde eine Befestigungslösung für die Sekundärspule und die zugehörigen Schirmbleche entwickelt, die mittels individuell angefertigter Halteklammern bei geringen mechanischen Eingriffen in die Fahrzeugstruktur eine Befestigung am Unterboden ermöglicht. Abbildung 2-53 und Abbildung 2-54 zeigen den Aufbau des Spulenhalters am Unterboden.



Abbildung 2-53: Schirmung am Unterboden mit Halteklammern

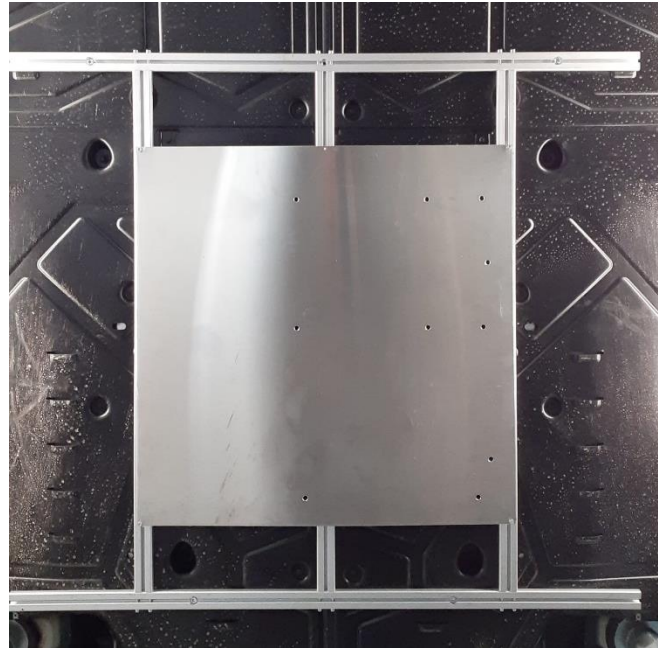


Abbildung 2-54: Spulenhalter fertig montiert

Die durchgeführten baulichen Änderungen wurden einer Prüforganisation zur Erlangung eines Gutachtens vorgeführt. Das entsprechende Gutachten wurde erstellt und ermöglichte im späteren Projektverlauf die Eintragung der Umbauten in die Fahrzeugpapiere.

In den weiteren Ausrüstungsschritten wurden die notwendigen Vorbereitungen für die Installation der von den Projektpartnern zugelieferten Komponenten vorgenommen. Dies betraf u. a. die Befestigung des Gehäuses der sekundärseitigen Elektronik, die Herstellung entsprechender Leitungsdurchführungen und den Einbau der Benutzerschnittstelle im Fahrgastraum. Hierbei wurden jeweils die relevanten Anforderungen bezüglich mechanischer Stabilität, Wasserdichtigkeit und elektrischer Sicherheit einbezogen. Abbildung 2-55 zeigt die Einbaupositionen der Komponenten am ausgerüsteten Fahrzeug.



Abbildung 2-55: Ausgerüstetes Fahrzeug

2.1.8 Inbetriebnahme und Test des Gesamtsystems (AP 1.8)

Ausgehend von der im vorigen Abschnitt beschriebenen Ausrüstung des Versuchsfahrzeugs mit der notwendigen Kommunikationstechnik und der sekundärseitigen Ladeeinheit werden in diesem Abschnitt die Inbetriebnahme und die Durchführung der zugehörigen Tests beschrieben, mit denen das Fahrzeug für die Auslieferung zum Feldtest vorbereitet wurde.

Überprüfung aller Komponenten auf Fahrzeugtauglichkeit

Alle im Fahrzeug verbauten Komponenten wurden im Vorfeld bereits für den Einsatz im Fahrzeug vorbereitet. Dabei wurden beispielsweise in den Iterationsschritten von den Labormustern bis hin zu den im Fahrzeug verwendeten Baugruppen auch die baulichen Gegebenheiten und die erhöhten mechanischen Anforderungen im Fahrzeugeinsatz berücksichtigt. Zusätzlich wurden alle im Fahrzeug verbauten Komponenten vor dem Einbau auf den Prüfständen bereits erprobt und die Kommunikation zwischen den einzelnen Komponenten wurde soweit möglich getestet. In diesem Zusammenhang ist auch die übergeordnete Entwicklung des Zustandsautomaten von Bedeutung, da durch die vorhergehende Definition von Schnittstellen zwischen den Komponenten und deren Verhalten bereits eine weitgehende Implementierung des Gesamtsystemverhaltens möglich war. Abbildung 2-56 zeigt einen Systemtest auf dem Prüfstand der INTIS GmbH. Alle Komponenten wurden dabei bereits in den Ladevorgang eingebunden und die übertragene Leistung wurde über ein CCS-Ladekabel in das Fahrzeug eingespeist, sodass auch die Kommunikation mit dem Fahrzeug und die reale Fahrzeugbatterie in den Versuch eingebunden waren.

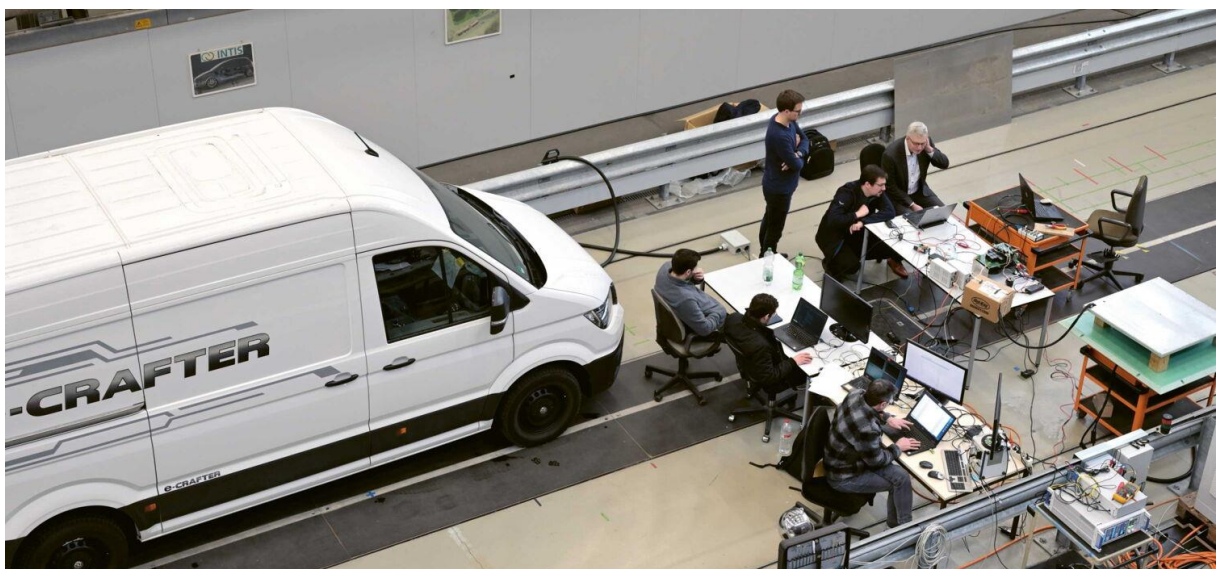


Abbildung 2-56: Systemtest auf dem Prüfstand der INTIS GmbH in Lathen [NOV23]

Die vollständige Feststellung der Fahrzeugtauglichkeit aller Komponenten konnte jedoch nur am ausgerüsteten Fahrzeug durchgeführt werden, da erst dort alle externen Randbedingungen vollständig gegeben sind. Dazu zählen beispielsweise die reale Ausrichtung der Spulen zueinander (abhängig von Parkposition und Beladung), das Verhalten

des 12-V-Bordnetzes, die Kommunikation mit dem Fahrzeug über CCS und der Einfluss der endgültigen Position der WLAN-Antennen im Fahrzeug.

Die Ladeversuche mit dem ausgerüsteten Fahrzeug haben gezeigt, dass das verbaute Ladesystem grundsätzlich funktionsfähig war. In den Details war an einzelnen Stellen Nacharbeit an der Software der Komponenten notwendig, um die vollständige Funktion und den kompletten Ablauf des Zustandsautomaten sicherzustellen. Zusätzlich wurden einzelne Funktionen, die direkt mit dem Fahrzeug in Verbindung stehen und zuvor nur vorbereitet werden konnten, weiter ausgearbeitet. Abbildung 2-57 zeigt die Inbetriebnahme der im Fahrzeug verbauten Leistungselektronik und die Überwachung des laufenden Ladevorgangs über die Diagnoseschnittstellen des Systems.

Abschließend konnte die Fahrzeugtauglichkeit aller Komponenten festgestellt werden, sodass die nachfolgenden Tests und Inbetriebnahmen durchgeführt werden konnten.



Abbildung 2-57: Inbetriebnahme des Ladesystems im Fahrzeug

Test und Inbetriebnahme Kommunikationseinheiten

Die Funktionsfähigkeit der einzelnen Einheiten der Kommunikationsinfrastruktur des induktiven Ladesystems wurden im Vorfeld der Gesamtsystemtests bereits geprüft. Dies beinhaltet beispielsweise die CCS-Kommunikation zum Fahrzeug und die Backendanbindung des Ladesystems, die in Abschnitt 2.1.5 und 2.1.6 beschrieben wurden. Nach der Inbetriebnahme des infrastrukturseitigen Schaltschranks und der fahrzeugseitigen Elektronikbox wurde bezüglich der Kommunikationstechnik im ersten Schritt die Funktionsfähigkeit der einzelnen Kommunikationsschnittstellen und Bussysteme sowie der Datenaustausch zwischen den einzelnen Steuergeräten geprüft. Im Fokus der Gesamtsystemtests lag der Test der Kommunikationstechnik in seiner Gesamtheit. Es wurde der Ablauf des Zustandsautomaten aus Abschnitt 2.1.6 geprüft. Dies beinhaltet das Verhalten der verschiedenen Steuereinheiten und den Datenaustausch zwischen den Komponenten in jeder Phase des Zustandsautomaten. Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Validierung der Darstellung der erforderlichen Daten in den Nutzerschnittstellen, dem HMI im Fahrzeug und dem Webserver des primärseitigen WPT-Controllers. Hierbei stand auch die Prüfung der Nutzerfreundlichkeit im Vordergrund. Dies beinhaltet die zuverlässige und übersichtliche Darstellung von Ladedaten sowie die Bereitstellung von Informationen im Fehlerfall. Für die verschiedenen Fehlerzustände ist jeweils ein Fehlercode definiert. Die Fehlercodes sind relevant für die Identifikation von Fehlerquellen im Falle eines Ladeabbruchs durch einen Fehler. Weiterhin wurde das Logging von Daten durch den SECC und EVCC geprüft. Die Log-Daten vereinfachten darüber hinaus die Testphase, weil stets Daten zur aktuellen Ladephase zur Verfügung standen.

Ein weiterer Bestandteil der Gesamtsystemtests war die Prüfung der Kommunikations- und Steuertechnik im Hinblick auf Funktionen, die beim induktiven AC- und DC-Laden relevant sind. Dies beinhaltet einerseits die Umschaltfunktion des CCS-Leistungspfad, um DC-Laden zu ermöglichen. Weiterhin wurden die Messung und Auswertung der Spannung der CP-Leitung des CCS geprüft, welche für die Erkennung von induktiven Ladevorgängen erforderlich sind. Beim AC-Laden wurde zudem geprüft, ob die sekundärseitige Steuerelektronik sich nach der definierten Wartezeit abschaltet. Für die Erprobung wurden mehrere AC- und DC-Ladevorgänge durchgeführt.

Test und Inbetriebnahme Ladeprozess

Aufbauend auf den Untersuchungen aus dem Abschnitt *Überprüfung aller Komponenten auf Fahrzeugtauglichkeit* und der in Betrieb genommenen Kommunikationseinheiten erfolgte die abschließende Inbetriebnahme des Ladeprozesses im Fahrzeug und ein umfangreicher Test des Ladesystems über mehrere Ladezyklen. Dazu wurden im Vorfeld die noch notwendigen Nacharbeiten an der Software vorgenommen.

Anschließend wurden Ladevorgänge ausgehend von unterschiedlichen Batterieladeständen und bei variierender Ladedauer durchgeführt, um die spätere Anwendung im Feldtest abzubilden. Zusätzlich wurden Versuche zur manuellen Positionierung des Fahrzeugs durch

die Fahrerinnen und Fahrer durchgeführt und die reale Positionierungsempfindlichkeit des am Fahrzeug verbauten Spulensystems wurde überprüft. Hierbei zeigte sich, dass das Fahrzeug gut manuell positioniert werden kann und die über das Bediengerät im Fahrgastraum angezeigte Positionierassistentenfunktion einen zuverlässigen Start des Ladesystems ermöglicht. Um den Positioniervorgang weiter zu vereinfachen, wurde für den Feldtest die Montage von zwei überfahrbaren Schwellen vorgesehen. Die Schwellen werden dabei so angeordnet, dass der Fahrer mittig auf die Schwellen zufahren kann und das Fahrzeug richtig positioniert ist, wenn die Vorderräder des Fahrzeugs an die Schwelle anstoßen.

Die Funktion der Benutzerschnittstelle wurde ebenfalls erprobt. Hierbei wurde einerseits die einfache Bedienbarkeit und die Eindeutigkeit der Anzeigen überprüft und andererseits getestet, ob alle Menüfunktionen in jedem Zustand korrekt arbeiten.

Test der Sicherheitsfunktionen und Verhalten des Systems bei Fehlern

Um sicherzustellen, dass das System in Fehlerfällen den Ladevorgang unterbricht und in einen sicheren Zustand wechselt, wurde ein Katalog mit möglichen Fehlersituationen aufgestellt, die im Betrieb auftreten können. Zu jeder Fehlersituation wurde eine Abschätzung der möglichen Konsequenzen vorgenommen und eine Gegenmaßnahme definiert (siehe dazu Abschnitt 2.1.4).

Die festgelegten Gegenmaßnahmen wurden während des Entwicklungsprozesses der jeweiligen Komponenten umgesetzt und in die Software implementiert. Im Rahmen der Tests wurden die Fehlersituationen aktiv herbeigeführt und das Systemverhalten hinsichtlich der Funktionalität der Sicherheitsfunktionen beobachtet.

Bezugnehmend auf Abschnitt 2.1.4 wurden zusammengefasst Tests in den nachfolgenden Kategorien durchgeführt:

- Ausfall oder kurzzeitige Unterbrechung von Versorgungs- oder Steuerspannungen im Ladebetrieb
- Abriss der Kommunikation an unterschiedlichen Stellen im System
- Über- oder Unterschreitung zulässiger elektrischer Grenzen (Spannung, Strom, Leistung etc.)
- Ausfall des versorgenden Netzes der Primärseite (teilweise und komplett)
- Ausfall von Kühleinrichtungen und daraus resultierende Übertemperaturen an unterschiedlichen Komponenten
- Ausfall von Drahtlosverbindungen
- Ausfall der CCS-Schnittstelle
- Fehlbedienung
- Störungen in der Lebewobjekterkennung

Alle durchgeführten Prüfungen konnten erfolgreich durchgeführt werden und es sind während der Prüfungen keine Schäden an den Komponenten aufgetreten. Da zu diesem Zeitpunkt sowohl die funktionalen, als auch die sicherheitsrelevanten Prüfungen abgeschlossen waren,

wurde die Software der Komponenten und der gesamte Zustandsautomat in diesem Zustand eingefroren.

Elektromagnetische Verträglichkeit

In Arbeitspaket AP 1.1 wurden zunächst die Anforderungen an die einzuhaltenden Normen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit definiert. Maßgeblich wurde die Produktnorm für induktives Laden IEC 61980-1 eingehalten. IEC 61980 verweist bezüglich der Grenzwerte für Störaussendungen oberhalb von 150 kHz auf CISPR11. Die dort festgelegten Grenzwerte entsprechen den Grenzwerten der EMV-Norm EN 55011. Im Frequenzbereich von 9 bis 150 kHz sind Grenzwerte nur in der Produktnorm IEC 61980-1 definiert. Es wurde festgelegt, dass das im Rahmen des Projekts LISA4CL herzustellende induktive Ladesystem den Anforderungen der Klasse A (Umgebungen, die nicht Wohnbereich sind), Gruppe 2 (Nutzung von HF-Energie im Frequenzbereich von 9 kHz bis 400 GHz) entsprechen soll.

Störquellen mit einem Potenzial zur Überschreitung zulässiger Grenzwerte können erfahrungsgemäß sowohl (a) Funktionsbaugruppen sein, die zur Realisierung der induktiven Energieübertragung zum Einsatz benötigt werden und können (b) Funktionsbaugruppen sein, die nicht direkt zur Energieübertragung beitragen. Zur Gruppe (a) gehören insbesondere aktive Elemente des Leistungspfad und zur Gruppe (b) gehören insbesondere Schaltnetzteile und Baugruppen zur Datenübertragung sowie Datenverbindungsleitungen.

Erfahrungsgemäß ist in einer frühen Entwicklungsphase zu analysieren, welche Baugruppen potenzielle „Störer“ sein können und welche Maßnahmen zum Gegensteuern gegen zu hohe Störaussendungen zu treffen sind. Im Projekt LISA4CL war zu berücksichtigen und zu analysieren, welche Beiträge insbesondere das AFE und der primärseitige Gyrator liefern werden. Das AFE wurde einerseits als potenzieller „Störaussendungs-Verminderer“ identifiziert, da er zwischen Wechselrichter und Netzanschlusspunkt verschaltet ist, andererseits kann das AFE auch „Störaussendungs-Beiträger“ sein, wegen seiner getakteten Leistungselektronik. Der Gyrator in funktionalem Zusammenhang mit dem nachgeschalteten Ausgangstransformator wurde grundsätzlich als „Störaussendungs-Verminderer“ identifiziert, weil seine auf Resonanz abgestimmten Bauteile erwartungsgemäß eine Oberschwingungsfilterwirkung liefern werden. Im Rahmen der experimentellen Validierung konnte diese Filterwirkung auch bestätigt werden. Sie zeigt sich insbesondere beim Vergleich des Zeitverlaufs der Ausgangsspannung des Wechselrichters mit dem Zeitverlauf der Spannung, die die Primärspule speist (siehe z. B. Abbildung 2-118 und Abbildung 2-119).

Das Maß an Störaussendungen einzelner Baugruppen, insbesondere der identifizierten potenziellen Störer, wurde bei INTIS schon nach ihrer Fertigstellung in baugruppen-individuellen Laborumgebungen experimentell untersucht. Hierbei war zu berücksichtigen, dass das Verhalten auf dem „Labortisch“ nicht mit dem späteren Verhalten (wenn ins Gesamtsystem integriert) gleichzusetzen ist. Aus langjähriger Erfahrung ist jedoch bekannt, dass diese Vorgehensweise sehr vorteilhaft ist, da unzulässige Störaussendungen des Gesamtsystems kaum noch zu korrigieren sind, wenn einzelne Baugruppen nicht ausreichend

entstört sind. Die Entstörung erfolgte mit allgemein bekannten Maßnahmen wie Gleichtaktunterdrückung, induktivitäts- und querkapazitätsarmer Leitungsverlegung, der Vermeidung von „Masseschleifen“ und der Rückführung von Strömen mit hochfrequenten Anteilen über möglichst kurze Leitungen zu ihrer Quelle. Die Eignung elektrischer Verschaltungen der Bauteile zur Störaussendungsverminderung sowie ihre Kapazitäts- und Induktivitätswerte wurde im Zuge der Laborversuche untersucht. Gegebenenfalls waren Verschaltungen zu korrigieren, ungeeignete Bauteile auszutauschen oder Kapazitäts-/ Induktivitätswerte von Bauteilen anzupassen.

Da es sich bei LISA4CL um ein Projekt mit großem Forschungsanteil handelte, wurde das Störaussendungsverhalten des Gesamtsystems in einer Versuchsumgebung bei INTIS sehr umfangreich untersucht. Zum Einfluss einzelner Baugruppen und Verschaltungsvarianten auf die Störaussendungen des Gesamtsystems konnten neue Erkenntnisse gewonnen werden.

Nach dem Aufbau des Gesamtsystems am Standort des NFF in Braunschweig wurden EMV-Messungen durchgeführt. Wesentliche Ergebnisse werden nachfolgend dargestellt (Abbildung 2-59 bis Abbildung 2-72). Die grünen Spektraldarstellungen zeigen die ermittelten Feldstärken in dB μ V/m oder dB μ A/m. Die grauen Spektraldarstellungen zeigen die ermittelten Signalstärken in dB μ V. Die Grenzwerte sind rot dargestellt (DIN EN 61980-1, Klasse A).

Versuchsaufbau

Abbildung 2-58 zeigt den Aufbau für die EMV-Messungen. H- und E-Feld-Messungen wurden entsprechend der Produktnorm DIN EN 61980-1 für Geräte der Klasse A mit entsprechender Messtechnik und Antennen im Abstand von 10 m zum Mittelpunkt der Primärspule vermessen. Die Messungen erfolgen mit verschiedenen Ausrichtungen der Antennen bezüglich der Position der induktiven Ladetechnik/ des Fahrzeugs (Messobjekt). Die Messungen wurden im Lademodus mit 22 kW Ladeleistung durchgeführt.



Abbildung 2-58: Foto vom Standort der EMV-Messungen

H-Feld-Messungen

Das H-Feld wurde mit zwei Messreihen mit Loopantenne ermittelt. Bei einer der Messreihen zeigte die Loop in Richtung des Messobjektes (X-Richtung), bei der anderen Messreihe stand die Loopfläche in Richtung Messobjekt (Y-Richtung).

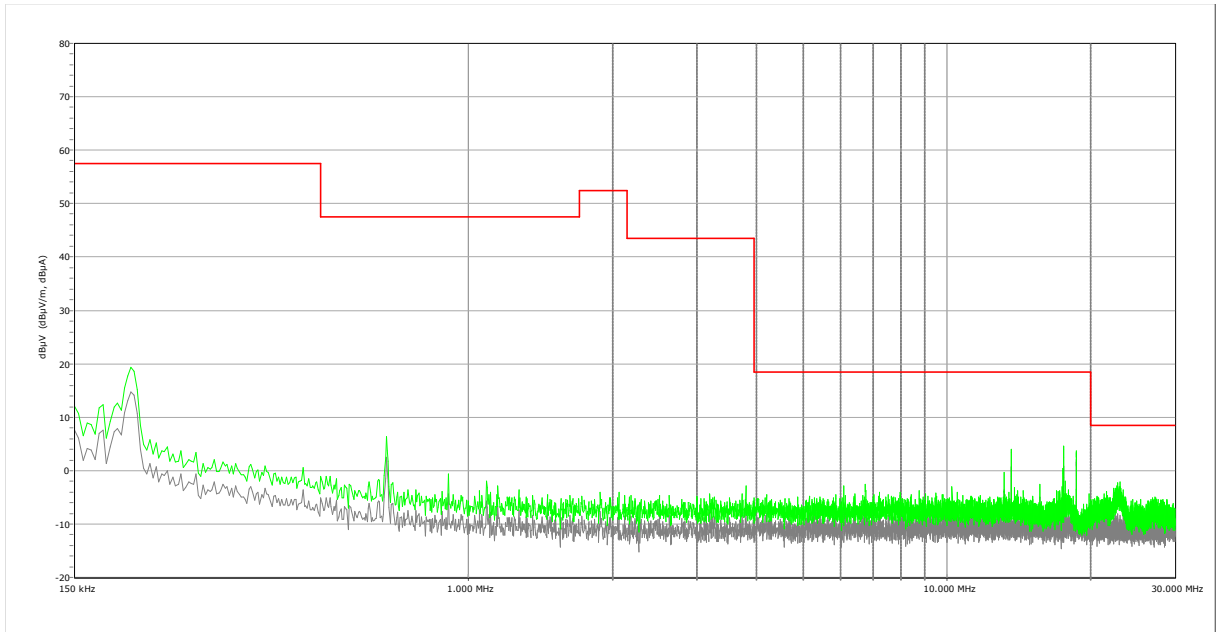


Abbildung 2-59: Hintergrundsignale H-Feld, 150 kHz bis 30 MHz (X-Richtung)

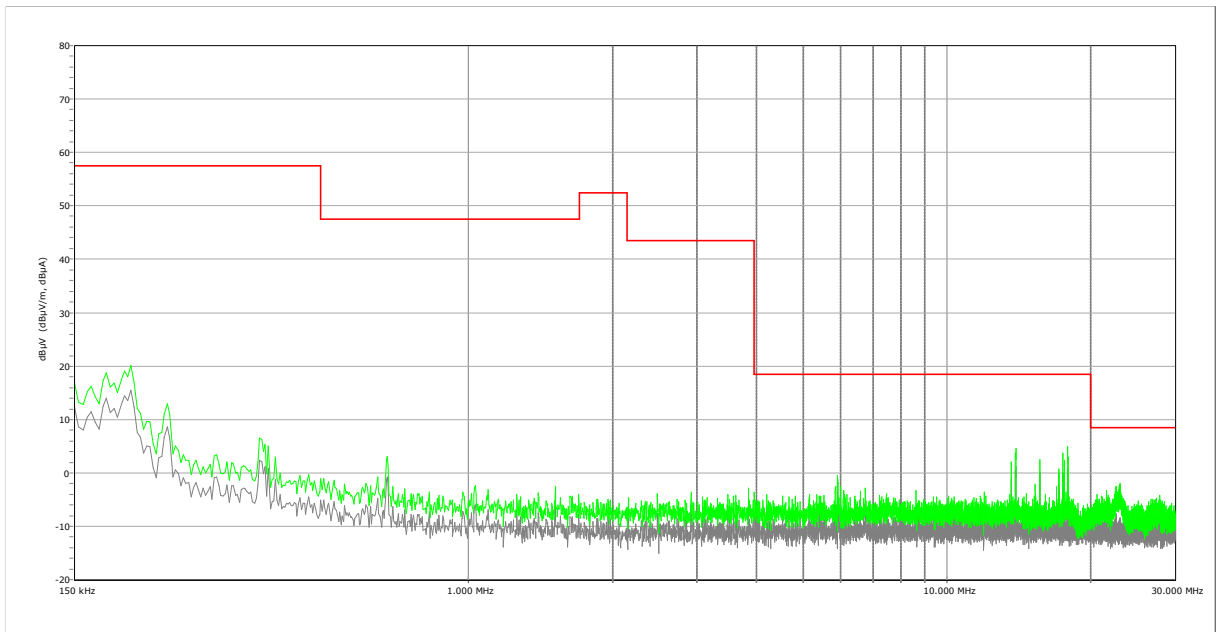


Abbildung 2-60: Hintergrundsignale H-Feld 150 kHz bis 30 MHz (Y-Richtung)

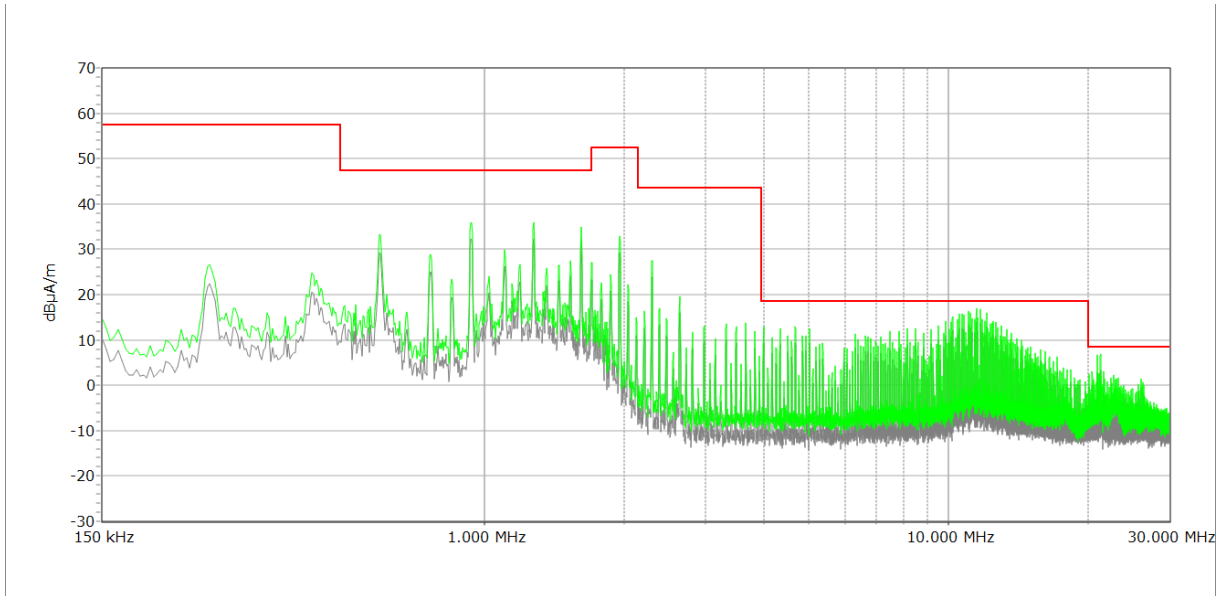


Abbildung 2-61: H-Feld 150 kHz – 30 MHz (X-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)

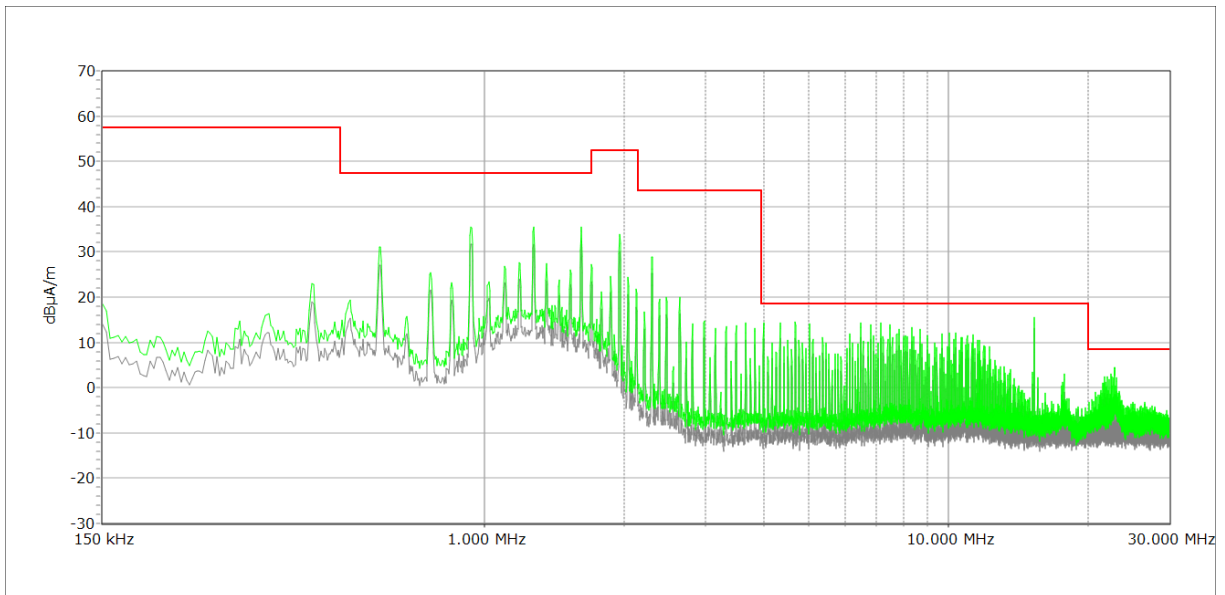


Abbildung 2-62: H-Feld 150 kHz – 30 MHz (Y-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)

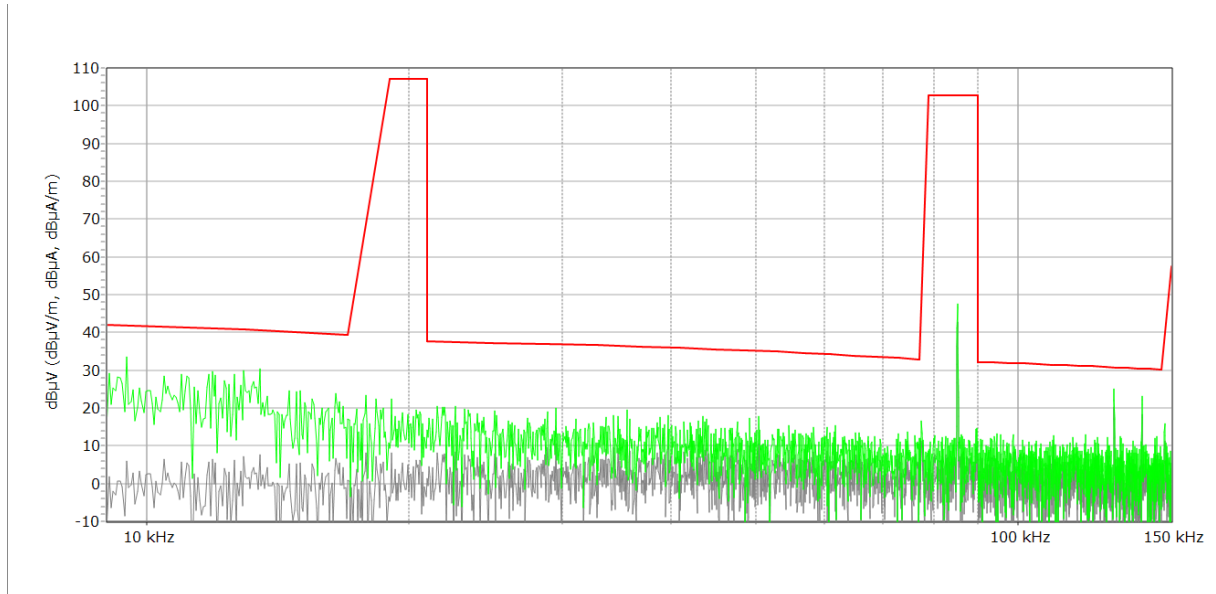


Abbildung 2-63: H-Feld 9 kHz bis 150 kHz (X-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)

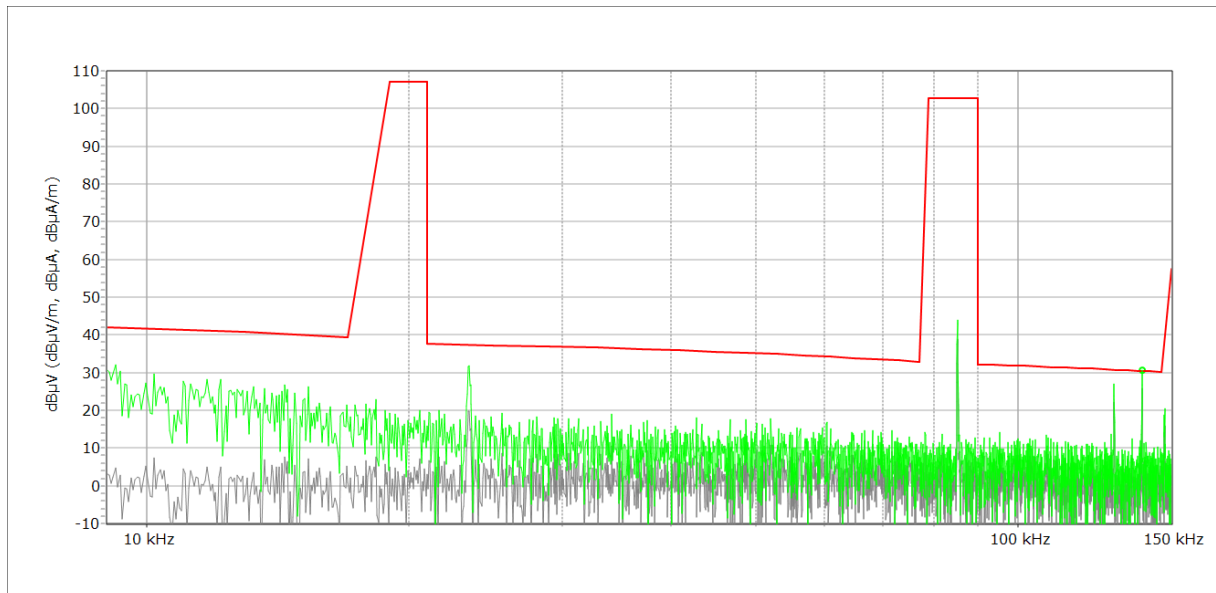


Abbildung 2-64: H-Feld 9 kHz bis 150 kHz (Y-Richtung), Ladebetrieb (22 kW)

Die Grenzwertüberschreitung bei ca. 140 kHz ist ein Hintergrundsignal. Erstaunlich gering (unter 50 dBµA/m) sind die Störaussendungen im Bereich der Betriebsfrequenz (85 kHz). Zu beachten ist hierbei jedoch, dass der Schaltschrank mit der Leistungselektronik im Gebäude des NFF verbaut ist. Somit werden vom Schaltschrank ggfs. verursachte Störaussendungen mit diesen Messreihen sehr wahrscheinlich nicht erfasst. Andererseits zeigen die Messreihen, dass von der Primärspule und ihren Stromzugangsleitern keine maßgebliche Störaussendung (H-Feld) ausgeht.

E-Feld-Messungen

Für den Frequenzbereich von 30 – 300 MHz kam eine bikonische Antenne und für den Frequenzbereich von 300 MHz – 1 GHz eine Logarithmisch-Periodische Antenne zum

Einsatz. Dabei wurden für beide Frequenzbereiche die Messung mit horizontaler und mit vertikaler Antennenausrichtung durchgeführt.

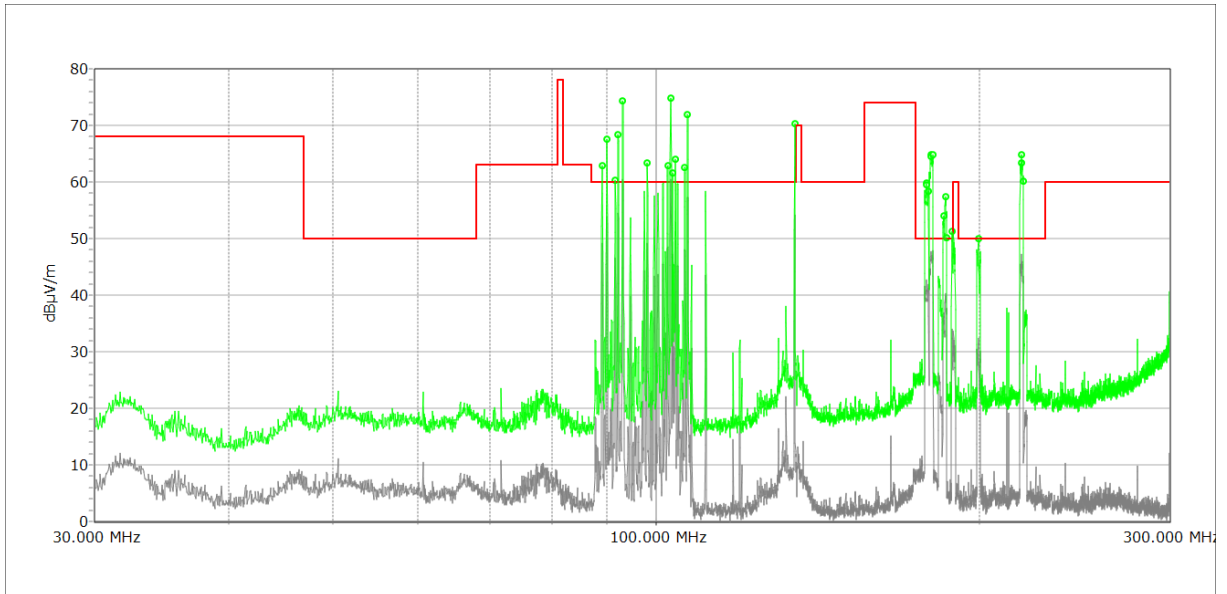


Abbildung 2-65: Hintergrundsignale (30 – 300 MHz) horizontal

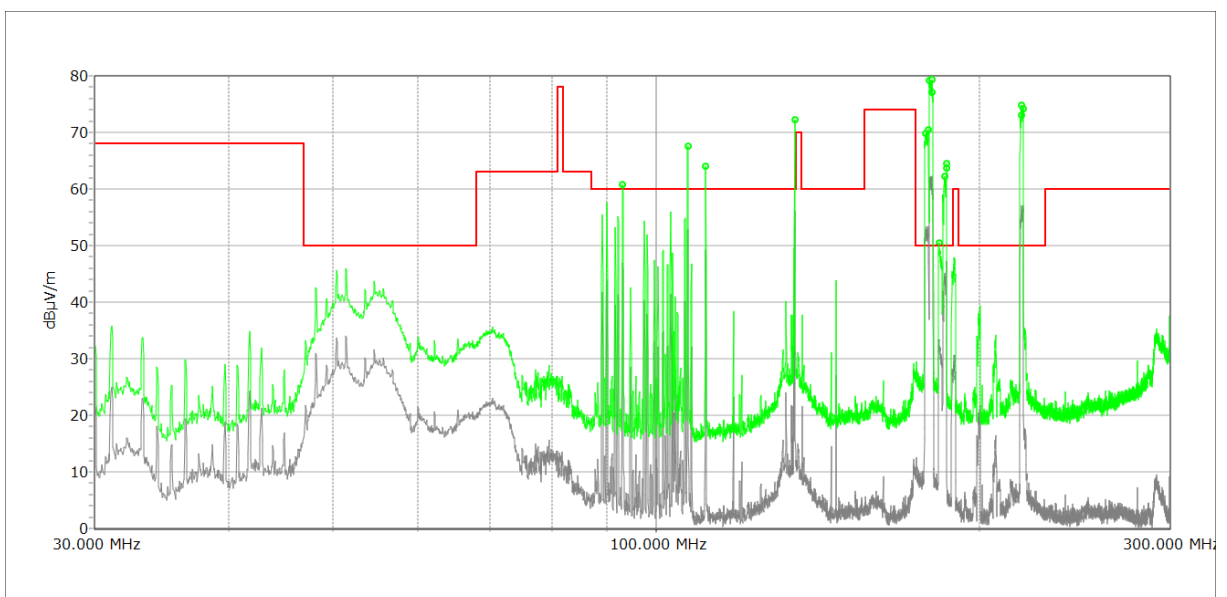


Abbildung 2-66: Hintergrundsignale (30 – 300 MHz) vertikal

Dominant bei den Hintergrundsignalen sind das UKW-Rundfunkband, sowie die Träger des Flugfunks (Der Flughafen Braunschweig befindet sich in direkter Nachbarschaft zum Standort des Ladesystems).

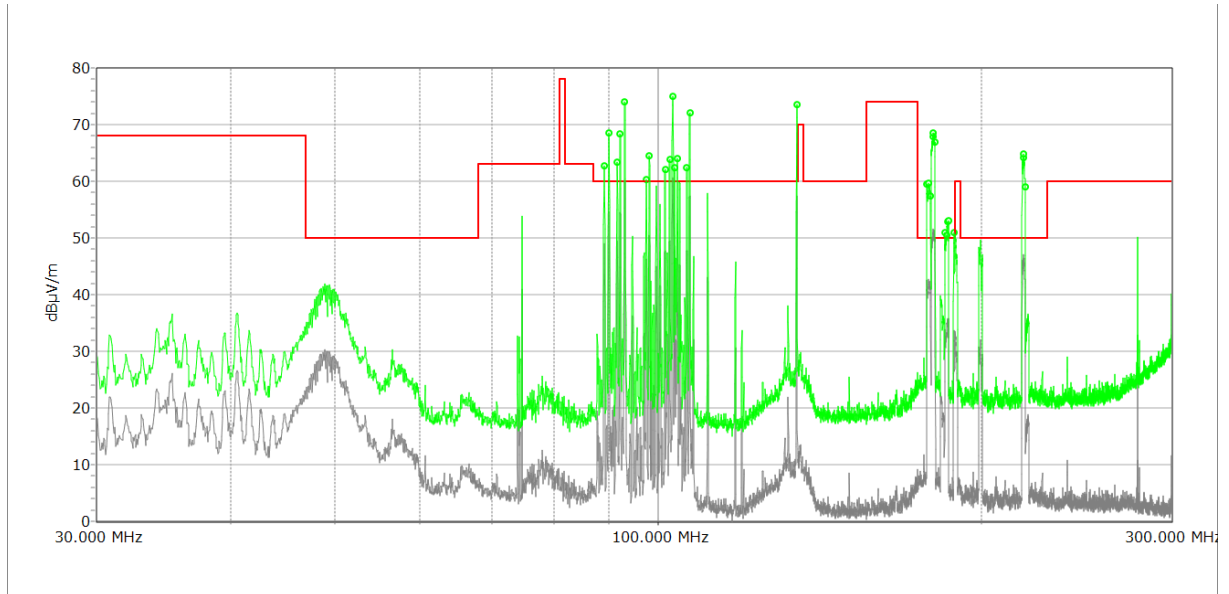


Abbildung 2-67: E-Feld (30 – 300 MHz, horizontal), Ladebetrieb (22 kW)

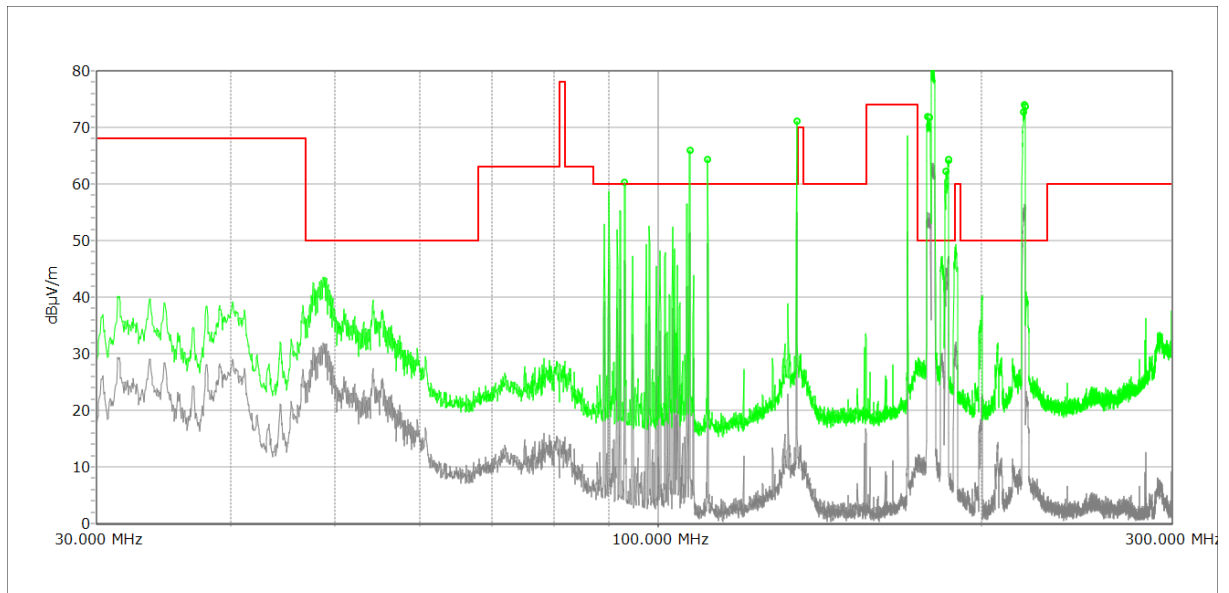


Abbildung 2-68: E-Feld (30 – 300 MHz, vertikal), Ladebetrieb (22 kW)

Gegenüber den Hintergrundsignalen kann man bei Ladebetrieb zusätzliche Immissionen bis ca. 70 MHz erkennen, die jedoch weit unter den Grenzwerten bleiben.

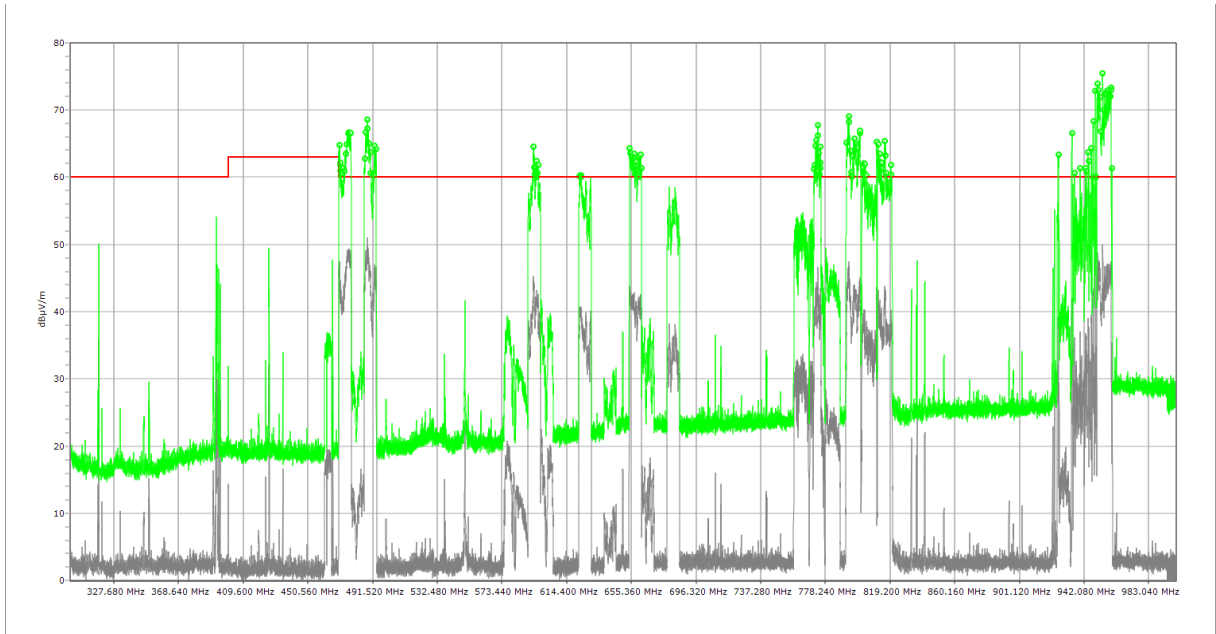


Abbildung 2-69: Hintergrundsignale (300 MHz – 1 GHz) horizontal

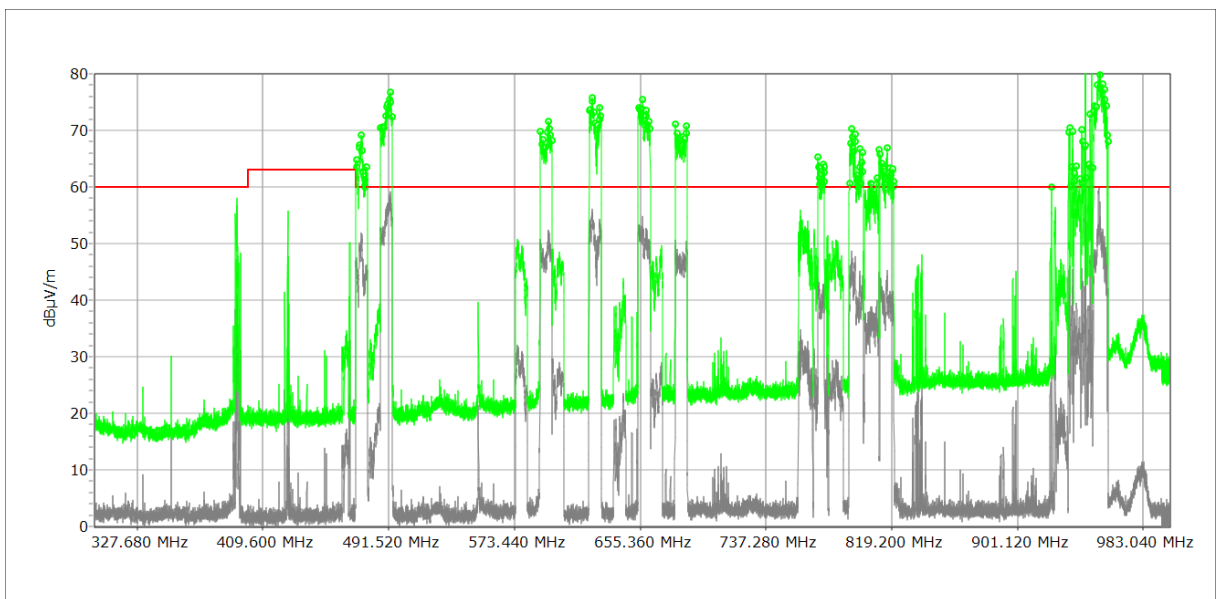


Abbildung 2-70: Hintergrundsignale (300 MHz – 1 GHz) vertikal

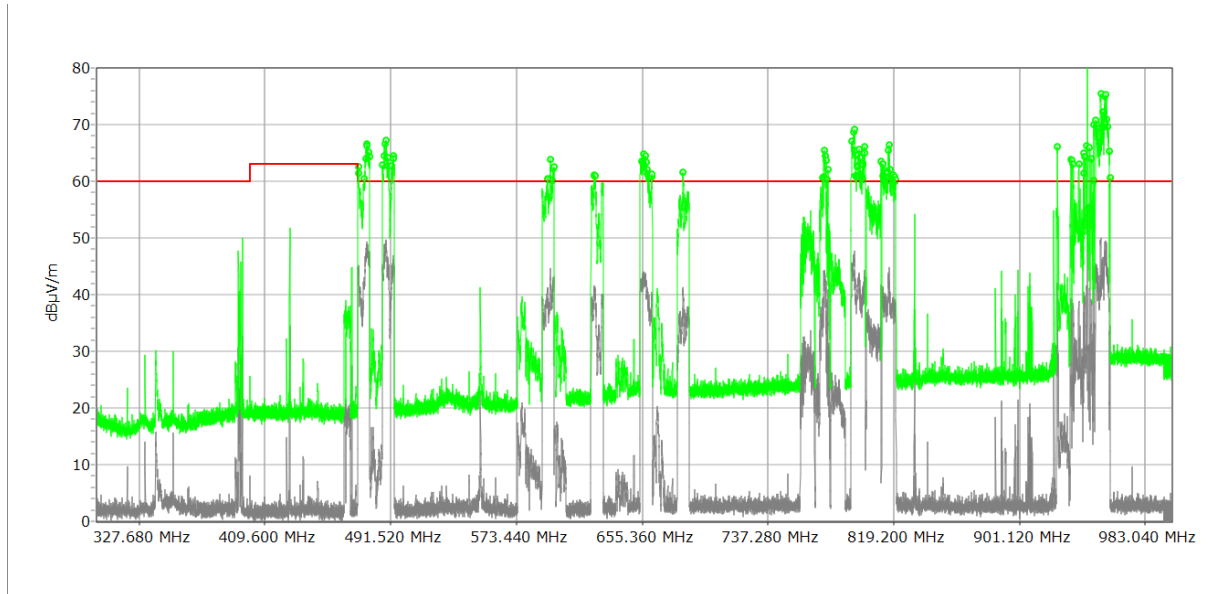


Abbildung 2-71: E-Feld (300 MHz – 1 GHz, horizontal), Ladebetrieb (22 kW)

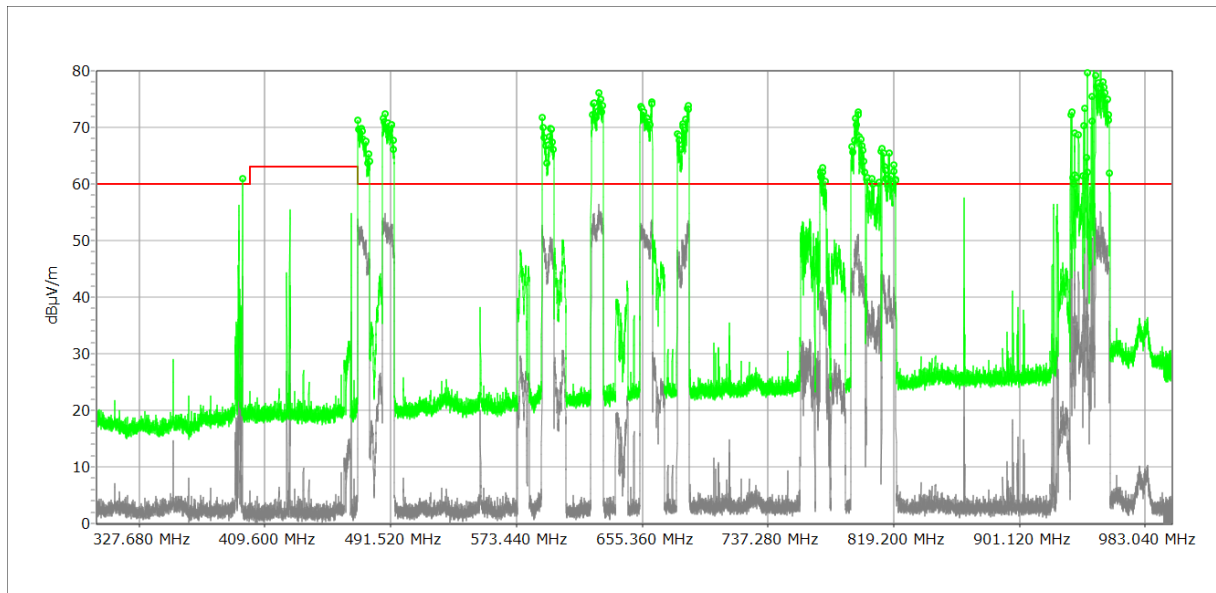


Abbildung 2-72: E-Feld (300 MHz – 1 GHz, vertikal), Ladebetrieb (22 kW)

Die Spektren der Hintergrundsignale und der Signale im Ladebetrieb unterscheiden sich kaum. INTIS-Erfahrungen aus anderen Projekten ließen dies auch erwarten.

Die EMV-Messungen zeigen, dass die Störaussendungen unter den Grenzwerten der DIN EN 61980-1 bleiben und dies meist auch mit einem großen Abstand.

Mechanische Überprüfung des Fahrzeugs

Der im vorigen Abschnitt dargestellte Prüfungskatalog umfasst neben den elektrischen Fehlern auch Prüfungen auf mechanische Einflüsse, die im Fahrbetrieb auftreten können. Dabei wurden folgende Einflüsse als wesentlich identifiziert und eingehend geprüft:

Einwirkung von Wasser

- Überprüfung der Wasserdichtigkeit mittels Hochdruckreiniger in unmittelbarer Nähe der Spule für 20 Minuten
- Funktionsfähigkeitsprüfung bei nasser Sekundärspule durch Hochdruckreinigerbehandlung
- Isolationsprüfung mit trockener Spule und Vergleich mit Isolationsprüfung kurz nach Einsatz Hochdruckreiniger bzw. Durchfahrt einer Waschstraße

Ausreichende Bodenfreiheit

- Die notwendige Bodenfreiheit für das Überfahren von Bordsteinkanten wurde erprobt

Mechanische Erschütterungen, Rütteln und Stöße

- Umfangreiche Erprobungsfahrten mit vielfachem Überfahren einer Kopfsteinpflasterstraße mit maximal zumutbarer Geschwindigkeit
- Anschließende Überprüfung aller Befestigungen und Komponenten auf Beschädigungen

Nach Abschluss aller mechanischen Tests wurde eine abschließende Prüfung des Ladesystems und des Fahrzeugs auf Funktion und mechanische Beschädigungen durchgeführt. Ferner wurde die Integrität aller Anbauteile geprüft. Dabei wurden keine Schäden und Beeinträchtigungen festgestellt, sodass das Fahrzeug als auslieferungsfertig eingestuft wurde.

Abnahme und Zulassung des Fahrzeugs

Nach Erreichen des auslieferungsfertigen Zustandes wurde das Fahrzeug im September 2023 im Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) zusammen mit Vertretern von Volkswagen Nutzfahrzeuge begutachtet und für die Nutzung im Feldtest freigegeben. Eine entsprechende Systemdokumentation und eine Aufstellung der getätigten Prüfungen am Fahrzeug wurden an VW Nutzfahrzeuge übergeben. Abbildung 2-73 zeigt das Fahrzeug bei der Ankunft am NFF.

Ein Gutachten des TÜV über die baulichen Änderungen am Fahrzeug lag zu diesem Zeitpunkt bereits vor, sodass die notwendigen Eintragungen in die Fahrzeugpapiere durch VW Nutzfahrzeuge veranlasst werden konnten und die Auslieferung zum Feldtest nach Berlin damit ermöglicht wurde.



Abbildung 2-73: Ankunft des auslieferungsfertigen Fahrzeugs am NFF in Braunschweig

Abbildung 2-74 und Abbildung 2-75 zeigen den Primärschaltschrank und die Sekundärbox im auslieferungsfähigen Zustand. In Abbildung 2-75 ist die Ebene der Box mit den Komponenten der Kommunikationsinfrastruktur zu sehen. In beiden Abbildungen sind die einzelnen Komponenten beschriftet.

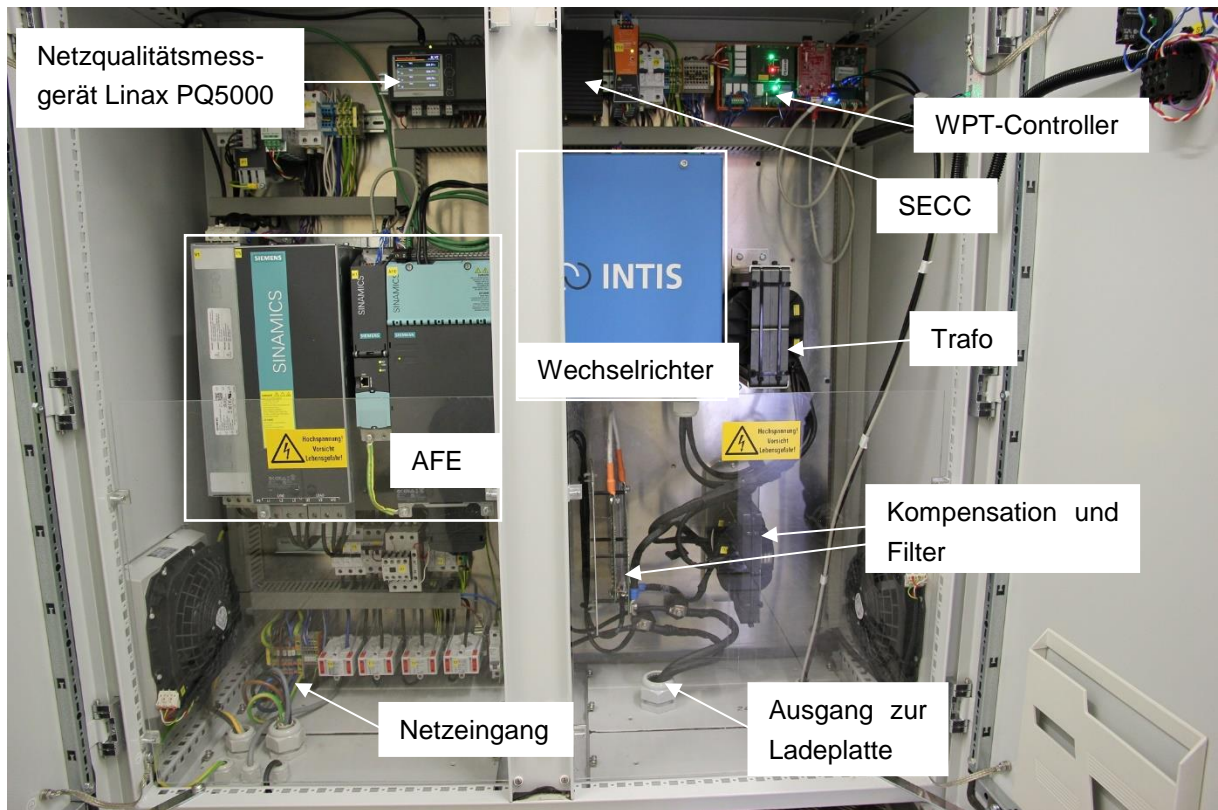


Abbildung 2-74: Primärschaltschrank mit Komponenten des Kommunikations- und Leistungspfad

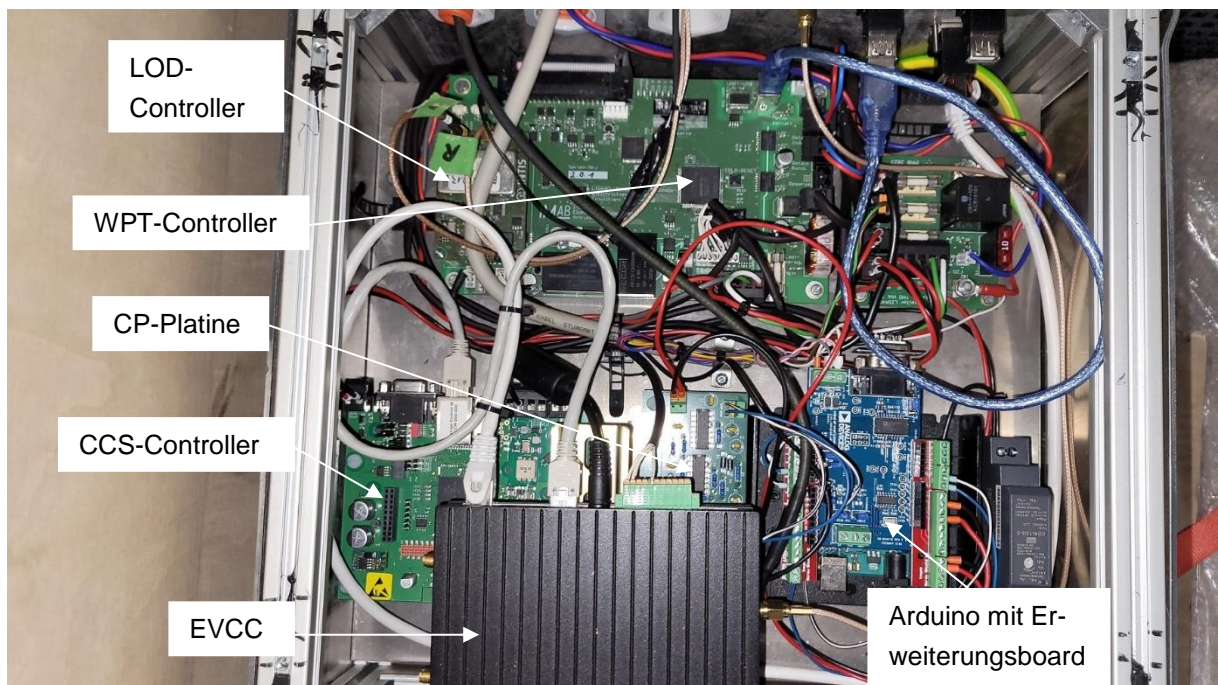


Abbildung 2-75: Steuergeräteebene der Sekundärbox im Erprobungsfahrzeug mit Komponenten der Kommunikationsinfrastruktur

Netzorientierte Funktion

Die symmetrische dreiphasige Q(U)-Regelung ist als netzorientierte Funktion im SECC des induktiven Ladesystems implementiert. Die Regelung wurde in den Gesamtsystemtests mit dem induktiven Ladesystem erprobt. Für diese Aufgabe wurden netzseitige Spannungsänderungen simuliert. Gemäß der Regelung wird an dem AFE die Blindleistung eingestellt. Die Umsetzung der Q(U)-Regelung ermöglicht mit dem induktiven Ladesystem einen Beitrag zur Spannungshaltung zu leisten. Eine detaillierte simulative und labortechnische Untersuchung der Q(U) und weiterer netzorientierten Funktionen erfolgt in Abschnitt 2.3.

Zusammenfassung

Zusammenfassend betrachtet wurde mit Durchführung des AP 1.8 das Versuchsfahrzeug in den auslieferungsfähigen Zustand gebracht. Hard- und Softwarestände wurden festgesetzt und entsprechend dem zuvor angelegten Prüfkatalog auf Funktion und Zuverlässigkeit überprüft. Die festgelegten Tests und Prüfungen wurden erfolgreich durchgeführt. Das Versuchsfahrzeug konnte daher in den Feldtest überstellt werden. Parallel dazu erfolgte die Prüfstandausrüstung mit den Leistungskomponenten, sodass begleitend zum Feldtest Messungen am Prüfstand durchgeführt werden konnten. Im Gegensatz zum Ladebetrieb des Fahrzeugs können im Prüfstandbetrieb die einzelnen Parameter wie Batteriespannung, Positionierung des Spulensystems etc. reproduzierbarer eingestellt und konstant gehalten werden, sodass umfassendere Systemvermessungen möglich sind.

2.2 Feldtest konduktiv (AP 3.1)

Im Rahmen des durchgeführten konduktiven Feldtest wurden die Ladevorgänge von sechs Ladepunkten gemessen. Zusätzlich wurde der Lastgang des Standortes gemessen. Vier Ladepunkte waren mit einem Backend verbunden, wodurch mehr Informationen über die Ladevorgänge generiert werden konnten. Es wurden insgesamt drei Power Quality Analysatoren, PQ-Boxen der Firma A. Eberle, eingesetzt. Zwei PQ-Boxen haben hierbei die beiden Zuleitungen ins Gebäude gemessen und die dritte hat explizit die Wallbox ohne Backendverbindung, die zwei Ladepunkte umfasst, gemessen. Insgesamt wurden während des konduktiven Feldtestes am betrachteten Standort drei Nissan e-NV200, zwei Opel Vivaro Elektro und ein Ford E-Transit eingesetzt. Die Nissans haben eine AC-Ladeleistung von bis zu 6,6 kW, wohingegen die anderen Fahrzeuge eine AC-Ladeleistung von 11 kW besaßen. Die Batterie der Nissan hat eine Kapazität von 40 kWh. Die Opel Vivaro haben jeweils eine Batteriekapazität von 75 kWh und der Ford E-Transit besitzt eine Batterie mit 77 kWh.

Im Zeitraum des Feldtestes vom 07.09.2022 bis 21.11.2023 wurden insgesamt 1054 Ladevorgänge der vier mit dem Backend verbundenen Ladepunkte durchgeführt. Diese Ladevorgänge hatten einen Gesamtenergiebedarf von 18,69 MWh. Zusätzlich wurden über die anderen zwei Ladepunkte 17,89 MWh verbraucht. Der Energiebedarf der Ladevorgänge variierte zwischen den einzelnen Ladevorgängen sehr stark. Dies lässt darauf schließen, dass die Routenlängen sehr unterschiedlich waren. Außerdem ist davon auszugehen, dass auch einige Zwischenladungen unternommen wurden.

In Abbildung 2-76 ist der Energiebedarf der einzelnen Ladevorgängen abhängig vom Startzeitpunkt der Ladevorgänge dargestellt. In der Abbildung ist auffällig, dass die Ladevorgänge zwischen 08:00 und 16:00 Uhr einen kleineren Energiebedarf als die Ladevorgänge zwischen 16:00 und 04:00 morgens aufwiesen. Dies kann ein Indiz für durchgeführte Zwischenladungen sein. Jedoch kamen auch in der Gruppe von 08:00 bis 16:00 Uhr teilweise größere Energiemengen vor. Eine Ursache hierfür sind die diversen Routen, weil teilweise auch bereits in dieser Gruppe abgeschlossene Arbeitstage inbegriffen sind. Die Gruppe zwischen 04:00 und 08:00 Uhr stellt hierbei eine Sondergruppe dar. Denn die überwiegenden Auslieferungen finden am Tag statt. Deshalb kann hier vermutet werden, dass die Ladevorgänge dieser Gruppe ursprünglich fehlgeschlagene Ladevorgänge vom Vortag waren, die morgens nachgeholt wurden. In der Tabelle 2-2 sind die statistischen Werte der unterschiedlichen Dauern der Ladevorgänge aufgezeigt. Dabei ist durch den Median sichtbar, dass in den Gruppen von 08:00 bis 16:00 Uhr vermehrt kürzere Ladevorgänge auftreten. Daraus und aus den eher kleineren Energiemengen kann geschlossen werden, dass es sich hierbei um Zwischenladungen zwischen zwei Touren gehandelt hat.

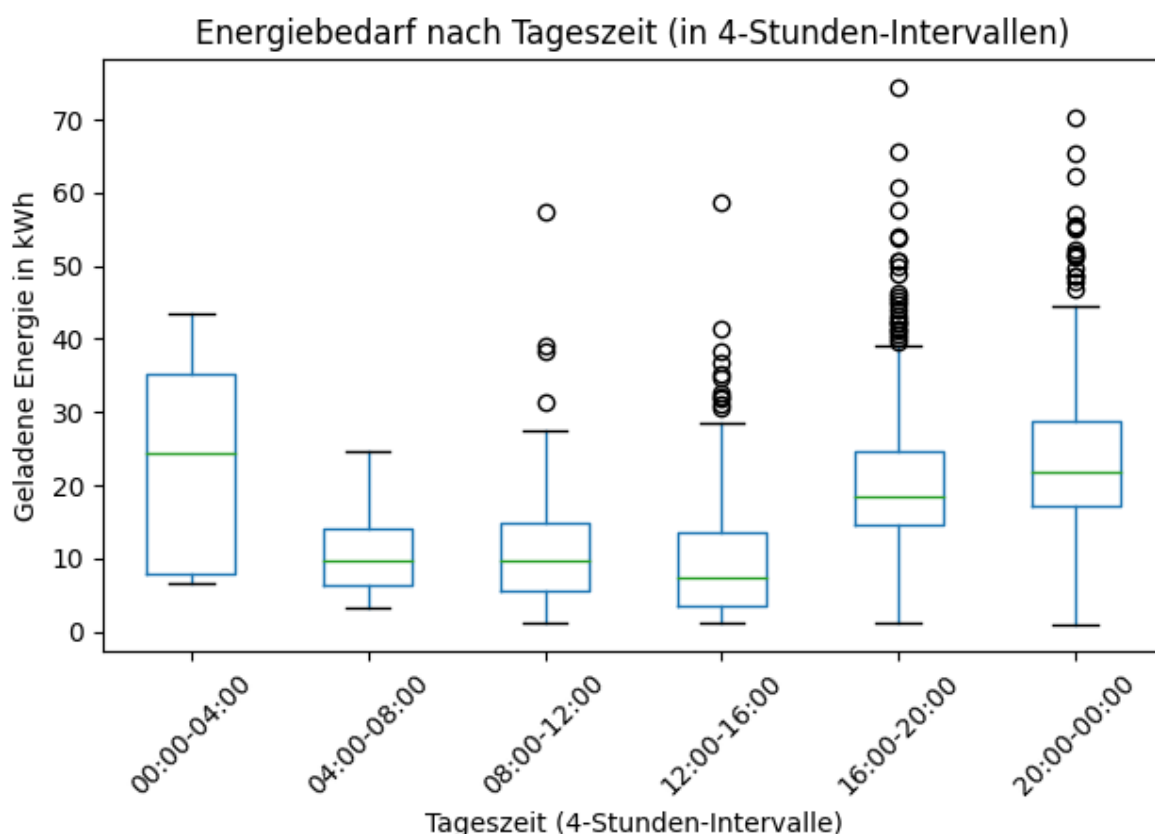


Abbildung 2-76 Energiemengen der Ladevorgänge gruppiert nach Startzeitpunkten

Tabelle 2-2: Verteilung der Ladedauern abhängig vom Startzeitpunkt des Ladevorgangs

Tageszeit	Anzahl	Durchschnitt (min)	Median (min)	Minimum (min)	Maximum (min)
00:00-04:00	5	427,8	530	149	645
04:00-08:00	20	346,65	309,5	49	647
08:00-12:00	103	270,47	200	12	2.804
12:00-16:00	271	527,91	95	8	5.698
16:00-20:00	386	1.420,76	1.032,5	13	8.461
20:00-00:00	268	1.312,42	935	11	9.190

Durch die Messdaten konnten verschiedene Erkenntnisse gewonnen werden. Die gesamte verbrauchte Energie im Messzeitraum betrug 46,57 MWh, wobei 9,99 MWh auf den reinen Betrieb der Liegenschaft fielen. Der maximale Leistungspeak des Standortes war 48,39 kW und trat nur für einen kurzen Zeitraum auf. Er wurde durch gleichzeitige Ladevorgänge und Lasten durch das Lastprofil des Gebäudes erzeugt. In Abbildung 2-77 ist der Tag mit dem Leistungspeak zu sehen. Hierbei sind die unterschiedlichen Startzeitpunkte der Ladevorgänge durch das stufige Verhalten im Verlauf ab 18:00 Uhr zu erkennen. Außerdem lässt sich der kurze Leistungspeak erkennen. Der 15-minütige Leistungspeak betrug 46,27 kW. Mit der Summe der Ladeleistungen der Fahrzeuge von 52,8 kW und der Formel (2.3) lässt sich hiermit die maximale Gleichzeitigkeit der Fahrzeuge berechnen. Diese betrug für den kurzen

Leistungspeak 0,92 und für den 15-minütigen Mittelwert 0,876, welcher die Ladevorgänge besser widerspiegelt.

$$g = \frac{P_{Peak}}{\sum P_{EV}} \quad (2.3)$$

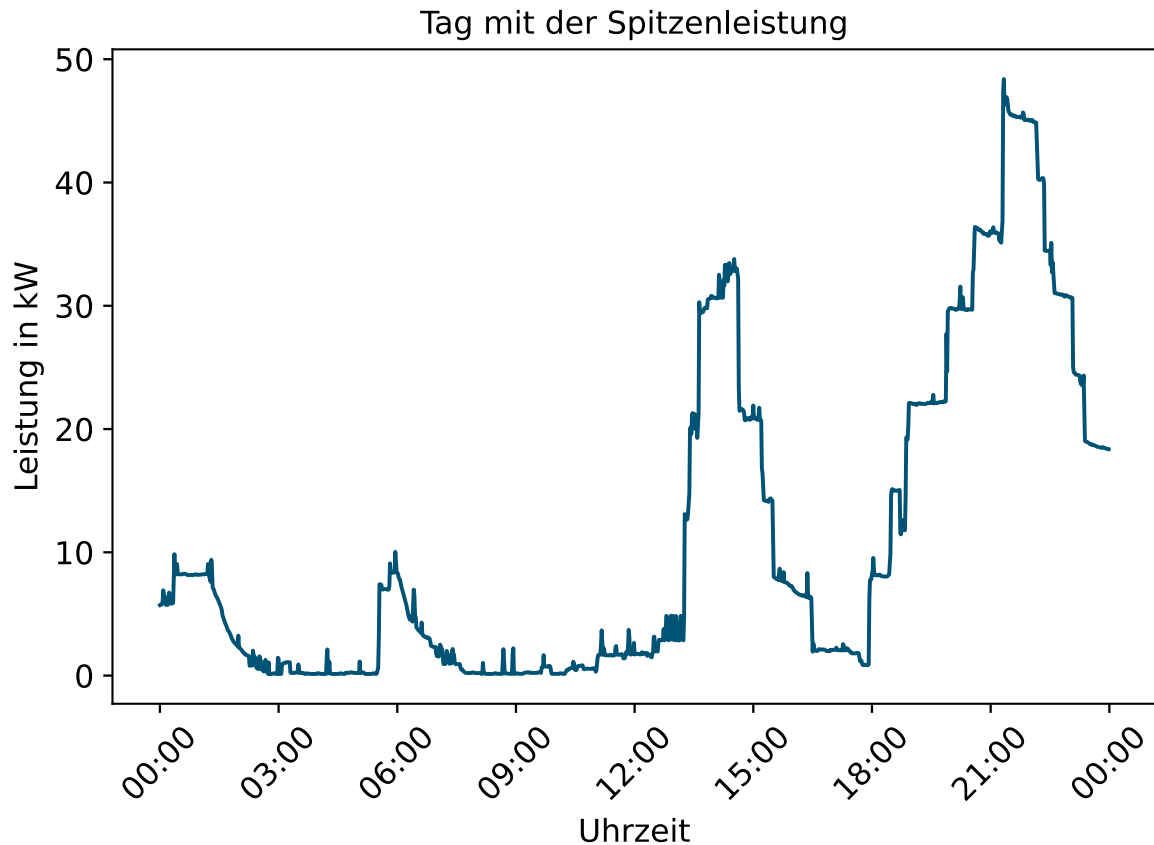


Abbildung 2-77: Leistungsverlauf des Tages mit der Spitzenlast

In Abbildung 2-78 ist die Auslastung des Stromnetzanschlusses abhängig von der Leistung zu sehen. Die y-Achse ist in Prozent dargestellt. In der Grafik ist zu erkennen, dass der Stromnetzanschluss in 70 % der Fälle mit weniger als 5 kW belastet wird. Diese Belastung wird vermutlich durch andere Verbraucher am Standort erzeugt. Die Ladevorgänge sind in dieser Zeit aufgrund der höheren Leistung der Elektrofahrzeuge nicht inbegriffen, sodass diese den Zeiträumen über dieser Grenze zugeordnet werden können. Dies ist gleichbedeutend damit, dass nur in 30 % des untersuchten Zeitraums ein Ladevorgang aktiv war. Um die Belastung des Netzanschlusses durch die Elektrofahrzeuge besser sichtbar zu machen, ist noch eine zweite Kennlinie eingetragen, welche nur Leistungen über 5 kW berücksichtigt. Hierbei fällt auf, dass der Anstieg bis 20 kW sehr steil ist und darüber hinaus immer weiter abflacht. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Fahrverhalten der Fahrzeuge sehr unterschiedlich war und daher eine hohe Gleichzeitigkeit der Ladevorgänge nur sehr selten

vorkam. 99,5 % aller am Standort aufgetretenen Leistungen waren unterhalb von 25 kW.

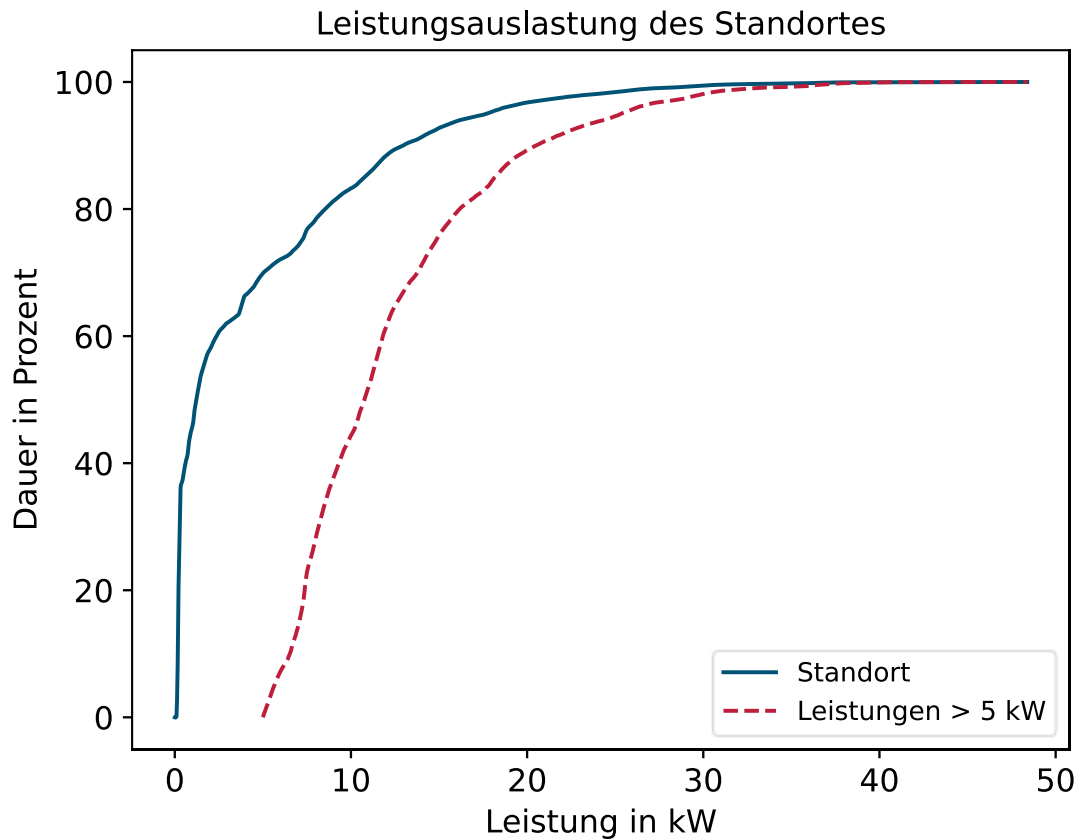


Abbildung 2-78: Auslastung des Netzanschlusspunkts

Die Messgeräte konnten neben den Leistungsmesswerten auch unterschiedliche Spannungsqualitätsparameter aufnehmen. Daraus war zu erkennen, dass es in dem Netzgebiet diverse Spannungseinbrüche gab. Diese Spannungseinbrüche konnten allerdings nicht auf spezifische Ladevorgänge zurückgeführt werden. Eine Auffälligkeit die beobachtet werden konnte, war eine Unsymmetrie von 0,6 %. Diese liegt zwar noch unter dem Grenzwert von 2 %, jedoch war dies ein gemessener Wert am Netzverknüpfungspunkt. Daher kann sich diese Unsymmetrie im weiteren Netzgebiet durchaus verstärken. Die 0,6 % Unsymmetrie wurden durch die Ladevorgänge der Nissan e-NV verursacht, welche 1-phasig mit 6,6 kW geladen haben.

2.3 Intelligente Vernetzung zwischen Infrastrukturen und Fahrzeugen für ein erzeugungs- und netzorientiertes Laden der Elektrofahrzeuge

Modul 2 beschäftigt sich mit der Netz- und Systemintegration von Ladeinfrastruktur. Im ersten Abschnitt stehen erzeugungsorientierte Ladekonzepte für die Einbindung von erneuerbaren Energien im Fokus. Es werden verschiedene Konzepte entwickelt und simulativ untersucht. Im zweiten Abschnitt werden netzorientierte Ladekonzepte für die Aufrechterhaltung eines stabilen Netzbetriebs erarbeitet und simulativ untersucht. Der letzte Abschnitt befasst sich mit den Laboruntersuchungen der erarbeiteten Ladekonzepte.

2.3.1 Konzepte für Erzeugungsorientiertes Laden von Elektrofahrzeugen (AP 2.1)

In diesem Arbeitspaket wurden unterschiedliche Ladealgorithmen entwickelt. Die in diesem Arbeitspaket entwickelten Algorithmen basieren dabei auf der aktuellen lokalen Erzeugung aber auch auf der zentralen Erzeugung. Zur Umsetzung dieser Steuerung wurden im ersten Arbeitsschritt die technischen Inputparameter analysiert. Im nächsten Arbeitsschritt wurde eine Analyse der lokalen erneuerbaren Energieerzeugung und deren möglicher Nutzung für das Laden von Elektrofahrzeugen gemacht. Danach wurde ein Konzept zur Nutzung der lokalen Erzeugung für das Laden der Elektrofahrzeuge entwickelt. Im nächsten Arbeitsschritt wurden unterschiedliche Preismodelle zur Steuerung der Ladevorgänge entwickelt. Anschließend wurde ein Algorithmus entwickelt, der die zentrale erneuerbare Energie und die lokale erneuerbare Energie miteinander koppelt. Abschließend werden die unterschiedlichen Ladekonzepte auf Basis der Daten aus dem induktiven Feldtest miteinander verglichen.

Analyse der technischen Inputparameter für den Ladealgorithmus (AS 2.1.1)

In diesem Arbeitsschritt wurden die technischen Eingangsparameter für die unterschiedlichen Ladealgorithmen erfasst. Die Ermittlung fand dabei auf Basis der ISO 15118-2 statt. Diese Norm spezifiziert die Ladekommunikation zwischen Fahrzeug und Ladesäule. Abbildung 2-79 illustriert dies, wobei die Ladesäule mit einem Backendsystem über das Open Charge Point Protocol (OCPP) kommuniziert.

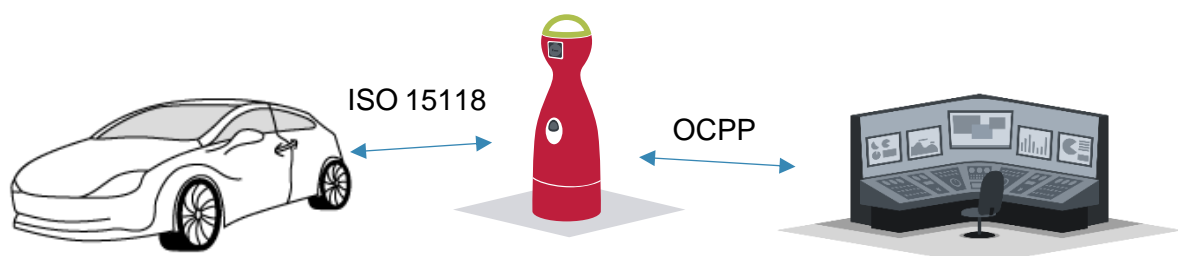


Abbildung 2-79: Illustration der beteiligten Normen beim Laden von Elektrofahrzeugen

Bei den in diesem Projekt genutzten e-Crafter findet diese Norm nur bei DC-Ladevorgängen Anwendung. Wichtige Eingangsparameter für die Erstellung der Ladealgorithmen sind

Energiebedarf des Fahrzeugs, Abfahrtszeit des Fahrzeugs und die max. Ladeleistung des Fahrzeugs. Die Abfahrtszeit des Fahrzeugs wurde häufiger nicht im Fahrzeug eingestellt, sodass auch hier Annahmen getroffen werden mussten. In Zukunft bietet es sich an, das Tool für die Tourenplanung an das Backendsystem zu koppeln, um so die Bedarfe der Fahrzeuge noch besser in die Algorithmen einbeziehen zu können. Dies stellt aus Sicht der Datensicherheit ein Problem dar, weil somit Rückschlüsse auf das Verhalten der Fahrer gezogen werden können. Diese Rückschlüsse können dabei sowohl auf die Fahrweise als auch auf die Routenführung erfolgen. Dies kann die Routenoptimierung durch den erfahrenen Fahrer betreffen aber auch das Vertrauen in die Fahrer, welches mit einer weniger strengen Überwachung einhergeht. Kritik an einer solchen strengen Überwachung gibt es bspw. bei anderen Logistikdienstleistern immer wieder (vgl. [MÜH21]). Für die Fahrzeuge, die in diesem Projekt induktiv laden, wurde ebenfalls eine Analyse der Inputparameter gemacht. Da die AC-Ladekommunikation der genutzten Fahrzeuge aktuell nur die Low-Level PLC-Kommunikation unterstützt, sind die Informationen über den Energiebedarf und die Abfahrtszeit leider nicht bekannt. Die Abfahrtszeit kann zwar im Fahrzeug eingestellt werden, wird jedoch nicht an die Ladesäule oder das Backend übertragen. Zur Erstellung der Ladealgorithmen wurden hierbei Annahmen getroffen, die auf den Anschlusszeitpunkten basieren. So wird beim Anschließen des Fahrzeugs außerhalb der normalen Geschäftszeiten zwischen 6 und 17 Uhr davon ausgegangen, dass das Fahrzeug erst wieder am nächsten Tag genutzt wird. Beim Anschließen innerhalb dieser Zeiten wird von einem kurzzeitigen Ladestopp ausgegangen, bei dem möglichst mit der maximalen Ladeleistung geladen werden soll. Dieser Ablauf wird in Abbildung 2-80 dargestellt. Zukünftig könnte ein Tourenmanagementsystem und das Lademanagementsystem über eine geeignete Schnittstelle miteinander gekoppelt werden, um Toureninformationen bei der Ladeplanung berücksichtigen zu können.

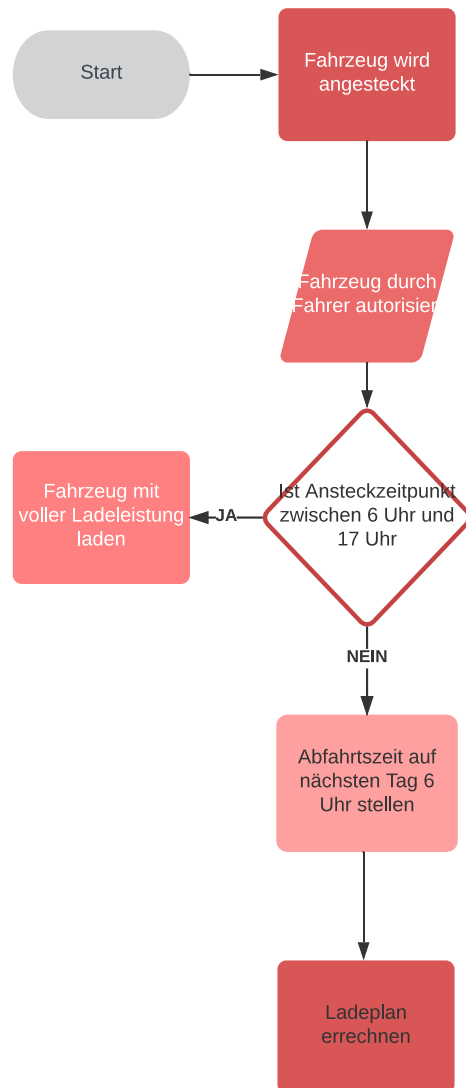


Abbildung 2-80: Ablaufplan für die Entscheidung eines Ladeplans oder Laden mit maximaler Ladeleistung

Ermittlung der nutzbaren lokalen erneuerbaren Energien (AS 2.1.2)

In diesem Arbeitsschritt wurden die unterschiedlichen Möglichkeiten zur Integration von lokalen erneuerbaren Energien ermittelt. Durch den innerstädtischen Standort des Feldtestpartners in Berlin konnte die Möglichkeit der Kleinwindenergieanlage ausgeschlossen werden, weil die Umgebungsbedingungen durch die dichte Bebauung und dem damit einhergehenden negativen Einfluss auf die Windgeschwindigkeit ungeeignet ist [QUA23]. Des Weiteren sind Kleinwindenergieanlagen preislich aktuell sehr unattraktiv. Dennoch könnten sich Kleinwindenergieanlagen in Zukunft in küstennahen Standorten ohne dichte Bebauung als wirtschaftlich erweisen, sofern sich die Anschaffungskosten entsprechend entwickeln. Hierbei können die Kosten einer PV-Anlage als Orientierung dienen, denn bei Kosten von

1.000 € pro kWp [IRE24] ist diese bereits wirtschaftlich für den Einsatz. Bei Kleinwindenergieanlagen können diese Kosten aufgrund des höheren Ertrags pro kWp sogar um ca. 20-30 % höher liegen. Die Kosten pro erzeugte kWh sind dann trotz höherer Kosten pro kWp aufgrund des höheren Ertrags ähnlich. Hierbei sind natürlich andere Randparameter wie Stromkosten und Flottenverhalten zu berücksichtigen, wobei sich eine Logistikflotte, welche über Nacht am Depot steht, für eine Windkraftanlage tendenziell eignet.

Eine PV-Anlage eignet sich für die lokale Versorgung der Fahrzeuge sehr gut, auch wenn der Eigenverbrauch auf Basis des Fahrverhaltens etwas eingeschränkt ist, weil die Fahrzeuge häufiger während des Erzeugungspeaks zur Mittagszeit im Einsatz sind. Allerdings sind einige Fahrzeuge auch immer wieder für kürzere Zwischenladungen und Beladung mit neuen Paketen am Standort. Außerdem konnte im Rahmen des Feldtests ermittelt werden, dass teilweise Transportrouten bereits zum Nachmittag abgeschlossen sind, sodass die Nachmittagserzeugung für das Laden der Fahrzeuge genutzt werden könnte (siehe konduktiver Feldtest). Bei der PV-Anlage bestehen unterschiedliche Ausrichtungsmöglichkeiten. Da das betrachtete Gebäude über ein Flachdach verfügt, kann die Anlage gen Süden oder Ost-West aufgeständert werden. Diese beiden Ausrichtungsmöglichkeiten haben unterschiedliche Vor- und Nachteile. Die Südausrichtung sorgt in einer optimalen Ausrichtung für den höchsten Ertrag bezogen auf die installierte Leistung. Sie erzeugt aber auch eine hohe Erzeugungsspitze und erlaubt durch die Verschattung der Module untereinander eine geringere Flächennutzung. Demgegenüber kann bei einer Ost-West Anlage eine höhere Leistung aufgrund der Aufständigung und geringeren Verschattung installiert werden. Außerdem wird der entstehende Erzeugungsspeak bezogen auf die Leistung durch die Aufteilung in verschiedene Himmelsrichtungen geringer. Aber diese Aufteilung in die unterschiedlichen Himmelsrichtungen sorgt gleichzeitig für einen geringeren Ertrag bezogen auf die Anlagenleistung. Durch die wetterabhängige Erzeugung der PV-Anlage muss weiterhin Energie aus dem Netz bezogen werden.

Eine Erweiterung einer PV-Anlage mit einem Batteriespeicher kann einen großen Vorteil für die lokale Versorgung darstellen. Dies ist aber auch von den Anschaffungskosten abhängig. Jedoch können bereits Preise bis 1.000 € pro kWh, was dem kWh Preis für Heimspeicher entspricht (vgl. [FIG22]), wirtschaftlich für den Betreiber sein. Gerade das Netz kann durch einen Speicher entlastet werden, in dem der Speicher die Erzeugungsspitze der PV-Anlage glättet. Gleichzeitig kann der Speicher zur Lastspitzenglättung verwendet werden und so Lastspitzen und damit auch Leistungspreise für den Betreiber reduzieren. Jedoch kann diese Betriebsweise im Konflikt mit der Kostenreduktion des Betreibers stehen. Denn diese Lastspitzenglättung kann auch durch ein dynamisches Lastmanagement erreicht werden, indem Fahrzeuge priorisiert geladen werden oder die Ladeleistung von allen Fahrzeugen gleichermaßen reduziert wird. Dies kann sich jedoch in einer Erhöhung des Energieverbrauchs widerspiegeln, da die Ladegeräte der Fahrzeuge oft nicht für einen Betriebspunkt außerhalb des Auslegungspunktes geeignet sind (vgl. [EUR21] und [RUD22]). Die Installation eines Batteriespeichers kann die benötigte Energie aus dem Netz verringern. Eine Senkung auf null

ist in einer sinnvollen Konfiguration nicht möglich, weil ansonsten der Speicher für geringe Stunden überdimensioniert werden müsste.

Tabelle 2-3: Gewählte Annahmen für die optimale Auslegung der Erzeugungsanlagen

	Kosten kWp PV-Anlage	Kosten kWh Batteriespeicher	Strompreis pro kWh
Geringe Kosten	1000 €/ kWp	500 €/ kWh	0,30 €/ kWh
Erhöhte PV-Anlagenkosten	1250 €/ kWp	500 €/ kWh	0,30 €/ kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten	1000 €/ kWp	750 €/ kWh	0,30 €/ kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten und PV-Anlagenkosten	1250 €/ kWp	750 €/ kWh	0,30 €/ kWh
Sehr hohe Batteriespeicherkosten	1000 €/ kWp	1000 €/ kWh	0,30 €/ kWh
Sehr hohe Batteriespeicherkosten und PV-Anlagekosten	1250 €/ kWp	1000 €/ kWh	0,30 €/ kWh
Hoher Strompreis	1000 €/ kWp	500 €/ kWh	0,40 €/ kWh
Erhöhte PV-Anlagenkosten und Strompreis	1250 €/ kWp	500 €/ kWh	0,40 €/ kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten und Strompreis	1000 €/ kWp	750 €/ kWh	0,40 €/ kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten, PV- Anlagenkosten und Strompreis	1250 €/ kWp	750 €/ kWh	0,40 €/ kWh
Hohe Batteriespeicherkosten und Strompreis	1000 €/ kWp	1000 €/ kWh	0,40 €/ kWh
Hohe Batteriespeicherkosten, PV-Anlagenkosten und Strompreis	1250 €/ kWp	1000 €/ kWh	0,40 €/ kWh

Um auf Basis des gemessenen Lastverlaufes eine optimale Dimensionierung der erneuerbaren Erzeugung vorzunehmen, wurde am elenia ein Optimierungstool zur optimalen Dimensionierung von Haushaltskomponenten entwickelt. In diesem Optimierungstool gehen

unterschiedliche Eingangsfaktoren ein. Dies sind unter anderem der Lastgang, Kosten für die Anschaffung der Erzeugungsarten, mögliche Begrenzungen durch den Standort, der Strompreis und weitere Faktoren. Das Ziel ist die Bestimmung einer optimalen Auslegung für das gewählte Lastprofil. Als Eingangsgröße wurde das Lastprofil aus dem konduktiven Feldtest verwendet. In Tabelle 2-3 sind die gewählten untersuchten Konfigurationen dargestellt. Es wurde sich dabei an Werten aus der Literatur orientiert [FIG22], [IRE24], [BDE24]. Die Ergebnisse der unterschiedlichen Konfiguration sind in Tabelle 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-4: Ergebnisse der optimalen Auslegung der unterschiedlichen Erzeugungsarten

	Größe PV-Anlage	Größe Batteriespeicher
Geringe Kosten	50 kWp	32 kWh
Erhöhte PV-Anlagenkosten	24,9 kWp	13,9 kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten	39 kWp	3,5 kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten und PV-Anlagenkosten	21,1 kWp	2,9 kWh
Sehr hohe Batteriespeicherkosten	39,8 kWp	0 kWh
Sehr hohe Batteriespeicherkosten und PV-Anlagekosten	20,2 kWp	0 kWh
Hoher Strompreis	50 kWp	63,6 kWh
Erhöhte PV-Anlagenkosten und Strompreis	50 kWp	63,6 kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten und Strompreis	50 kWp	30 kWh
Erhöhte Batteriespeicherkosten, PV-Anlagenkosten und Strompreis	33 kWp	16,9 kWh
Hohe Batteriespeicherkosten und Strompreis	50 kWp	5 kWh
Hohe Batteriespeicherkosten, PV-Anlagenkosten und Strompreis	28,8 kWp	4,2 kWh

Dabei fällt auf, dass ein sehr hoher Strompreis, wie dieser in 2023 vorgeherrscht hat, Unternehmen dazu anreizt, eigene Erzeugung zu installieren. Je nach Preis der Anlagen fallen die Größen der Anlagen unterschiedlich aus. Es lassen sich allerdings keine allgemeinen Empfehlungen aussprechen, weil dies immer einzelfallabhängig von unterschiedlichen Faktoren ist. Eine eigene PV-Anlage lohnt sich generell in vielen Fällen.

Eine weitere Möglichkeit der lokalen Energieversorgung bietet die Versorgung durch ein Blockheizkraftwerk. Dabei können für eine CO₂-neutrale Versorgung entweder Biogase oder andere CO₂-neutrale Brennstoffe verwendet werden. Das BHKW bietet neben der guten Steuerbarkeit der Erzeugung und der damit einhergehenden Möglichkeit der Anpassung der Erzeugung an den Verbrauch auch die Möglichkeit, die Abwärme für den Heizbedarf am Standort zu verwenden. Allerdings gibt es aktuell große Diskussionen über den Ausbau solcher BHKWs, da diese weiterhin einen großen Teil CO₂ ausstoßen, auch wenn sie über die Bilanz gesehen als CO₂-neutral angesehen werden. Daneben sind die Stromerzeugungskosten sehr stark abhängig von der genutzten Wärmeenergie [UBA24], [ENE24]. Denn wenn dort nicht das Optimum erzielt wird, erhöht das die entstehenden Stromgestehungskosten. Da das in diesem Projekt betrachtete Gebäude ein Logistikgebäude ohne größere beheizte Bürofläche ist, kann davon ausgegangen werden, dass der Heizbedarf in diesem Fall nicht sehr hoch ist. Dadurch ist die genutzte Heizenergie deutlich geringer als die produzierte Energie, sodass die Kosten der Stromerzeugung nicht auf ein sinnvolles Maß gesenkt werden können. Außerdem werden viele Ladevorgänge in der Nacht durchgeführt. Dadurch ist die Nutzung der entstehenden Abwärme nicht zu den Bürozeiten vorhanden, sodass die Nutzung weniger effizient ist. Durch die Anpassung der Erzeugung an den Verbrauch des Standortes kann ein BHKW eine netzdienliche Fahrweise annehmen, indem Netzzustände wie bspw. Spannung am Netzverknüpfungspunkt in die Betriebsweise integriert werden. Dies kann bspw. eine einfache Leistungsanpassung analog einer P(U) Regelung sein. Daher kann ein Stromgeführtes BHKW bei einem passenden Gebäude durchaus eine gute Ergänzung eines möglichen Energiekonzeptes sein.

Entwicklung eines Ladekonzeptes für die lokale Versorgung der Fahrzeuge aus erneuerbaren Energien (AS 2.1.3)

Zur Versorgung der Fahrzeuge aus erneuerbaren Energien wurde ein Ansatz ermittelt, welcher auf Basis einer PV-Prognose einen Ladeplan für die Fahrzeuge erstellt. In diesen Ladeplan gehen auch die ermittelten Parameter aus AS 2.1.1 ein. Bei der Erstellung des Ladeplans werden auch die restlichen Verbräuche am Standort mitberücksichtigt. Hierbei wird auf Basis der Standardlastprofile eine Prognose für den Standort erstellt und die zur Verfügung stehende PV-Leistung entsprechend reduziert. Der erstellte Ladeplan hat hierbei das Ziel, die lokale erneuerbare Energie bestmöglich zu nutzen. Allerdings soll zuerst der Bedarf der Liegenschaft erfüllt werden und im Anschluss erst der Bedarf der Elektrofahrzeuge. Bei der Vorhersage der PV-Anlage spielt die Prognosegenauigkeit des Wetters eine sehr große Rolle, denn unvorhergesehene Erzeugungseinbrüche können zur Nichterfüllung des Ladebedarfs führen. In Abbildung 2-81 ist eine Prognose für die PV-Erzeugung zu sehen. Dabei ist die Linie die zu erwartende Erzeugung, wohingegen die leichte Färbung das prognostizierte Prognoseintervall darstellt. Umso weiter die Prognose in der Zukunft ist, umso größer wird das Intervall.

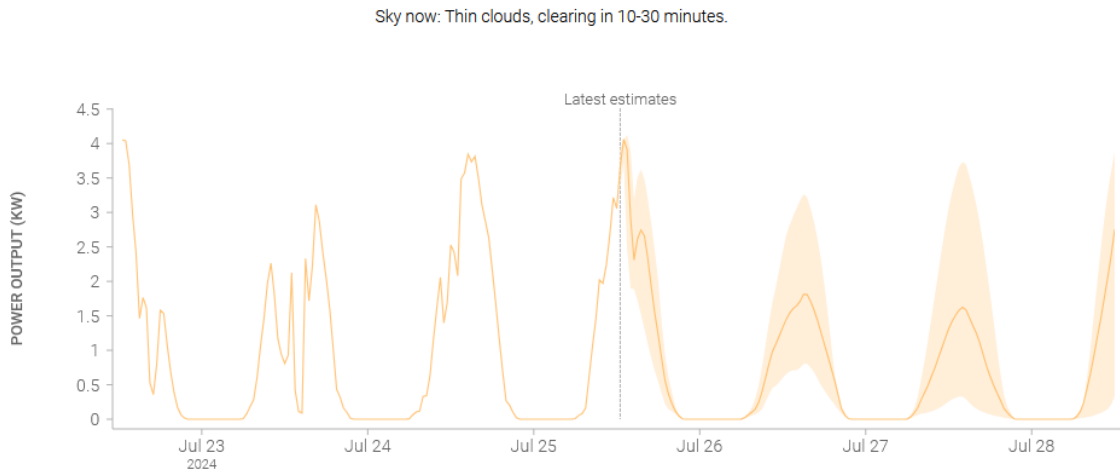


Abbildung 2-81: Beispielhafte Prognose der PV-Erzeugung [SOL24]

Daher werden Prognosen in ferner Zukunft mit einem höheren Unsicherheitsfaktor versehen als Prognosezeitpunkte in naher Zukunft. Eine Neuverhandlung des Ladeplans findet nur bei einer großen und relevanten Abweichung von der Prognose statt. Diese Neuverhandlung findet sowohl bei Abweichungen von der Lastprognose als auch bei Abweichungen von der Erzeugungsprognose statt. Das Thema der Prognose der erneuerbaren Erzeugung stellt oftmals ein Problem beim Energiemanagement dar. In Zukunft ist es denkbar auch andere Erzeugungsarten bei der Erstellung des Ladeplans zu berücksichtigen. Auf Basis der erzielten Ergebnisse in AS 2.1.2 wurde jedoch auf die Einbindung dieser verzichtet. Die erstellte Software ist hierbei so modular aufgebaut, dass eine weitere Erzeugungsquelle einfach zur PV-Prognose addiert werden kann.

Entwicklung von Preismodellen auf Basis zentraler erneuerbaren Energien (AS 2.1.4)

Im Rahmen dieses Arbeitsschritts wurden unterschiedliche Preismodelle erstellt. Die erstellten Preismodelle haben hierbei unterschiedliche Zieldimensionen. Das erste Preismodell ist ein Modell, welches auf Basis von Vergangenheitsdaten [STU21] ein lernendes Modell darstellt und auf Basis einer erwarteten Erzeugung Preise berechnet. Diese Preise können auf Basis der deutschen Handelszone erstellt werden oder auf lokalere Bereiche runtergebrochen werden. Als Zielführend hat sich dabei eine Unterteilung auf die Übertragungsnetzbetreiber erwiesen [EBB22]. Dies kann zu einer Entzerrung der Ladevorgänge über die unterschiedlichen Netzgebiete führen und somit die Gleichzeitigkeit von Ladevorgängen deutschlandweit senken. In Abbildung 2-82 ist ein Auszug der entstehenden Preise zu sehen. Hierbei ist erkennbar, dass sich der Preisverlauf der unterschiedlichen Netzgebiete unterscheidet und somit zu anderen Ladezeiträumen führt. Des Weiteren eignet es sich dazu, die erneuerbare Erzeugung in der näheren Umgebung in die Ladeplanerstellung einzubinden. Aktuell wird in Deutschland über eine Unterteilung in unterschiedliche Preiszonen diskutiert, sodass ein solches Preismodell durchaus eine zukünftige Entwicklung sein könnte [AGO23].

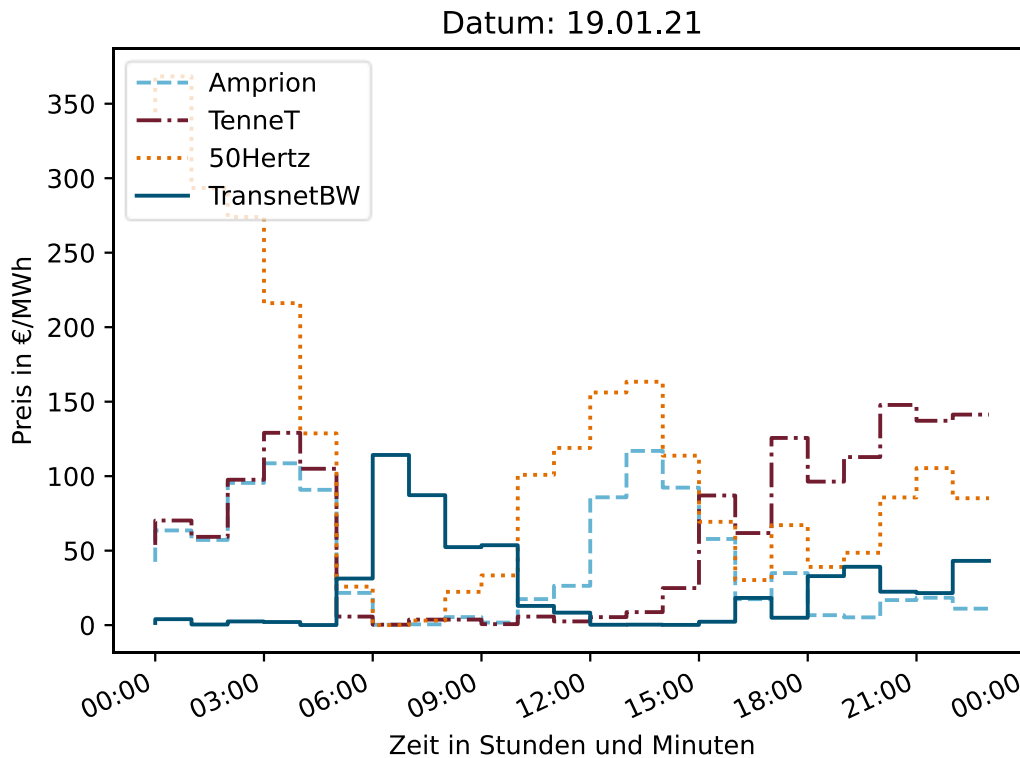


Abbildung 2-82: Preisverlauf des entwickelten Preismodells auf Basis der Übertragungsnetzbetreiberzonen

Alternativ kann auch eine Unterteilung auf Verteilnetzgebiete erfolgen. Hierbei sollten die Verteilnetzbetreiber aber bereits eine gewisse Größe vorweisen, weil ansonsten das Last- und Erzeugungsverhalten der unterschiedlichen Kraftwerke nicht sinnvoll sind und dies zu extremen Verzerrungen führen kann.

Ein weiteres entwickeltes Preismodell wurde auf Basis der Erzeugung und der einhergehenden CO₂-Emissionen der unterschiedlichen Erzeugungsarten erstellt. Hierbei wurden alle Erzeugungsarten mit dem spezifischen CO₂-Ausstoß verrechnet (siehe Tabelle 2-5). Im nächsten Schritt wurden diese Gesamtemissionen mit dem einheitlichen CO₂-Preis verrechnet.

Tabelle 2-5: CO₂-Äquivalente für verschiedene Kraftwerke [LÜB07], [GAS22], [RAU12], [QUA22]

Stromquellen	CO₂-Äquivalente in g/kWh
Kernkraftwerk (Uran nach Import-Mix)	32
Braunkohle-Kraftwerk	831
Steinkohle-Kraftwerk	663
Erdgas-Kraftwerk	340
Solarstrom Deutschland	48
Windpark Onshore	10
Windpark Offshore (ohne zusätzliche Netzanbindung)	5
Wasserkraftwerk	6
Geothermische Kraftwerk	7
Biomassekraftwerke	102
Öl	277

Entwicklung eines Konzeptes für die Versorgung der Fahrzeuge aus zentralen erneuerbaren Energien (AS 2.1.5)

Da erneuerbare Energien eine senkende Wirkung auf den Strompreis haben, wurde im Rahmen dieses Arbeitsschrittes ein Konzept entwickelt, welches das Laden der Elektrofahrzeuge auf Basis von Preisdaten ermöglicht. Dabei wird ein Ladeplan auf Basis der verfügbaren Preisdaten wie bspw. EPEX Spot [ENT24] oder auf Basis der in AS 2.1.4 entwickelten Preismodelle erstellt. Hierbei werden günstige Zeitpunkte priorisiert und das Elektrofahrzeug zu den geringstmöglichen Kosten im Ladezeitraum geladen. Daneben gehen auch wieder die in AS 2.1.1 ermittelten Parameter in die Erstellung der Ladepläne mit ein. Zusätzlich besteht die Möglichkeit die Leistung des Standorts zu begrenzen, um das Netz zu entlasten beziehungsweise die Gleichzeitigkeit der Fahrzeuge zu verringern.

Entwicklung eines übergeordneten Gesamtkonzeptes zum Laden der Elektrofahrzeuge (AS 2.1.6)

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurde ein Gesamtkonzept zum Laden der Elektrofahrzeuge erstellt. Hierbei wird ein Ladeplan erstellt, der zuerst vorrangig das Laden aus lokal verfügbaren erneuerbaren Energien ermöglicht. Anschließend wird die restliche Energie zu möglichst geringen Kosten geladen. Dieses Konzept ist in Abbildung 2-83 dargestellt.

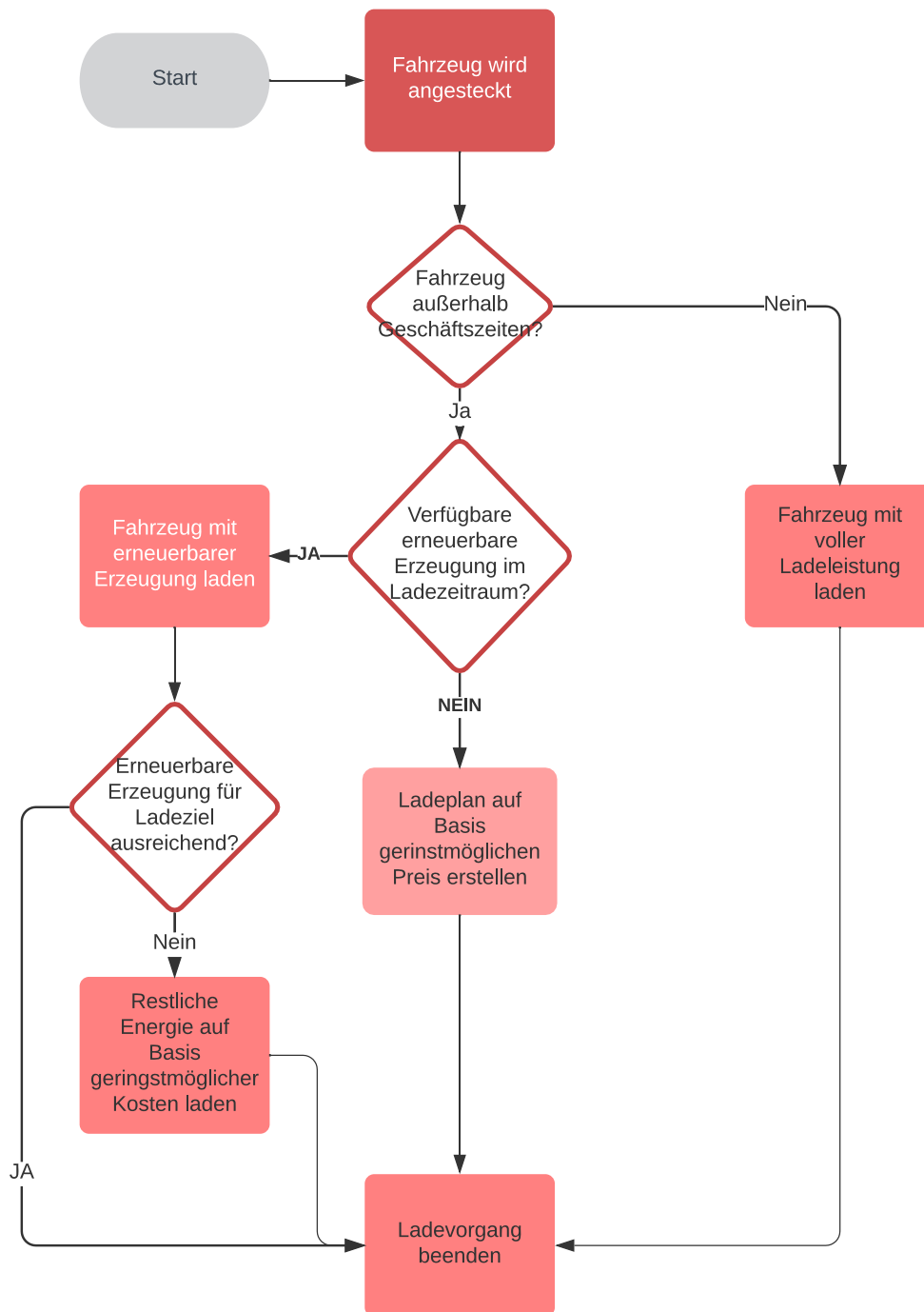


Abbildung 2-83: Schematischer Ablauf zur Erstellung eines Ladeplans

Einbindung und Erprobung des Gesamtkonzeptes (AS 2.1.7)

Im Rahmen dieses Arbeitsschrittes wurden die Ladekonzepte in ein Energiemanagement integriert und im Labor des elenia erprobt. Hierbei muss beachtet werden, dass die Steuerung auf die Begebenheiten angepasst werden musste, weil das Fahrverhalten der Fahrzeuge ein anderes als in der betrachteten Logistikflotte ist. In diesem Fall ist es das Verhalten eines

typischen Arbeitnehmers, der morgens ankommt und nach ca. 9 Stunden den Parkplatz wieder verlässt. Dies wurde bei der Ermittlung des Abfahrtszeitpunktes entsprechend berücksichtigt. Da die Fahrzeuge hierbei auch meistens über den Tag anwesend sind, sind die Ergebnisse teilweise nicht übertragbar, weil die Fahrzeuge der Logistikflotte teilweise nicht so lange über den Mittag und damit den Erzeugungsspeak der Fahrzeuge verfügbar sind.

Durch die Ermittlung eines Abfahrtszeitpunktes und dem Ausgehen von Anhaltspunkten kann dies dazu führen, dass Fahrzeuge, die ein außergewöhnliches Fahrverhalten haben, nicht vollgeladen sind. Dies könnte zu Einschränkungen in der Tourenplanung führen. Mögliche Lösungen hierfür können eine Schnittstelle zur Routenplanung oder ein System sein, dass auf Basis der Vergangenheit Muster der Routenplanung erkennt und so die Abfahrtszeitpunkte besser ermittelt.

Auswertung der Ladekonzepte (AS 2.1.8)

Mit Hilfe der gewonnenen Resultate aus dem Feldtest wurden die unterschiedlichen Ladestrategien und Preismodelle ausgewertet und miteinander verglichen. Die Modelle wurden dabei einmal ohne eine Lastbegrenzung und einmal mit einer Lastbegrenzung ausgeführt, weil aus den Feldtestdaten ersichtlich war, dass ein theoretisches Potential zur Reduktion der Spitzenlast besteht. Für die Lastgrenze wurde 25 kW gewählt, weil in 99,5 % der Zeit die Last unterhalb dieser Grenze war.

Die Auswertung der unterschiedlichen Strategien erfolgt dabei anhand unterschiedlicher Faktoren. Zum einen werden die resultierenden Kosten auf Basis eines variablen Stromtarifs wie zum Beispiel awattar [AWA24] ermittelt. Dieses Ergebnis wird mit dem Ergebnis eines konventionellen Stromtarifs verglichen. Außerdem werden die entstehenden CO₂-Emissionen auf Basis der berechneten Werte ermittelt. Außerdem wird in einigen Fällen eine Erzeugung durch eine PV-Anlage mit einbezogen. Die Erzeugungsdaten stammen hierbei aus einer realen Forschungsanlage am elenia. Außerdem wurde der entstehende maximale Gleichzeitigkeitsfaktor der Elektrofahrzeuge berechnet. Die Ergebnisse ohne eine externe Lastbegrenzung für die unterschiedlichen Fälle sind in Tabelle 2-6 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass die Gleichzeitigkeit der Fahrzeuge bei preisorientierten Ansätzen gegenüber von ungesteuerten Ansätzen gesteigert wurde. Es zeigt sich hierbei, dass bereits eine Orientierung an den CO₂-Emissionen zu einer deutlichen Reduktion der Stromkosten führt. In dem Zeitraum des durchgeführten Feldtests wäre es in allen Konfigurationen sinnvoll gewesen, einen variablen Stromtarif zu nutzen. Eine signifikante Verbesserung lässt sich bereits durch eine PV-Anlage ohne ein Lademanagement erreichen.

Tabelle 2-6: Ergebnisse der unterschiedlichen Fälle ohne Leistungsbegrenzung

Kennzahl	Ungesteuer-tes Laden	Ungesteuert mit PV	Preisgesteuer-tes Laden	Preis- und PV-gesteuertes Laden	CO ₂ -gesteuertes Laden
Maximale Netzbezugsleistung	46,27 kW	46,27 kW	46,82 kW	46,82 kW	46,84 kW
Maximale Gleichzeitigkeit der BEVs	0,876	0,876	0,887	0,887	0,887
CO ₂ -Emissionen	18.143 kg	16.060 kg	15.016 kg	14.671 kg	14.020 kg
Kosten variabler Stromtarif	15.207,99 €	13.302,34 €	11.982,72 €	11.746,25 €	12.465,63 €
Kosten mit Leistungspreis	15.689,74 €	13.784,09 €	12.464,47 €	12.228,00 €	12.947,38 €
Kosten normaler Stromtarif	19.379,52 €	16.530,54 €	15.980,33 €	15.535,13 €	15.822,79 €
Eigenverbrauch PV-Energie	Nicht inkludiert	6.414,75 kWh	7.665,79 kWh	8.691,86 kWh	7.887,35 kWh
Einspeisung PV-Anlage	Nicht inkludiert	5.537,02 kWh	4.285,97 kWh	3.259,91 kWh	4.064,41 kWh

Bei den Ergebnissen mit einer Leistungsbegrenzung von 25 kW in Tabelle 2-7 zeigt sich, dass eine PV-Anlage dafür sorgt, dass zu einigen Zeitpunkten eine höhere Leistung für die Ladevorgänge genutzt werden kann. Des Weiteren steigen die Kosten für variable Stromtarife nur gering, da es zu einer vermehrten Nutzung von PV führt. Wenn die Mehrkosten einem Leistungspreis gegenübergestellt werden, lassen sich gegenüber dem Lademanagement ohne Leistungsbegrenzung Kosten einsparen. Denn der aktuelle Leistungspreis in Berlin betrug im Jahr 2023 10,25 €/kW [KOG23]. Durch solche Anreize kann bereits eine Netzreduktion angeregt werden.

Tabelle 2-7: Ergebnisse der unterschiedlichen Fälle mit einer Leistungsbegrenzung von 25 kW

Kennzahl	Ungesteuer- tes Laden	Ungesteuert mit PV	Preisgesteuer- tes Laden	Preis- und PV- gesteuertes Laden	CO ₂ - gesteuertes Laden
Maximale Leistung	25 kW	30,34 kW	32,45 kW	32,45 kW	32,45 kW
Maximale Netzbezugs- leistung	25 kW	25 kW	25 kW	25 kW	25 kW
Maximale Gleichzeitig- keit der BEVs	0,473	0,574	0,615	0,615	0,615
CO ₂ - Emissionen	18.137 kg	16.055 kg	15.009 kg	14.669 kg	14.076 kg
Kosten variabler Stromtarif	15.179,28 €	13.274,96 €	11.993,84 €	11.759,37 €	12.507,13 €
Kosten mit Leistungspreis	15.435,53 €	13.531,21 €	12.250,09 €	12.015,62 €	12.763,38 €
Kosten normaler Stromtarif	19.374,61 €	16.527,37 €	15.976,74 €	15.532,13 €	15.881,24 €
Eigenver- brauch PV- Energie	Nicht inkludiert	6.414,75 kWh	7.667,24 kWh	8.692,50 kWh	7.890,55 kWh
Einspeisung PV-Anlage	Nicht inkludiert	5.537,02 kWh	4.284,53 kWh	3.259,27 kWh	4.061,22 kWh

2.3.2 Konzepte für netzorientiertes Laden von Elektrofahrzeugen (AP 2.2)

Netzorientierte Methoden

In Bezug auf das netzorientierte Laden werden zunächst bereits vorhandene netzorientierte Betriebsweisen aus anderen Bereichen wie PV-Anlagen betrachtet, die auch beim Laden von Elektrofahrzeugen anwendbar sind. Es werden ein fester Verschiebungsfaktor $\cos\varphi$, eine wirkleistungsabhängige Verschiebungsfaktorkennlinie $\cos\varphi(P)$ und eine spannungsabhängige Blindleistungsbereitstellung $Q(U)$ zur statischen Spannungshaltung betrachtet. Diese stammen aus der VDE-AR-N 4105 für Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz [VDE18]. Zusätzlich wird eine spannungsabhängige Wirkleistungsanpassung $P(U)$ untersucht, welche ebenfalls in der VDE-AR-N 4105 erwähnt wird [VDE18]. Die VDE-AR-N 4105

berücksichtigt maßgeblich die symmetrisch dreiphasige Anwendung dieser Methoden. Neben der symmetrischen Anwendung bei dreiphasigen Laden wird im Projekt auch eine phasengenaue Anwendung der Methoden betrachtet, um eine Möglichkeit zu bieten, Spannungsunsymmetrie zu reduzieren. Bei der phasengenauen Anwendung wird jeder Außenleiter separat geregelt. Die phasengenauen Ansätze können auch bei ein- und zweiphasigen Ladevorgängen angewendet werden. Weiterhin wird eine Blindleistungsbereitstellung in Abhängigkeit der Phasenverschiebung der Spannungen $Q(\Delta\varphi_U)$ untersucht, die phasengenaue regelt. Für die betrachteten Ansätze sind als Eingangsparameter die Effektivwerte der Netzspannung, die Wirkleistung der Ladeeinrichtung und die Phasenwinkel der Spannungen am Netzanschlusspunkt des Ladepunkts erforderlich. Für die phasengenauen Ansätze sind die Parameter separat für jede Phase erforderlich. Bei den symmetrischen dreiphasigen Ansätzen ist der Mittelwert der Netzspannung der drei Phasen und die Gesamtwirkleistung über alle Außenleiter ausreichend. Die Istwerte der Eingangsparameter müssen für die Anwendung der Ansätze gemessen werden.

Die VDE-AR-N 4100 für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz berücksichtigt bereits Maßnahmen zur statischen Spannungshaltung für Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge. Für DC-Ladepunkte und induktive Ladepunkte mit einer Nennleistung größer 12 kVA kann der Netzbetreiber eine Methode zur Blindleistungsbereitstellung fordern. Es kann zwischen den drei Methoden der VDE-AR-N 4105 gewählt werden. Der Verschiebungsfaktor muss im Bereich von 0,9 untererregt und 0,9 übererregt liegen. [VDE19]

Bei dem Ansatz, einen konstanten Verschiebungsfaktor einzustellen, wird für Ladeeinrichtungen mit einer Bemessungsleistung $\leq 4,6$ kVA in Anlehnung an die VDE-AR-N 4105 ein Wert von 0,95 übererregt genutzt. Im Gegensatz dazu wird bei einer Bemessungsleistung $> 4,6$ kVA ein Wert von 0,9 übererregt verwendet. Es wird übererregtes Verhalten gewählt, um Spannungsfälle durch die Ladeleistung entgegenzuwirken. Abbildung 2-84 zeigt die $\cos\varphi(P)$ und Abbildung 2-85 die $Q(U)$ -Kennlinie. Die maximale Blindleistung der $Q(U)$ -Kennlinie entspricht dem Blindleistungswert bei maximaler Ladeleistung und einem Verschiebungsfaktor von 0,95 bzw. 0,9. Abbildung 2-86 stellt die $P(U)$ -Kennlinie dar.

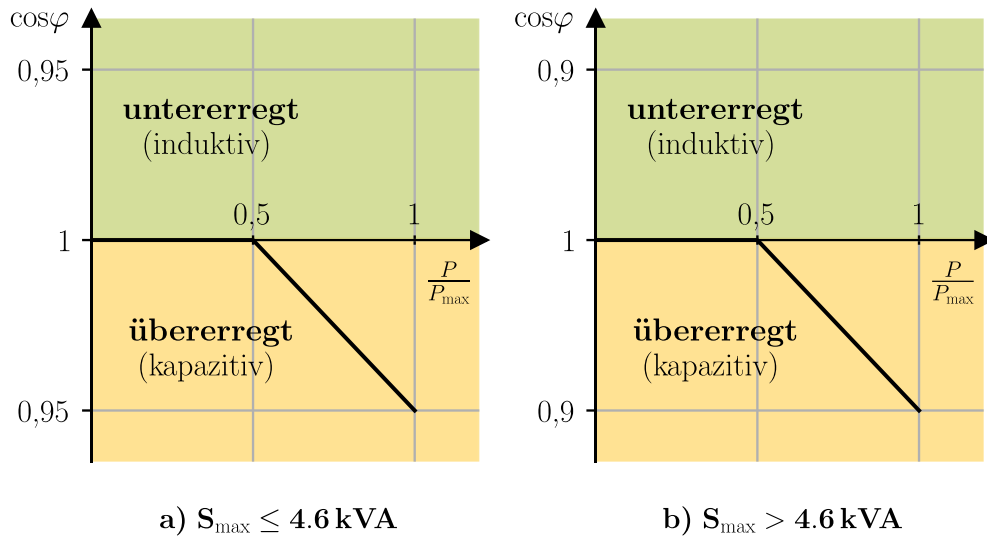


Abbildung 2-84: $\cos\phi(P)$ -Kennlinien in Anlehnung an [VDE18] und [DIM23]

Bei den symmetrischen Varianten von $Q(U)$ und $P(U)$ wird der Mittelwert der drei Phasenspannungen für die Kennlinien genutzt. Die Leistung wird durch die Regelungen dann gleichmäßig auf allen drei Phasen angepasst. Bei den phasengenauen Varianten werden die Kennlinien der $Q(U)$ und $P(U)$ separat pro Phase angewendet. Es wird für jeden Außenleiter die jeweilige Phasenspannung genutzt. Die maximale Leistung der Kennlinie entspricht pro Außenleiter der gesamten maximalen Leistung geteilt durch die Anzahl der genutzten Phasen.

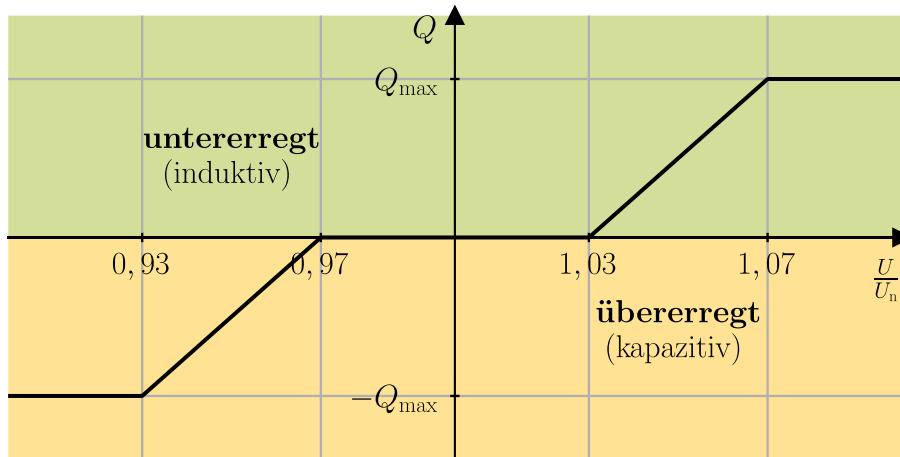


Abbildung 2-85: $Q(U)$ -Kennlinie in Anlehnung an [VDE18] und [DIM23]

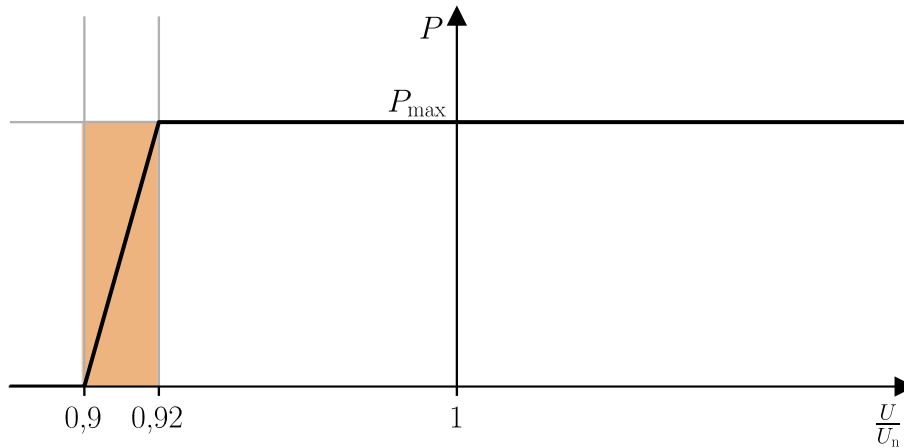


Abbildung 2-86: P(U)-Kennlinie in Anlehnung an [WUS19] und [DIM23]

Abbildung 2-87 und Abbildung 2-88 zeigen die beiden $Q(\Delta\varphi_u)$ -Kennlinien zur Einstellung der Blindleistung Q in Abhängigkeit von der Phasenverschiebung zwischen den Spannungen. Q_{\max} entspricht der Blindleistung, die bei maximaler Wirkleistung und einem Verschiebungsfaktor von 0,95 oder 0,9 vorhanden ist. 0,95 wird für Nennleistungen $\leq 4,6$ kVA und 0,9 für Nennleistungen $> 4,6$ kVA verwendet. Da der Phasenwinkel einer Phase immer an der Berechnung von zwei Phasenverschiebungen beteiligt ist, werden zwei Kennlinien benötigt. Abbildung 2-87 gilt für die Phasenverschiebung, bei der die Phase der Minuend ist, und Abbildung 2-88 gilt für die Phasenverschiebung, bei der sie der Subtrahend ist. Wenn die Blindleistung für eine Phase bei beiden Kennlinien das gleiche Vorzeichen hat, wird eine Blindleistungseinstellung vorgenommen. Dies ist notwendig, um sicherzustellen, dass nur dann Blindleistung bereitgestellt wird, wenn die beiden Phasenverschiebungen in entgegengesetzter Richtung von -120° abweichen. Es wird der größere der beiden Werte eingestellt, die sich aus den beiden Kennlinien ergeben. Untererregtes Verhalten führt zu einer Drehung des Spannungszeigers am Anschlusspunkt des Gerätes gegen den Uhrzeigersinn, während übererregtes Verhalten den Spannungszeiger im Uhrzeigersinn drehen lässt. [DIM24]

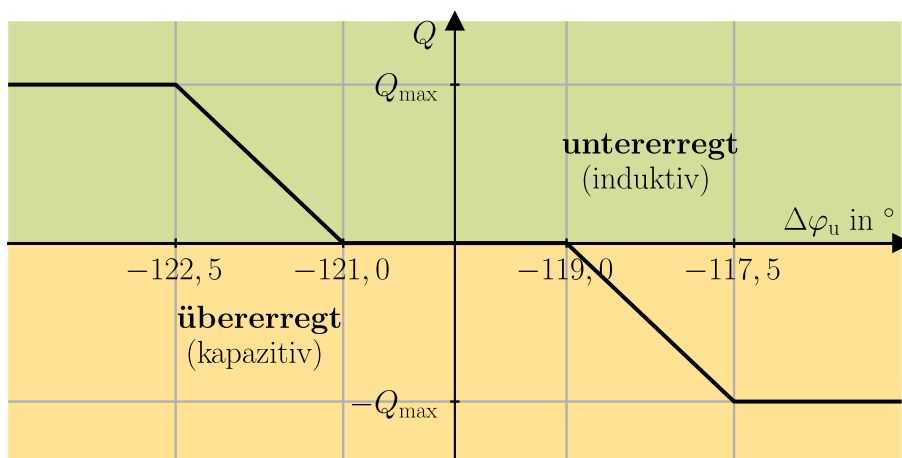


Abbildung 2-87: $Q(\Delta\varphi_u)$ -Kennlinie für Minuend in Phasenverschiebung in Anlehnung [DIM24]

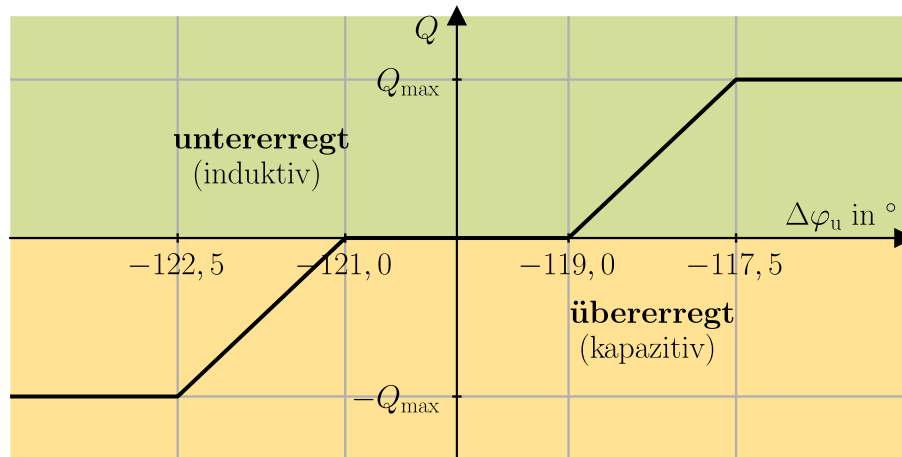


Abbildung 2-88: $Q(\Delta\varphi_u)$ -Kennlinie für Subtrahend in Phasenverschiebung in Anlehnung [DIM24]

Für die entwickelte induktive Ladestation kommen ausschließlich die symmetrischen Varianten von $\cos\varphi$, $\cos\varphi(P)$, $Q(U)$ und $P(U)$ infrage, weil das AFE symmetrisch dreiphasig arbeitet. Jedoch werden in den simulativen Untersuchungen und Laboruntersuchungen alle Methoden untersucht, weil die Ansätze beispielsweise auch für andere Anwendungen wie z. B. AC-Laden genutzt werden können. Auf die $Q(\Delta\varphi_u)$ wird ausschließlich in den Laboruntersuchungen in Abschnitt 2.3.3 eingegangen.

Simulationsmodell und Szenarien

Die Regelungsmethoden werden simulativ mit der Netzberechnungssoftware DlgSILENT PowerFactory untersucht. Es werden unsymmetrische quasidynamische Simulationen mit einer Zeitschrittweite von 1 min durchgeführt. Die Simulationen werden mithilfe eines entwickelten Python-Skripts automatisiert. Darüber hinaus wird ein Elektrofahrzeugmodell in Python realisiert, das Lastprofile für Elektrofahrzeuge erzeugt und die Regelungsansätze implementiert. Die Schnittstelle zwischen den Python-Skripten und PowerFactory wird über die Python-API von PowerFactory realisiert. Für die Untersuchungen wird ein Netzmodell für ein Vorstadtnetz verwendet, das qualitativ in Abbildung 2-89 dargestellt ist. Es basiert auf dem Vorstadtnetzmodell, dass im Rahmen der Veröffentlichung [LIN16] entstanden ist. Strang 8 des Netzes ist am längsten und besitzt insgesamt 17 Haushalte. Da dies der kritische Strang ist, liegt der Fokus der Untersuchungen auf diesem. [DIM23]

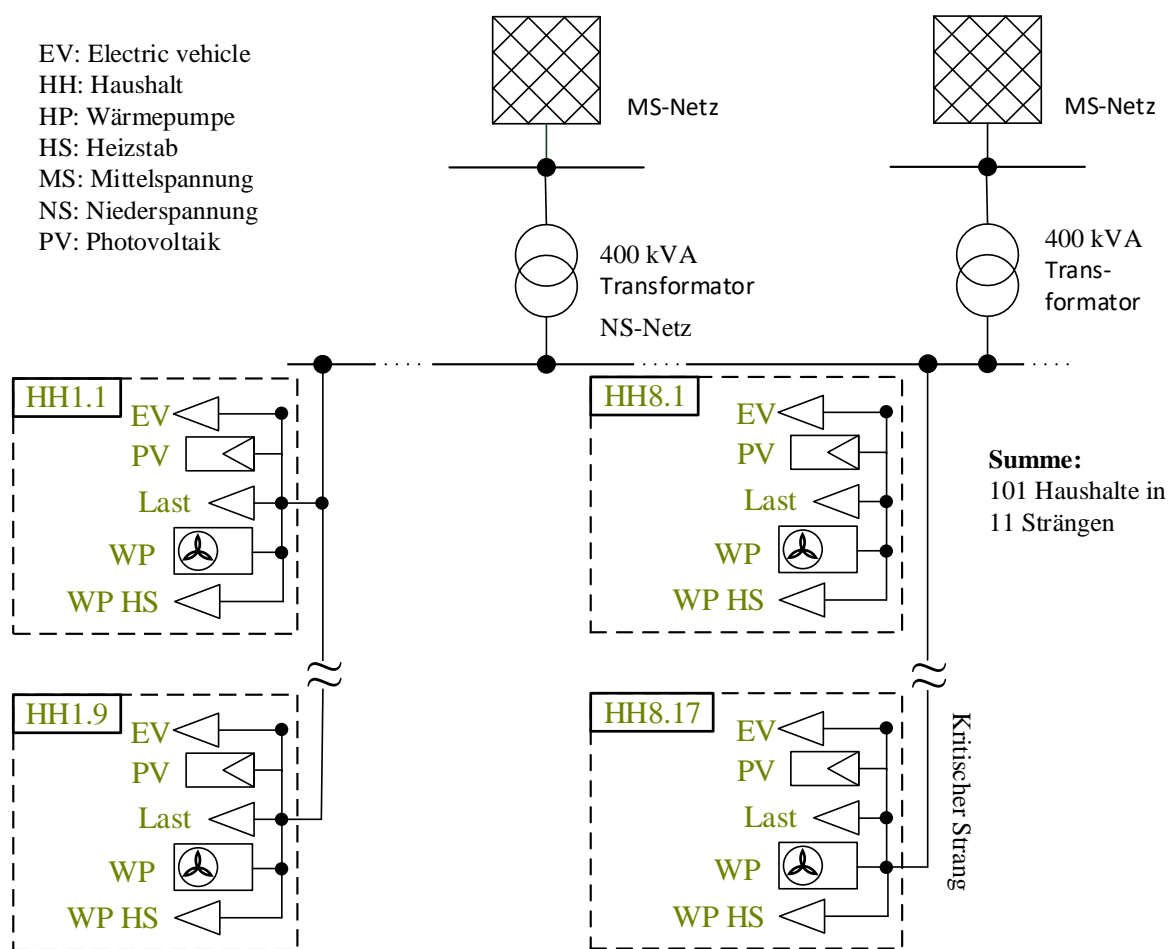


Abbildung 2-89: Netzmodell für ein Vorstadtnetz in Anlehnung an [DIM23]

Jeder Haushalt des verwendeten Netzmodells enthält eine Haushaltslast sowie optional ein Elektrofahrzeug, eine PV-Anlage, eine Wärmepumpe und einen Heizstab. Für die Untersuchungen wurden die Szenarien in Tabelle 2-8 definiert, die auf der Studie [VAN21] basieren. Die optionalen Komponenten werden den Haushalten auf Basis der definierten Durchdringungsszenarien in Tabelle 2-8 mittels eines Zufallsgenerators zugeordnet. Zusätzlich ordnet der Zufallsgenerator den Komponenten Last- oder Erzeugungsprofile aus einem Pool zu. Für den Zufallsgenerator wird ein Seed gesetzt, damit die Simulationen mit gleichen Rahmenbedingungen durchgeführt werden können. Als Datengrundlage für die Last- und Erzeugungsprofile der Komponenten werden verschiedene Quellen und Modelle verwendet. Die Haushaltslastprofile (74 verschiedene) stammen aus [TJA15] und die PV-Erzeugungsprofile (24 verschiedene) aus dem Profilgenerator der Quelle [BUN15]. Die Haushaltsprofile enthalten sowohl die Wirkleistung als auch die Blindleistung und sind für die drei Phasen getrennt verfügbar. Die Leistung der PV-Profile wird gleichmäßig auf die drei Phasen verteilt und es wird keine Blindleistung berücksichtigt. Der Nennleistungsbereich der PV-Profile liegt zwischen 3,69 kW und 9,56 kW. Die Lastprofile der Wärmepumpen (20 verschiedene) basieren auf einem Modell der Forschungsgemeinschaft für Elektrische Anlagen und Stromwirtschaft e. V., das in [VAN21] beschrieben ist. Die Wärmepumpen sind dreiphasig und haben einen Verschiebungsfaktor von 0,8. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, einige der Wärmepumpenprofile mit Heizelementen zu erweitern, die in einigen

Wärmepumpen zur Unterstützung bei niedrigen Temperaturen eingesetzt werden. Diese werden einphasig angeschlossen. Für die Lastprofile der Elektrofahrzeuge wird das entwickelte Elektrofahrzeugmodell verwendet. [DIM23]

Tabelle 2-8: Durchdringungsszenarien in Anlehnung an [VAN21]

Durchdringung	Elektrofahrzeuge	PV-Anlagen	Wärmepumpen
Gering	20 %	20 %	20 %
Hoch	95 %	70 %	80 %
Maximal	100 %	100 %	100 %

Das entwickelte Elektrofahrzeugmodell basiert auf einer Datenbank mit Fahrzeugen verschiedener Hersteller und Modelle, auf ein standardisiertes CCCV-Ladeprofil, das anhand der Messung eines Renault Zoe (Baujahr 2020) [BIE21] erstellt wurde, und auf Mobilitätsdaten aus [NOB18]. Die Datenbank der Fahrzeuge enthält relevante technische Parameter wie Batteriekapazität, Ladeleistung, verwendete Phasen und Energieverbrauch. Die Daten für die Datenbank wurden aus den Quellen [WEE22] und [WIE21] entnommen. Der Zufallsgenerator ordnet den Haushalten des Netzmodells mit Elektrofahrzeug zufällig einen Fahrzeugtyp zu. Zusätzlich ist es möglich, dem Datensatz eine Gewichtung hinzuzufügen, so dass bestimmte Fahrzeugtypen häufiger zugeordnet werden. Die Mobilitätsdaten werden genutzt, um auf Basis der Ladeprofile und der Fahrzeugdatenbank Lastprofile zu erstellen. Dabei sind insbesondere die Start- und Ankunftszeiten sowie die gefahrenen Routen relevant. Daraus werden der früheste Startzeitpunkt und der späteste Endzeitpunkt eines Ladevorgangs, die verbrauchte Energie und der Zeitraum zwischen den einzelnen Ladevorgängen ermittelt. Es werden nur Personenkraftwagen und Alltagsfahrten betrachtet. Eine Unterscheidung zwischen Werktag und Wochenendtag wird einbezogen. Saisonale Unterschiede werden jedoch vernachlässigt. Insgesamt umfasst der abgeleitete Mobilitätsdatensatz die aggregierten Wege von 120.261 Personen. Mit Hilfe des Zufallsgenerators wird jedem Haushalt mit einem Elektrofahrzeug ein Werktags- und ein Wochenendtagsprofil zugewiesen. Außerdem implementiert das Elektrofahrzeugmodell die verschiedenen netzorientierten Regelungsansätze. Wenn eine dieser Regelungen aktiviert wird, wird die Blind- und Wirkleistung des Elektrofahrzeugs entsprechend beeinflusst. Im Fall des Maximal-Szenarios aus Tabelle 2-8 lädt jedes Elektrofahrzeug einphasig mit einer Ladeleistung von 4,6 kW auf L1, um die Auswirkungen auf die Spannungsunsymmetrie zu erhöhen. [DIM23]

Simulationsergebnisse

Für das Szenario mit geringer Durchdringung sind die Einflüsse auf die Netzspannung im Vergleich zu den anderen Szenarien gering, weshalb im Folgenden nicht auf die Ergebnisse dieses Szenario eingegangen wird. Die Bedingungen für den Eingriff von Q(U) sind in diesem Szenario selten und für P(U) nie erfüllt. Tabelle 2-9 zeigt einen Auszug aus den Simulationsergebnissen des Szenarios mit hoher Durchdringung in Bezug auf die

Spannungsunsymmetrie. Der Maximalwert der Spannungsunsymmetrie und der Durchschnittswert während des Ladens des jeweiligen Elektrofahrzeugs sind für Haushalt 16 und 17 in Strang 8 enthalten. Die beiden Haushalte befinden sich am Ende des Strangs. Dort sind die Auswirkungen am größten. Die Bedingung für den Eingriff der P(U)-Regelung ist auch in diesem Szenario nie erfüllt, weshalb Q(U) und P(U)&Q(U) identisch sind. Die $\cos\phi$ - und $\cos\phi(P)$ -Methode führen zu einer Erhöhung des maximalen Spannungsunsymmetriewertes und des Mittelwertes während des Ladens im Vergleich zum Laden ohne Regelung. Dies gilt auch für die anderen Haushalte mit wenigen Ausnahmen am Anfang der Leitungen. Ein Grund dafür ist, dass während des Ladens Blindleistung bereitgestellt wird, unabhängig davon, ob sich der Effektivwert der Spannung ändert. Außerdem wird auch der Phasenwinkel durch Blindleistung beeinflusst. Sowohl bei der phasengenauen als auch bei der nicht phasengenauen P(U)&Q(U) werden der maximale Spannungsunsymmetriewert und der Mittelwert im Vergleich zu keiner Regelung reduziert. Die Änderung des Mittelwerts ist gering. Die maximale Spannungsunsymmetrie tritt am Ende der Leitung auf (Haushalt 17). Außerdem haben die verschiedenen Regelungsmethoden an diesem Punkt den größten Einfluss. Abbildung 2-90 zeigt die Spannungsunsymmetrie, die Phasenspannung und die Blindleistung während eines Ladevorgangs des Elektrofahrzeugs von Haushalt 17. Das Elektrofahrzeug lädt einphasig an L3. Die pu-Werte der Spannung beziehen sich auf den Nennwert der Phasenspannung von 230 V. Außerdem zeigt die Abbildung ausschließlich die Blindleistung des EV. P(U)&Q(U) reduziert die Spannungsunsymmetrie in diesem Ladevorgang. Die positive Wirkung der phasengenauen P(U)&Q(U) ist größer als die der nicht phasengenauen Regelung. Bei der nicht phasengenauen Steuerung ist die Bedingung für die Aktivierung von Q(U) für eine kürzere Dauer erfüllt als bei der phasengenauen Regelung, da der Mittelwert der Spannungen der drei Phasen verwendet wird. Außerdem greift die phasengenaue Methode stärker ein, weshalb auch mehr Blindleistung bereitgestellt wird. [DIM23]

Tabelle 2-9: Spannungsunsymmetrie für die verschiedenen Methoden im Hoch-Szenario in Anlehnung an [DIM23]

Haushalt	Phasengenau	Regelungsmethode für EV	Spannungsunsymmetrie	
			Max in %	Avg _{charge} in %
Strang 8, Haushalt 16	-	None	1,4432	0,2435
	-	$\cos\phi$	1,4939	0,2487
	-	$\cos\phi(P)$	1,4942	0,2492
	Nein	P(U)&Q(U)	1,4428	0,2433
	Ja	P(U)&Q(U)	1,4387	0,2430
Strang 8, Haushalt 17	-	None	1,5716	0,4572
	-	$\cos\phi$	1,6215	0,4740
	-	$\cos\phi(P)$	1,6218	0,4696
	Nein	P(U)&Q(U)	1,5713	0,4568
	Ja	P(U)&Q(U)	1,5671	0,4558

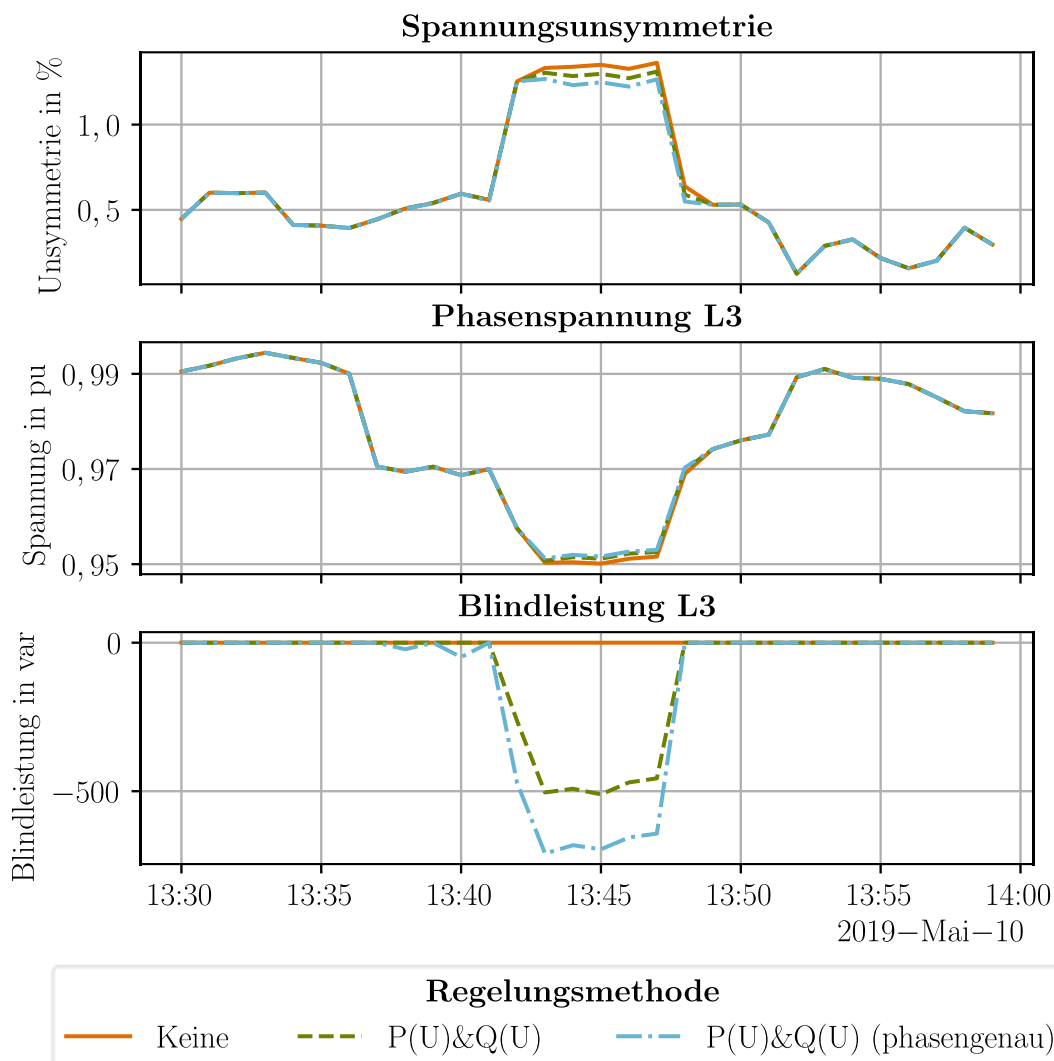


Abbildung 2-90: Spannungsunsymmetrie, Phasenspannung und Blindleistung des Elektrofahrzeugs von Haushalt 17 des Strangs 8 im Hoch-Szenario in Anlehnung an [DIM23]

Tabelle 2-10 zeigt den Maximalwert der Spannungsunsymmetrie und den Mittelwert während des Ladens des jeweiligen Elektrofahrzeugs für Haushalt 16 und 17 in Strang 8 für das Maximal-Szenario. Im Vergleich zum Szenario mit hoher Durchdringung greift die P(U)-Regelung ein, allerdings nur in der phasengenauen Variante und nur selten am Ende des Strangs 8. Daher werden die Ergebnisse für die phasengenauen Varianten der Einzelverfahren P(U) und Q(U) dargestellt, nicht aber die der symmetrischen Varianten. Die Auswirkungen des einphasigen Ladens aller Fahrzeuge auf L1 im Maximal-Szenario sind aus den Ergebnissen ersichtlich. Die maximale Spannungsasymmetrie am Ende der Leitung ohne Regelung beträgt 2,9757 % und der Durchschnittswert während des Ladevorgangs 1,2658 %. Wie im Hoch-Szenario nimmt die Spannungsunsymmetrie zum Ende der Leitung hin zu. [DIM23]

Tabelle 2-10: Spannungsunsymmetrie für die verschiedenen Methoden im Maximal-Szenario in Anlehnung an [DIM23]

Haushalt	Phasengenau	Regelungsmethode für EV	Spannungsunsymmetrie	
			Max in %	Avg _{charge} in %
Strang 8, Haushalt 16	-	None	2,9294	1,0896
	-	cos φ	2,9491	1,1339
	-	cos φ (P)	2,9475	1,1110
	Nein	P(U)&Q(U)	2,9515	1,0910
	Ja	Q(U)	3,0592	1,1094
	Ja	P(U)	2,4997	1,0874
	Ja	P(U)&Q(U)	3,1046	1,1070
Strang 8, Haushalt 17	-	None	2,9757	1,2658
	-	cos φ	2,9961	1,3158
	-	cos φ (P)	2,9947	1,2994
	Nein	P(U)&Q(U)	2,9981	1,2676
	Ja	Q(U)	3,1076	1,2944
	Ja	P(V)	2,5420	1,0674
	Ja	P(V)&Q(V)	3,1554	1,0899

Die cos φ - und cos φ (P)-Methode erhöht auch in diesem Szenario die Spannungsunsymmetrie. Hinsichtlich der Auswirkungen der P(U)&Q(U)-Regelung zeigt sich jedoch teilweise ein gegenläufiger Trend zum Szenario mit hoher Durchdringung. Für mehrere Haushalte führt diese Regelung zu einer Erhöhung der Spannungsunsymmetrie, unabhängig davon, ob sie phasengenau oder nicht phasengenau ist. Es ist zu berücksichtigen, dass die symmetrische Variante auch bei einphasigen Ladevorgängen angewendet wird. Da der Mittelwert der Spannung genutzt wird, ist verglichen zur phasengenauen Variante ausschließlich die Leistungsänderung auf dem genutzten Außenleiter L1 geringer. Tabelle 2-10 zeigt, dass für die Haushalte 16 und 17 in Strang 8 die nicht-phasengenaue P(U)&Q(U) zu einem Anstieg des maximalen Wertes der Spannungsunsymmetrie und des Mittelwerts im Vergleich zu keiner Regelung führt. Für die phasengenaue Variante gilt dies auch für Haushalt 16. Im Gegensatz dazu erhöht sich bei Haushalt 17 der Maximalwert, während sich der Mittelwert verringert. Der Grund für die Verringerung des Durchschnittswerts wird deutlich, wenn die einzelnen Methoden P(U) und Q(U) betrachtet werden. Die P(U)-Methode reduziert die maximale Spannungsunsymmetrie und den Mittelwert während des Ladevorgangs in jedem Haushalt, in dem sie die Ladeleistung reduziert, während die Q(U)-Methode die beiden Werte für viele Haushalte erhöht. Für Haushalt 17 reduziert die P(U)-Regelung die Spannungsunsymmetrie im Vergleich zu keiner Regelung erheblich. Im Gegensatz dazu ist der Maximalwert der phasengenauen P(U)&Q(U) in diesem Haushalt größer als der der Q(U). Allerdings tritt der Maximalwert dieser beiden Simulationen nicht gleichzeitig auf. Das liegt daran, dass die Ladeleistungsreduktion durch P(U) Ladevorgänge verlängern und verschieben kann. Folglich kann die Blindleistungsbereitstellung durch das Elektrofahrzeug zu anderen Zeiten erfolgen. Zu dem Zeitpunkt, an dem in der phasengenauen P(U)&Q(U)-Simulation der Maximalwert von

Haushalt 17 auftritt, wird das Elektrofahrzeug in der Q(U)-Simulation nicht geladen. Daher ist in diesem Beispiel der Durchschnittswert für den Vergleich besser geeignet. [DIM23]

Abbildung 2-91, zeigt die Spannungsunsymmetrie, die Spannung und die Blindleistung während eines Ladevorgangs des Elektrofahrzeugs von Haushalt 17. Die Abbildung veranschaulicht die Zunahme der Spannungsunsymmetrie aufgrund der Blindleistungsbereitstellung. Während dieses Ladevorgangs erhöhen sowohl die nicht-phasengenaue als auch die phasengenaue P(U)&Q(U) die Spannungsunsymmetrie. Die Erhöhung der Spannungsunsymmetrie tritt auch bei der nicht-phasengenaue Variante auf, weil sie auch bei einphasig ladenden Elektrofahrzeugen eingesetzt wird. Außerdem zeigt Abbildung 2-91, dass die Phasenspannung L1 unter 0,92 pu fällt, weshalb die phasengenaue P(U) die Wirkleistung während dieses Ladevorgangs reduziert. Die Wirkleistungsreduktion führt zu einer Verringerung der Spannungsunsymmetrie, wie etwa bei 00:17 Uhr. [DIM23]

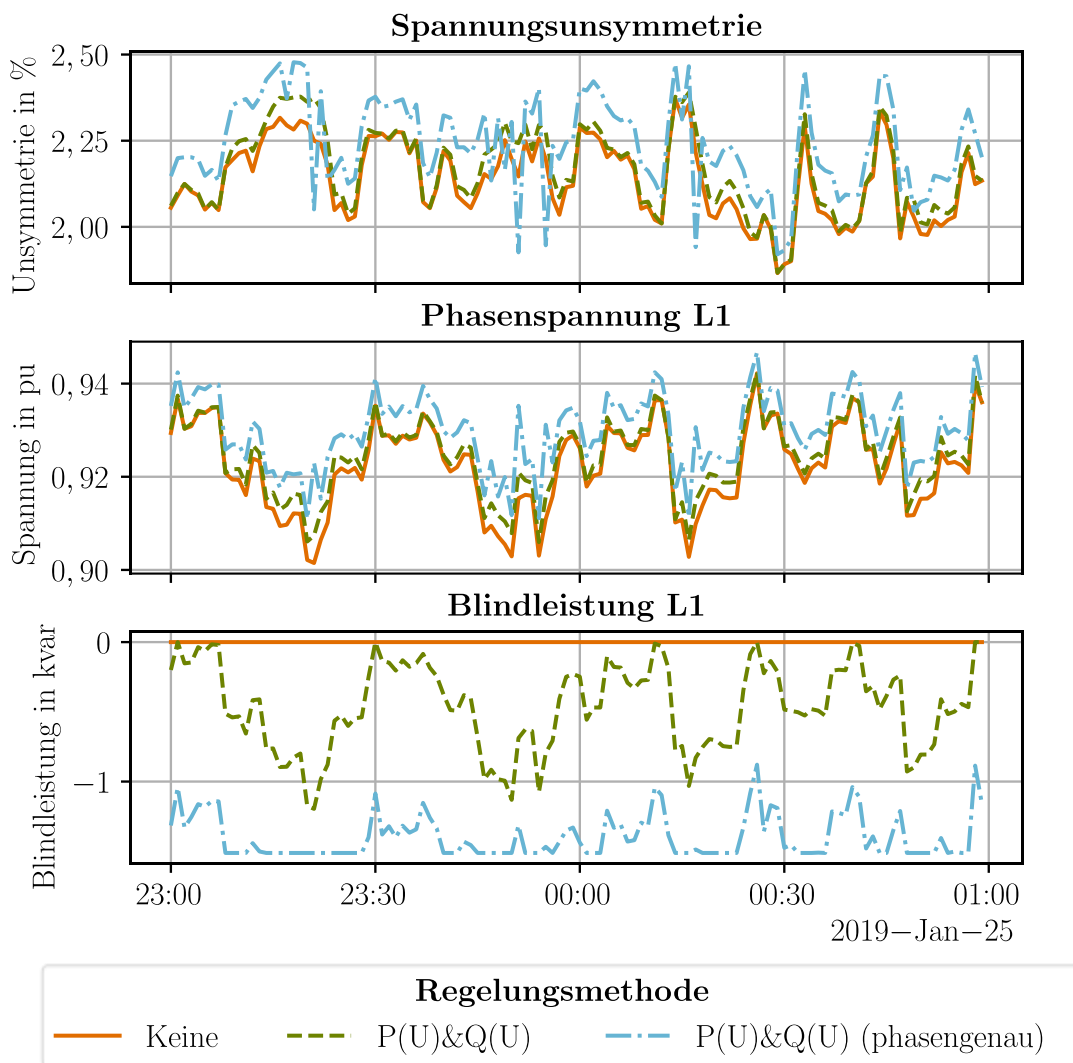


Abbildung 2-91: Spannungsunsymmetrie, Phasenspannung und Blindleistung des Elektrofahrzeugs von Haushalt 17 des Strangs 8 im Maximal-Szenario in Anlehnung an [DIM23]

Die untersuchten Methoden haben stets einen positiven Einfluss auf die statische Spannungshaltung. Die Q(U)-Regelung hat je nach Szenario jedoch entweder einen positiven

oder einen negativen Einfluss auf die Spannungsunsymmetrie. Der Grund dafür ist, dass die Blindleistungsbereitstellung nicht nur den Absolutwert, sondern auch den Winkel der Phasenspannung beeinflusst. Da der Spannungsunsymmetriefaktor die Absolutwerte und Phasenwinkel der Spannungen berücksichtigt, wird er durch einphasige Blindleistungsbereitstellung beeinflusst. Die Phasenwinkeldifferenz zwischen den Phasenspannungen ändert sich, weil die einphasige Blindleistungsbereitstellung nur den Winkel der entsprechenden Phase ändert. Wenn die Blindleistungsbereitstellung zu einer Annäherung der Phasendifferenzen an den Nennwert von 120° führt, wird die Spannungsunsymmetrie reduziert. Wenn sich dagegen die Phasendifferenzen durch die Bereitstellung von Blindleistung von 120° entfernen, nimmt die Spannungsunsymmetrie zu. Im betrachteten Netzmodell, das ein R/X-Verhältnis größer als 1 aufweist, hat die Blindleistung einen größeren Einfluss auf den Phasenwinkel und die Wirkleistung einen größeren Einfluss auf den Absolutwert. R/X-Verhältnisse größer 1 sind typisch in der Niederspannungsebene [SCH17]. $\cos\varphi$ - und die $\cos\varphi(P)$ haben einen negativen Einfluss auf die Spannungsunsymmetrie, weil ebenfalls die Phasenverschiebung durch die Blindleistungsbereitstellung negativ beeinflusst wird. Bei einer ausschließlich dreiphasig symmetrischen Anwendung der Blindleistungsbereitstellung können negative Einflüsse auf die Spannungsunsymmetrie vermieden werden. [DIM23]

Zusammenfassend zeigen die Simulationen, dass ein konstanter $\cos\varphi$ - und die $\cos\varphi(P)$ -Regelung bei einer unsymmetrischen Anwendung zu einer Erhöhung der Spannungsunsymmetrie führen, weil einphasig und zweiphasig ladende Elektrofahrzeuge nur die Phasenwinkel der genutzten Phasen beeinflussen. Die beiden Methoden beziehen während des Ladens permanent Blindleistung, unabhängig von Änderungen des Absolutwertes der Spannung. Die phasengenaue P(U)-Regelung reduziert die Spannungsunsymmetrie. Die phasengenaue Q(U) führt zu einer Stützung des Absolutwertes der Spannung, während die Spannungsunsymmetrie je nach Szenario entweder erhöht oder verringert wird. In dem untersuchten Fall eines Niederspannungsnetzes mit einem R/X-Verhältnis größer als eins hat die Blindleistung einen größeren Einfluss auf den Phasenwinkel, während die Wirkleistung einen größeren Einfluss auf den Absolutwert hat. Folglich kann bei der phasengenaue Q(U) eine negative Auswirkung auf die Phasendifferenz die positive Auswirkung auf den Absolutwert der Spannung überwiegen. Daher muss die Phasendifferenz bei der Regelung der Spannungsunsymmetrie berücksichtigt werden. Darüber hinaus wurde gezeigt, dass das einphasige Laden von Elektrofahrzeugen einen stärkeren Einfluss auf die Unsymmetrie hat als das dreiphasige Laden. Bei einer hohen Durchdringung von einphasig ladenden Elektrofahrzeugen, die überwiegend auf der gleichen Phase laden, kann die Spannungsunsymmetrie den Grenzwert der Norm DIN EN 50160 überschreiten. In den Simulationen wurde ein Vorstadtnetz betrachtet. In weiteren Untersuchungen können auch ländliche Netze betrachtet werden. Nach [VAN21] sind ländliche Netze mit langen Strängen besonders anfällig für hohe Spannungsunsymmetrie. [DIM23]

Weiterhin wird in [WUS21] die Q(U)- und P(U)-Regelung für das Laden von Elektrofahrzeugen in der Niederspannungsebene simulativ mittels eines Netzmodells für ein Vorstadtnetz

untersucht. Es werden in diesen Untersuchungen ausschließlich symmetrisch dreiphasige Simulationen durchgeführt. Folglich wird nur die symmetrische Anwendung der Regelungsmethoden betrachtet. Die Ergebnisse zeigen, dass mit den Lösungsansätzen die Aufnahmekapazität von Niederspannungsnetzen für Elektrofahrzeuge erhöht wird. [WUS21]

Untersuchungen mittels Optimierung

Für die Untersuchungen der Konzepte für netzorientiertes Laden wurden weiterhin Optimierungen auf Grundlage verschiedener Ladestrategien und Tarife für Elektrofahrzeuge durchgeführt und auf eine Verbesserung der Netzdienlichkeit der Ladevorgänge untersucht. Grundlage für die Optimierungen bilden Messdaten aus dem konduktiven Feldtest. Die Feldtestdaten wurden in einem mehrschrittigen Prozess aufbereitet und mit zugehörigen Standzeiten der Elektrofahrzeuge anhand von Backenddaten optimiert. Mit einem Optimierungstool wurden verschiedene Optimierungen für einen simulierten Haushalt, für den die Ladeleistungen der vier Wallboxen hinterlegt wurden, durchgeführt. Es wurden eine Eigenverbrauchsoptimierung sowie Optimierungen auf Grundlage von dynamischen Tarifen durchgeführt. Zu Letzterem wurde ein netzdienlicher Tarif auf Grundlage reduzierter Netzentgelte nach Vorgaben von § 14a EnWG sowie ein börsenpreisorientierter Tarif umgesetzt. Die Netzdienlichkeit wird anhand des Spannungsfalls der Netzspannung im Optimierungszeitraum bewertet. Dafür wurde ein Netzmodell in PowerFactory aufgebaut, welches auf dem Stadtnetz der SimBench-Netze basiert. In diesem Netzmodell wurden die verschiedenen Optimierungsergebnisse auf Grundlage der untersuchten Ladestrategien bezüglich des simulierten Spannungsfalls im Zeitverlauf ausgewertet. Diesbezüglich wurde der maximale Spannungsfall sowie das statistische 95 %-Quantil des Spannungsfalls betrachtet. Zusätzlich wurden die untersuchten Szenarien bezüglich der Verteilungen der Wahrscheinlichkeitsdichten für die täglichen Maximalwerte des Spannungsfalls ausgewertet. Für die durchgeführten Optimierungen zeigte das Laden der Elektrofahrzeuge nach dem netzdienlichen Tarif die größte Verringerung des 95 %-Quantils des Spannungsfalls. Bezüglich des maximalen Spannungsfalls erzielte das eigenverbrauchsoptimierte Laden die größte Verringerung. Für das preisgesteuerte Laden anhand des Börsenpreises zeigte sich die geringste Verbesserung der Netzdienlichkeit. Zusätzlich zu den genannten Optimierungen auf Grundlage der unterschiedlichen Ladestrategien wurde eine Q(U)-Regelung im Netzmodell umgesetzt und für die Elektrofahrzeuge im Fuhrpark angewendet. Für die untersuchten Szenarien mit Q(U)-Regelung ergab sich allgemein eine größere Verringerung des Spannungsfalls gegenüber den vorher untersuchten Ladestrategien. Eine abschließend untersuchte Kombination aus netzdienlichem Tarif mit PV-Anlage und einer gleichzeitigen Q(U)-Regelung für die Elektrofahrzeuge zeigte die größte Verbesserung der Netzdienlichkeit. In folgender Abbildung 2-92 sind die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen der täglichen Maximalwerte der Spannungsfälle für die Netznutzungsfälle mit dynamischen Stromtarifen dargestellt.

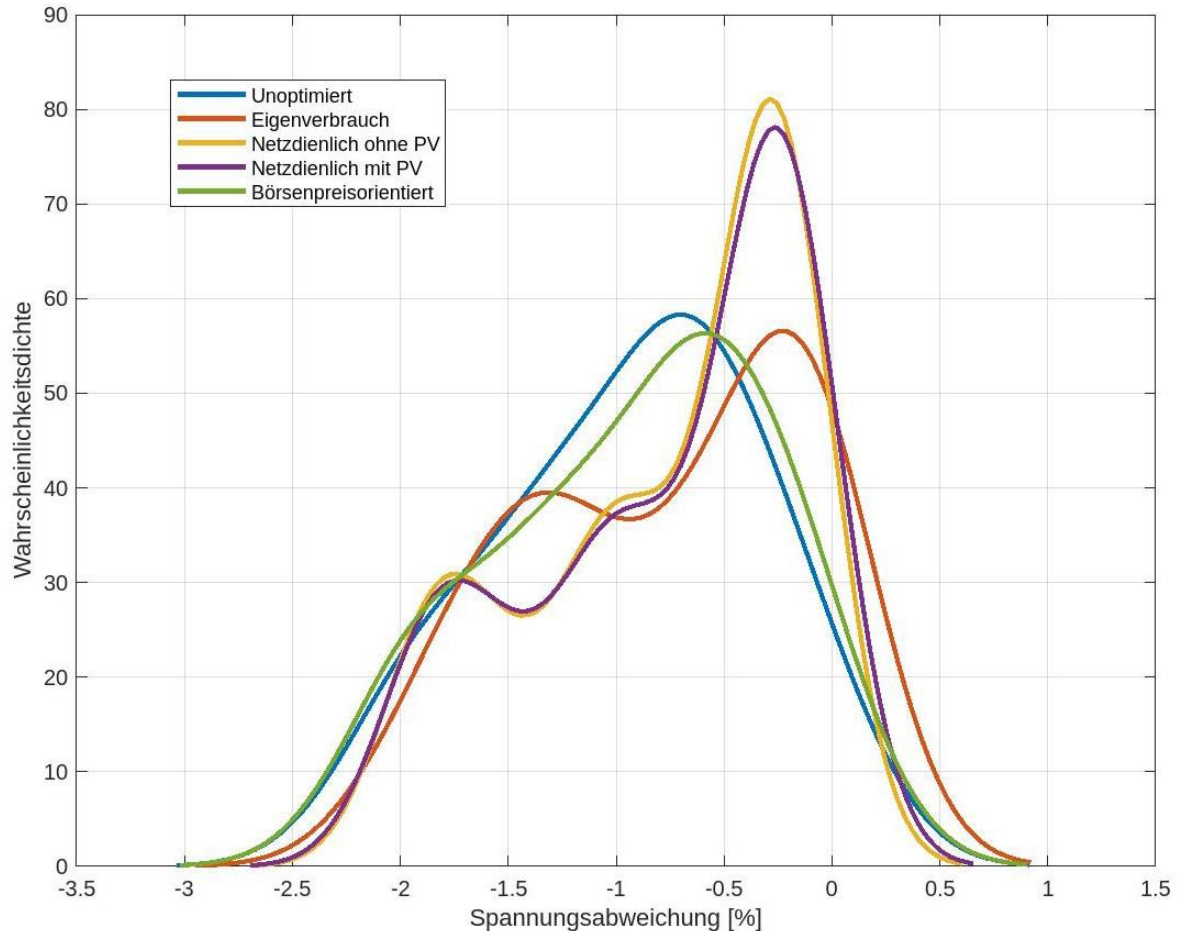


Abbildung 2-92: Verteilung der maximalen Spannungsfälle für Netznutzungsfälle mit verschiedenen Ladestrategien und dynamischen Tarifen

Die Verteilung der Spannungsfälle zeigt, dass die Kurven für das unoptimierte Laden sowie für das preisgesteuerte Laden anhand des Börsenpreises gegenüber den Szenarien auf Grundlage des netzdienlichen Tarifs hin zu einem erhöhten Spannungsfall verschoben sind. Auch das Maximum der Verteilungen der Wahrscheinlichkeitsdichten ist für das Laden nach dem netzdienlichen Tarif im Vergleich zum unoptimierten Laden erhöht und in positive x-Richtung zu einem verringerten Spannungsfall verschoben. Das eigenverbrauchsoptimierte Laden zeigt das gleiche Verhalten, mit einer zusätzlichen Verschiebung zu einem erhöhten Spannungsanstieg sowie einem niedrigeren Maximum gegenüber den Szenarien des netzdienlichen Tarifs. Für das börsenpreisorientierte Laden findet die Verschiebung geringer statt, die Wahrscheinlichkeitsdichte ähnelt mehr dem unoptimierten Szenario.

Die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Netznutzungsfälle mit ausschließlich netzdienlichen Ladestrategien sowie der Nutzung der Q(U)-Regelung beim Ladevorgang ist in Abbildung 2-93 dargestellt.

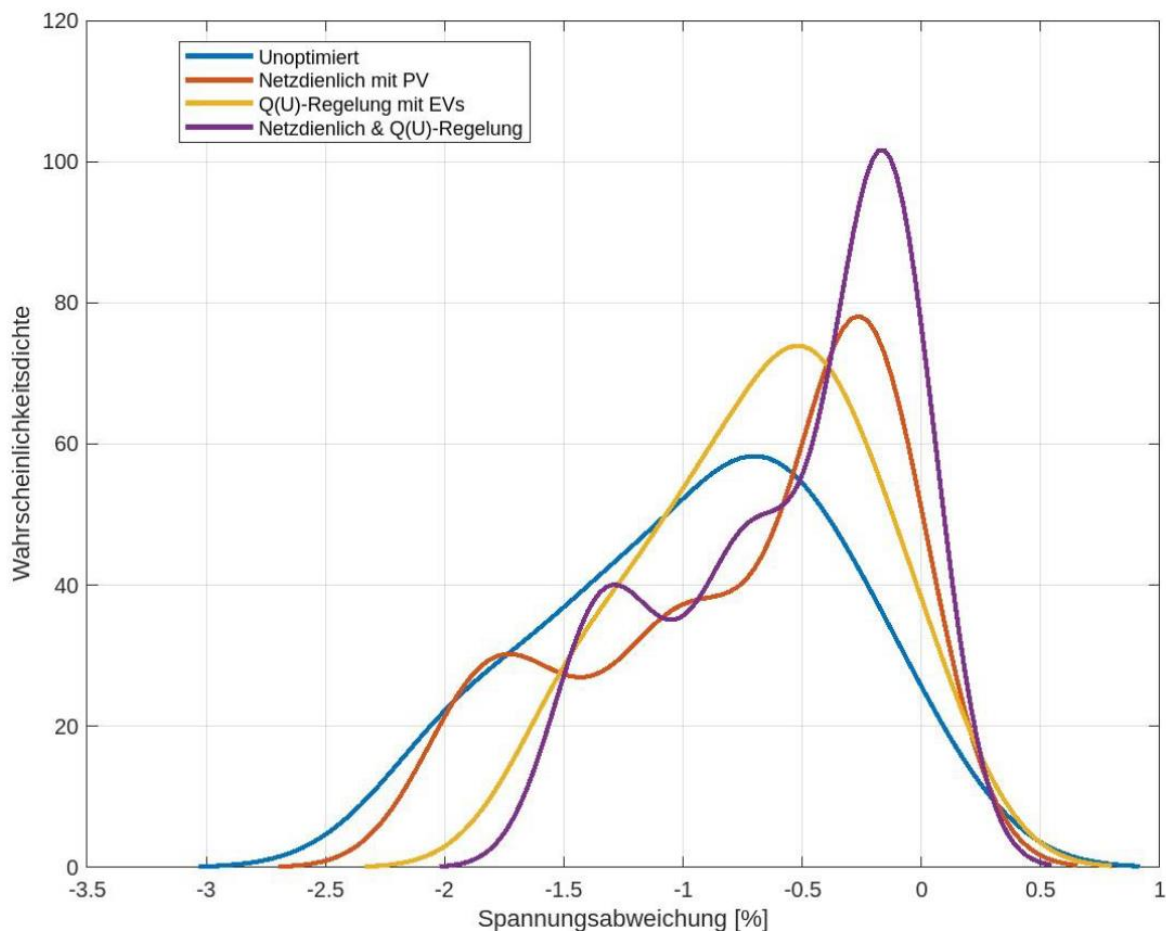


Abbildung 2-93: Verteilung der maximalen Spannungsfälle für Netznutzungsfälle mit der Nutzung einer Q(U)-Regelung beim Ladevorgang

Verglichen mit der reinen Q(U)-Regelung ähnelt der Verteilungsverlauf des kombinierten Szenarios stärker dem Verlauf des netzdienlichen Tarifs und weicht stärker vom Verteilungsverlauf des unoptimierten Szenarios ab. Dies lässt sich durch die zusätzlichen zeitlichen Lastverschiebungen, angeregt durch den netzdienlichen Tarif gemäß § 14a EnWG, erklären.

Der geringere maximale Spannungsfall des kombinierten Szenarios gegenüber den Vergleichsszenarien spiegelt sich auch in der Verteilung der Wahrscheinlichkeitsdichte der täglichen Maximalwerte wider. Auch das Maximum der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des kombinierten Szenarios ist gegenüber den Vergleichsszenarien in positive x-Richtung hin zu einem verringerten Spannungsfall verschoben. Demnach zeigt die Verteilung für das kombinierte Szenario höhere Wahrscheinlichkeitsdichten für geringere Spannungsfälle gegenüber den Vergleichsszenarien.

2.3.3 Laboruntersuchungen (AP 2.3)

Laboraufbauten

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Laboraufbauten zur Validierung der netz- und erzeugungsorientierten Ladekonzepte aus AP 2.1 und AP 2.2 erstellt. Dafür wurde die am elenia vorhandene Laborumgebung verwendet. Diese besteht aus einem Netzsimulator MX45 der Firma California Instruments [AME11], mit dem sich die Netzparameter Spannung und Frequenz stellen lassen, sowie einer am Institut selbst erstellten Leitungsnachbildung, die verschiedene Leitungslängen mit einstellbaren Wirk- und Blindwiderständen simulieren kann. Dies ermöglicht eine Analyse bei Betrieb an einem idealen Labornetz sowie die Messung von Netzurückwirkungen der angeschlossenen Komponenten. Auch komplexere Topologien können so untersucht werden. Beispielsweise können Lasten und PV-Wechselrichter mit zugehörigen DC-Quellen zur PV-Simulation an unterschiedlichen Orten der Leitungsnachbildung angeschlossen werden, um den Einfluss auf die unterschiedlichen Netzknoten zur ermitteln.

Für das Projekt wurde ein bidirektionaler AC/DC-Wandler des Modells B2C-20 der Firma Cinergia beschafft, der im Folgenden als B2C bezeichnet wird. Dieser arbeitet mit einer maximalen Leistung von 20 kW und kann DC-seitig eine maximale Spannung von 750 V bzw. einen Strom von 75 A bereitstellen. Außerdem lässt sich der Blindleistungswert am Anschlusspunkt des Geräts einstellen, was sowohl einen Vergleich zum AFE des induktiven Ladesystems zulässt, als auch die Validierung von netzorientierten Ladekonzepten ermöglicht [CIN24]. Die Steuerung des Geräts erfolgt über Modbus TCP über ein selbsterstelltes Skript in der Programmiersprache Python (Version 3.9.7). Dies ermöglicht eine automatisierte Ansteuerung des Geräts über eine Ethernetschnittstelle und eine Integration in die unterschiedlichen Laboraufbauten.

Zunächst wurde ein Laboraufbau zur Nachbildung von DC-Ladevorgängen erstellt. Dieser enthält die oben erwähnte B2C, eine Schaltbox und den am elenia bereits vorhandenen Batterieemulator. Das Blockschaltbild des Aufbaus ist in Abbildung 2-94 zu sehen. Die dreiphasig an das Netz angeschlossene B2C fungiert dabei als Gleichrichter der DC-Ladestation. Diese ist DC-seitig über die DC+ und DC- Leitungen mit dem Batterieemulator verbunden. Der Batterieemulator BE-20 (BE) ist wiederum ein Gerät der Firma Cinergia, welches speziell dafür entwickelt wurde Lithium-Ionen-Batterien elektrisch nachzubilden. Dazu kann an den DC-Ausgangsklemmen eine maximale Spannung von 750 V und ein maximaler Strom von 75 A bei einer maximalen Leistung von 18 kW bereitgestellt werden [CAL16]. Die Ansteuerung erfolgt wiederum über das Modbus TCP Protokoll und wurde in Python umgesetzt. Zur Nachbildung kann das Gerät intern eine Spannungs-SoC Kennlinie abfahren, die je nach Ladezustand eine andere Batteriespannung an den Ausgangsklemmen bereitstellt. Die Batteriegröße kann durch den aufgenommenen oder abgegebenen Strom berechnet werden [CAL16].

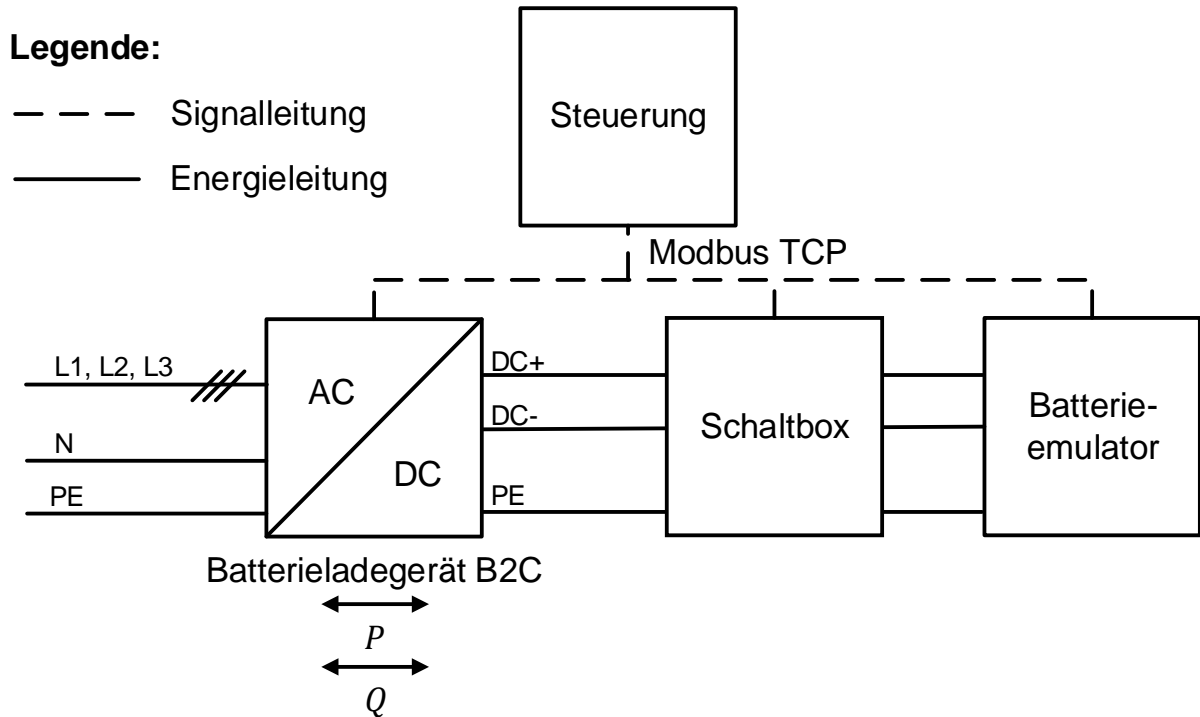


Abbildung 2-94: Blockschaltbild für den Laboraufbau der DC-Ladenachbildung

Die Schaltbox aus Abbildung 2-94 dient zum sicheren Betrieb des oben erklärten Laboraufbaus und ist in Abbildung 2-95 zu sehen. In der Schaltbox ist ein DC-Schütz verbaut, welches bei einer Spannung von 1000 V Ströme bis zu 80 A sicher unterbrechen kann [SYS24]. Das Schütz kann dabei entweder über einen Notaus-Schalter direkt an der Box manuell betätigt werden oder durch einen in der Box verbauten Raspberry Pi mithilfe eines Relaiserweiterungsboards über einen in Python ausgeführten Code angesteuert werden. Letzteres ermöglicht eine Integration in die Ansteuerungssoftware des Laboraufbaus. Die ganzheitliche Steuerung des Laboraufbaus wird von einem Python-Skript übernommen, welches die einzelnen Ansteuerungsskripte der Komponenten B2C, Schaltbox und BE zusammenführt.

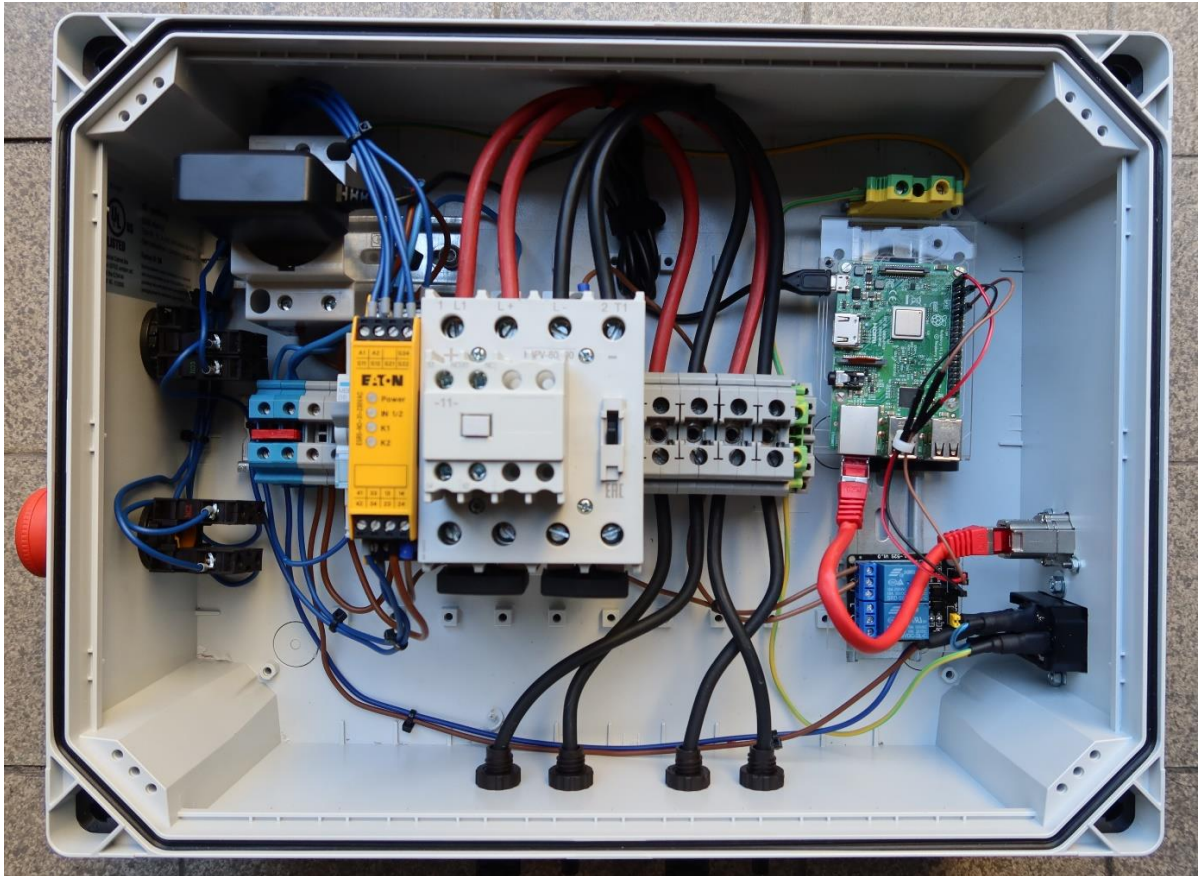


Abbildung 2-95: DC-Schaltbox

Um das Laden eines Elektrofahrzeuges umzusetzen, bringt das Skript die B2C und die BE in einen betriebsbereiten Zustand. Danach werden die beiden Geräte als Spannungsquellen so eingestellt, dass beide eine gleiche Ausgangsspannung liefern. Ist dies der Fall, schaltet das DC-Schütz der Schaltbox automatisch zu. Anschließend wird die B2C als Stromquelle betrieben, an der der Ladestrom der Batterie (BE) vorgegeben werden kann. Theoretisch können auch bidirektionale DC-Ladevorgänge untersucht werden, da die B2C und BE auch bidirektionalen Leistungsfluss erlauben. Falls Batterieparameter betrachtet werden sollen, wird der BE beim Start der Geräte eine Spannungs-SoC Kennlinie sowie eine Kapazitäts-Entladestrom-Kennlinie für Lithium-Ionen-Zellen über jeweils eine csv-Datei vorgegeben. Danach muss die Batteriekonfiguration und der Start-SoC übermittelt werden. Aufgrund dieser Werte stellt die BE anschließend die Batteriespannung ein. Diese Spannung wird wie zuvor an der B2C eingestellt, die Geräte werden miteinander verbunden und danach wird die B2C wieder als Stromquelle betrieben. Die DC-Ladenachbildung kann in die oben beschriebene Laborumgebung des elenia integriert werden, indem sie dreiphasig an die Leitungsnachbildung angeschlossen wird. Der vollständige Versuchsaufbau mit der Integration in die Laborumgebung ist in Abbildung 2-96 zu sehen.

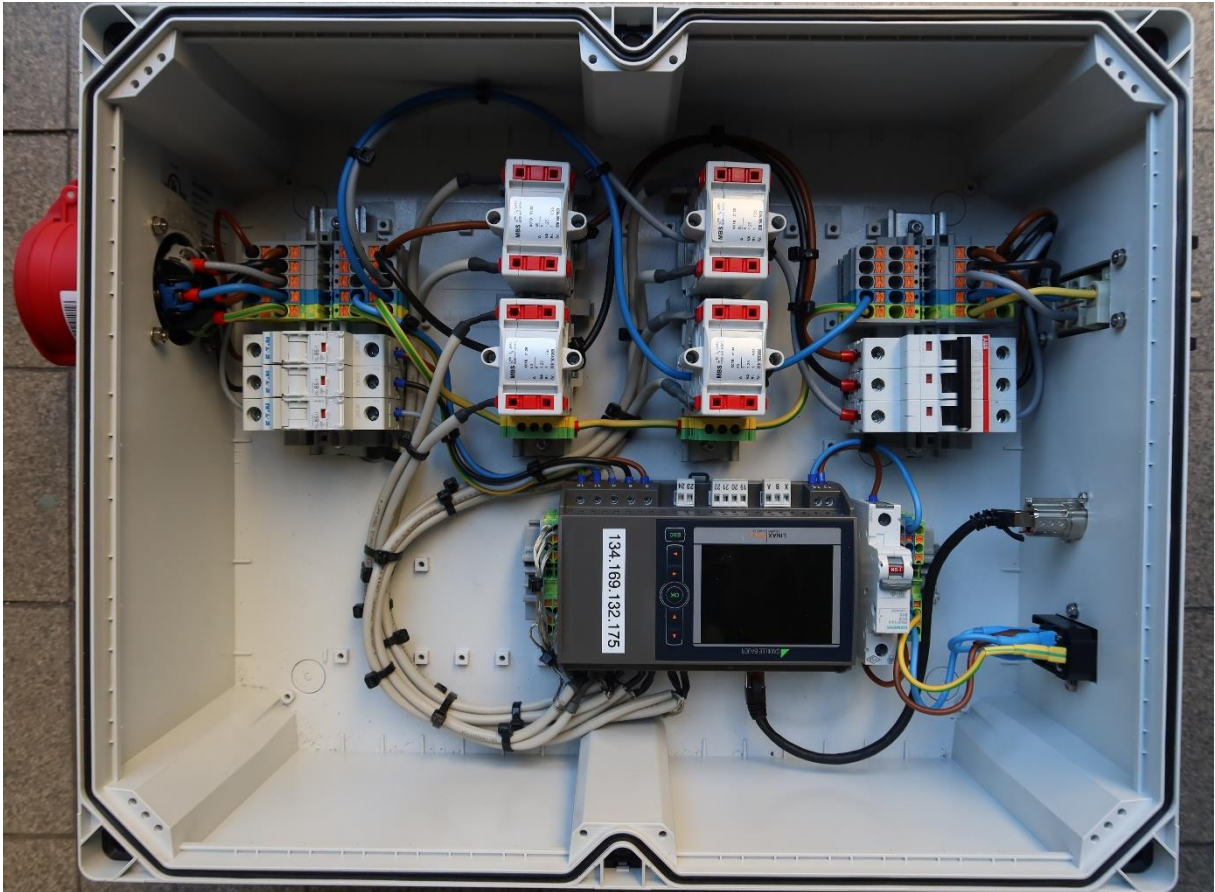


Abbildung 2-97: Messbox mit dem Linux PQ5000 (mittig unten)

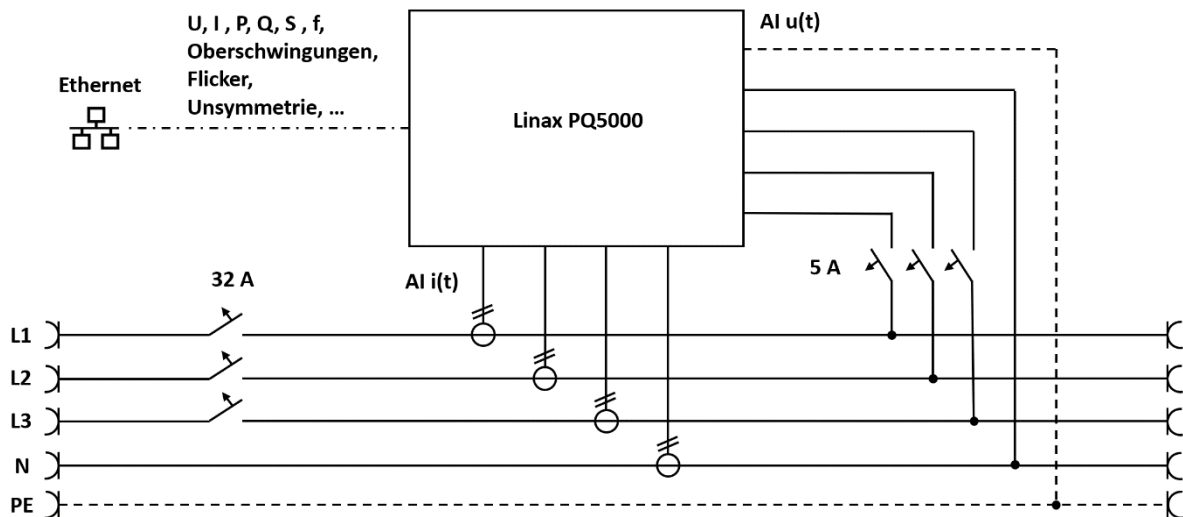


Abbildung 2-98: Schaltplan der Messbox

Zur realitätsnahen Nachbildung von konduktiven AC-Ladevorgängen nach der Norm ISO 15118 wurde ein Laboraufbau erstellt. Er beinhaltet eine Platine der Firma chargebyte GmbH, die die normkonforme fahrzeugseitige Kommunikation über den CP-Kontakt des Typ-2-Steckers zu einem EVSE aufbaut. Die Platine des Modells Charge Control P ist ursprünglich für das DC-Laden ausgelegt, unterstützt mit ihrem Software-Stack aber auch das AC-Laden [INT20]. Der Laboraufbau der AC-Ladenachbildung ist in Abbildung 2-99 zu sehen. Auf der

rechten Seite der Abbildung ist das Typ-2-Ladeinlet, an welches eine Ladestation oder Wallbox angeschlossen werden kann. Der Leistungspfad wird über einen Leitungsschutzschalter auf eine CEE-Steckdose gelegt, die auf der linken Seite der Abbildung zu erkennen ist. An diesen kann eine AC-Last angeschlossen werden, die die Fahrzeugbatterie elektrisch nachbilden soll. Über den CAN-Bus der EVCC-Platine werden die Ladedaten an einen Raspberry Pi weitergegeben, der diese über ein CAN-Erweiterungsmodul empfangen und über ein Python Skript auswerten kann. Dadurch kann mithilfe erstellter Ansteuerungsskripte in Python eine AC-Last in den Aufbau eingebunden werden, die den Ladestrom des Fahrzeugs über das Modbus TCP Protokoll einstellt. Dabei kommt die EL-15 der Firma Cinergia mit einer Nennleistung von 13,5 kW zum Einsatz, die mit einem CEE-Stecker an die Ladenachbildung angeschlossen werden kann [CIN22]. Das Blockschaltbild des Aufbaus ist in Abbildung 2-100 zu sehen. Mithilfe des Aufbaus kann die Kommunikation zwischen Ladesäule und Fahrzeug vor und während des Ladens untersucht und auch in diesen eingegriffen werden.

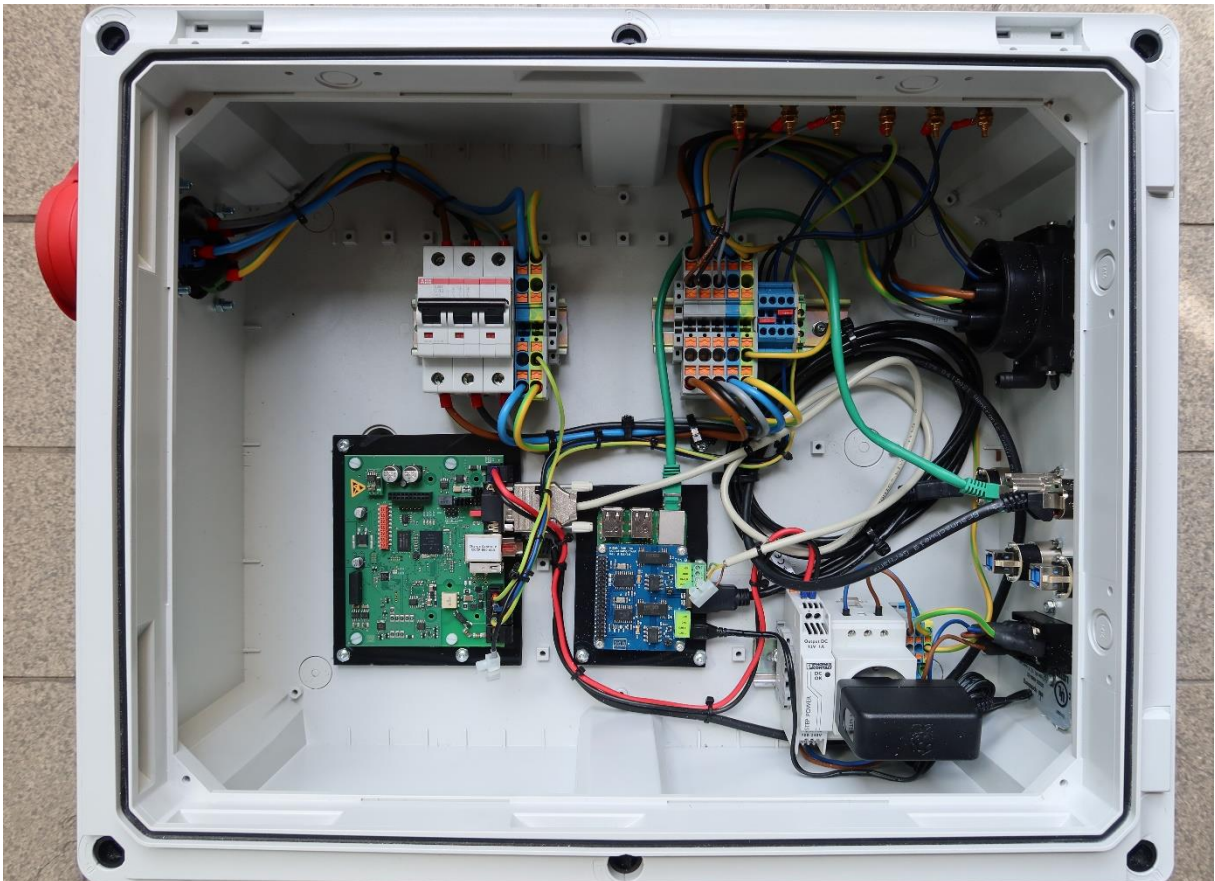


Abbildung 2-99: Laboraufbau der AC-Ladenachbildung

Legende:

- — — Signalleitung
 ————— Energieleitung

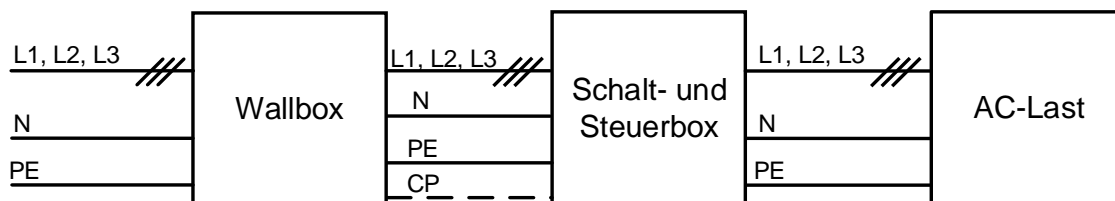


Abbildung 2-100: Blockschaltbild der AC-Ladenachbildung

Um die erzeugungsorientierten Ladekonzepte aus AP 2.1 zu validieren, wurde in den Schaltschrank der Unterverteilung des elenia-Ladeparks eine Kopplung zur oben eingeführten Laborumgebung des Netzdynamiklabors integriert. Diese Unterverteilung ist in Abbildung 2-101 zu sehen. Die Kopplung wurde mithilfe von drei Kippschaltern realisiert, die die vier verschiedenen Ladesäulen des Ladeparks auf die Netznachbildung schalten können (vgl. Abbildung 2-101 links). Weiterhin ist eine PV-Einspeisung an einem Anschlusspunkt der Leitungsnachbildung möglich, die entweder durch eine reale PV-Dachanlage oder durch eine DC-Quelle mit entsprechendem Wechselrichter erfolgen kann. Zusätzlich zur Kopplung wurde ein Energy Meter der SMA Solar Technology AG in der Unterverteilung installiert, welches den Energiebezug des Ladeparks mithilfe von Stromwandlern überwacht (vgl. Abbildung 2-101 rechts mittig) und die Daten in einer Cloud zur Verfügung stellt [SMA24].

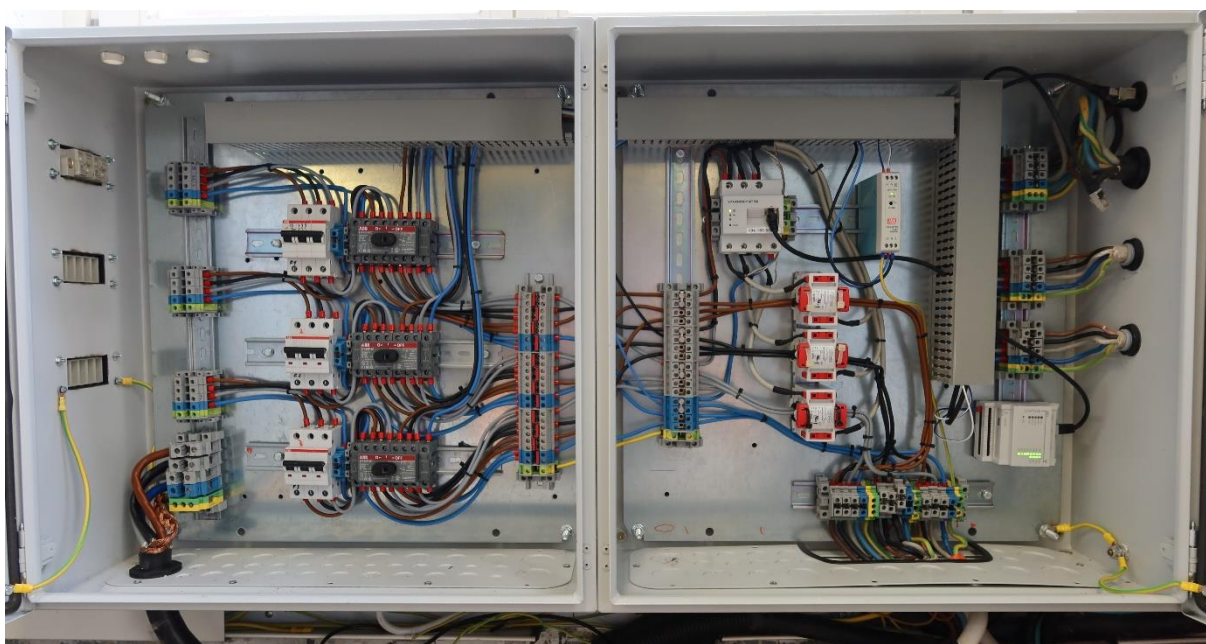


Abbildung 2-101: Unterverteilung des elenia-Ladeparks – Laborkopplung und Energiemessung

Mit dem Laboraufbau in Abbildung 2-102 werden die Methoden $\cos\phi$ bzw. $\cos\phi(P)$, $Q(U)$, $P(U)$ und $Q(\Delta\phi_u)$ aus Abschnitt 2.3.2 getestet. Der Netzsimulator und die Leitungsimpedanz stellen das Niederspannungsnetz dar. Die Frequenz und die Spannung werden vom Netzsimulator

vorgegeben. Der Widerstand R der drei Außenleiter und des Rückleiters wird mit Rohrwidständen und der induktive Blindwiderstand X_L mit Netzdröseln eingestellt. Die Ströme und Spannungen für die Analyse werden mit einem Leistungsmessgerät an den in Abbildung 2-102 markierten Messpunkten (MP) gemessen. Der aus mehreren Komponenten bestehende Prüfling dient der Umsetzung von AC-Ladevorgängen und den Regelungen. Die Messeinheit, die ein Netzqualitätsanalysegerät enthält, liefert die für die Regelungen benötigten Messgrößen. Dies sind die Spannungs-Effektivwerte und die Spannungsphasenwinkel. Die Messeinheit ist die Messbox mit dem Netzqualitätsanalysegerät Linax PQ5000 in Abbildung 2-97. Die AC-Wallbox (Wallbox WAVEadvanced der PION Technology AG mit einer maximalen Ladeleistung von 22 kW) unterstützt Ladekommunikation nach den Normen DIN EN 61851-1 und ISO 15118-2. Die EV-Box entspricht der Box in Abbildung 2-99 und enthält einen Ladecontroller (Charge Control P von chargebyte GmbH), einen Leitungsschutzschalter und eine Typ-2-Fahrzeugsteckdose. Der EV-Ladecontroller unterstützt ebenfalls Ladekommunikation nach DIN EN 61851-1 und ISO 15118-2. Die AC-Last, eine EL15 von Cinergia Power Solutions S.L. mit einer Nennleistung von 15 kVA, ermöglicht eine phasengenaue Anpassung der Blind- und Wirkleistung. Die Steuereinheit, ein Raspberry Pi 3 Model B, steuert den Ladecontroller der EV-Box und setzt die Regelung um. Sie fragt die erforderlichen Messwerte von der Messbox ab und stellt die Wirk- und Blindleistung der AC-Last ein. [DIM24]

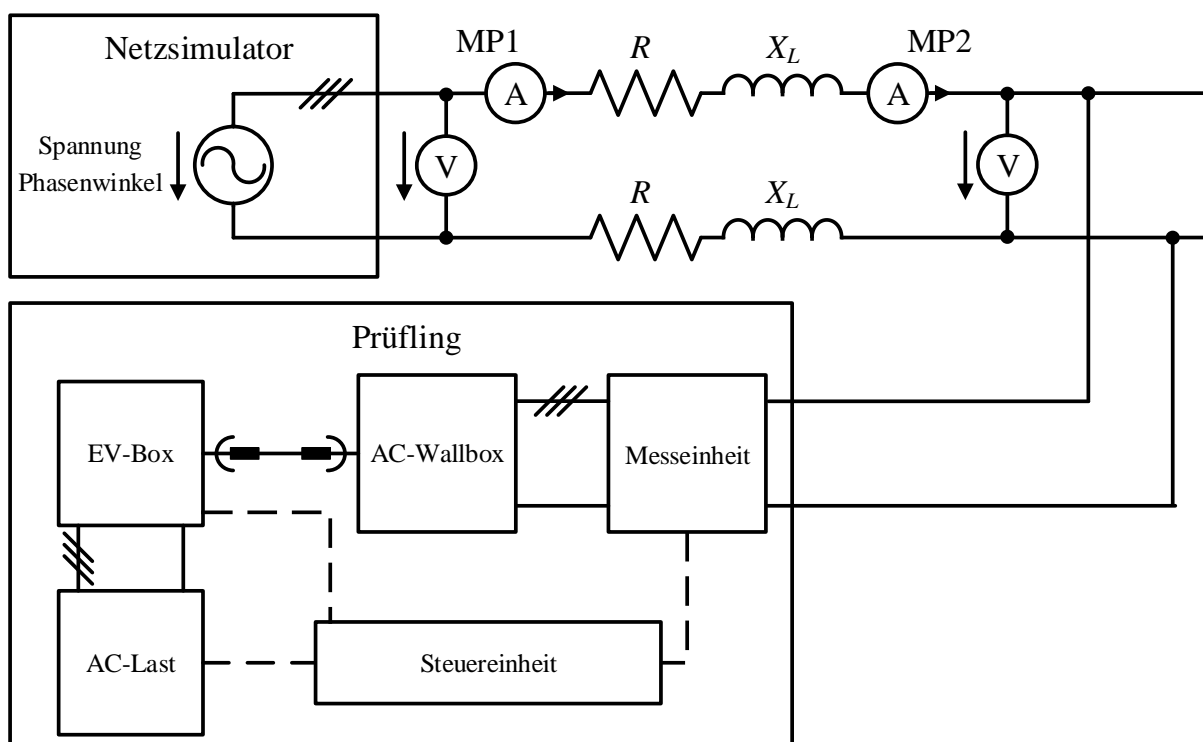


Abbildung 2-102: Laboraufbau zum Testen der netzorientierten Regelungsmethoden in Anlehnung an [DIM24]

Szenarien

Der Netzsimulator wird verwendet, um die Effektivwerte der Phasenspannungen und die Phasenwinkel der Spannungen zu ändern. Dies dient den Tests der Regelungsmethoden. Es werden verschiedene Fälle von Spannungsunsymmetrie erzeugt. Im Hinblick auf Spannungseffektivwertanpassungen werden sowohl symmetrische als auch unsymmetrische Änderungen berücksichtigt. Tabelle 2-11 zeigt das Netzsimulatorprofil mit verschiedenen Spannungseffektivwertänderungen. Es sind Spannungsabsenkungen und -erhöhungen enthalten. Die Phasenverschiebungen zwischen den Spannungen betragen -120° . [DIM24]

Tabelle 2-11: Netzsimulatorprofil für Änderung der Spannungseffektivwerte in Anlehnung an [DIM24]

Index	Phasenspannung L1 in V	Phasenspannung L2 in V	Phasenspannung L3 in V
1	218,5	218,5	218,5
2	241,5	241,5	241,5
3	215,0	215,0	215,0
4	253,0	253,0	253,0
5	218,5	230,0	230,0
6	241,5	230,0	230,0
7	215,0	230,0	230,0
8	253,0	230,0	230,0
9	218,5	218,5	230,0
10	241,5	241,5	230,0
11	215,0	215,0	230,0
12	253,0	253,0	230,0
13	218,5	241,5	230,0
14	241,5	218,5	230,0
15	215,0	253,0	230,0
16	253,0	215,0	230,0

Tabelle 2-12 zeigt das Profil des Netzsimulators, das verschiedene Änderungen der Winkel der drei Phasenspannungen enthält. Es sind sowohl Änderungen der Winkel einzelner Phasen als auch gleichzeitige Änderungen an mehreren Phasen enthalten, um verschiedene Fälle zu berücksichtigen. Die Effektivwerte der Phasenspannungen für dieses Profil betragen 230 V. [DIM24]

Tabelle 2-12: Netzsimulatorprofil für Änderung der Phasenwinkel der Spannungen in Anlehnung an [DIM24]

Index	Phasenwinkel L1 in °	Phasenwinkel L2 in °	Phasenwinkel L3 in °
1	1,5	240,0	120,0
2	2,5	240,0	120,0
3	358,5	240,0	120,0
4	357,5	240,0	120,0
5	0.0	241,5	120,0
6	0.0	242,5	120,0
7	0.0	238,5	120,0
8	0.0	237,5	120,0
9	1,5	241,5	120,0
10	2,5	242,5	120,0
11	358,5	238,5	120,0
12	357,5	237,5	120,0
13	1,5	238,5	120,0
14	2,5	237,5	120,0
15	358,5	241,5	120,0
16	357,5	242,5	120,0
17	1,5	238,5	121,5
18	2,5	237,5	122,5
19	358,5	241,5	118,5
20	357,5	242,5	117,5

In den Szenarien wird mit dem Prüfling dreiphasiges Laden mit einer Ladeleistung von 11 kW realisiert. Die Ladekommunikation wird gemäß ISO 115118-2 umgesetzt. Der Widerstand R für jeden Leiter im Laboraufbau beträgt $0,2 \Omega$ und die induktive Reaktanz X_L beträgt $0,0628 \Omega$ pro Leiter, was ein R/X-Verhältnis von 3,18 ergibt. Dies entspricht ungefähr einem 1 km langen NAYY 4x150SE 0,6/1kV-Kabel. [DIM24]

Messergebnisse

Im Folgenden werden die Messergebnisse der Szenarien aus den beiden Tabellen diskutiert. Alle dargestellten Messwerte wurden am MP2 gemessen. Tabelle 2-13 zeigt die k_{u2} -Werte für die verschiedenen Punkte des Netzsimulatorprofils in Tabelle 2-11 bei Anwendung der verschiedenen Regelungen sowie für den Fall ohne Regelung. Bei den fett gedruckten Werten wurde die Leistung des Prüflings durch die jeweilige Regelung angepasst, d.h. die Spannungswerte lagen außerhalb des Totbandes. Bei den symmetrischen Spannungsänderungen (Index 1 bis 4) sind die k_{u2} -Werte vernachlässigbar klein. Der Einfluss der symmetrischen Q(U) und P(U) auf die Spannungsunsymmetrie ist gering, weil die Leistungsänderungen symmetrisch sind. Die größte k_{u2} -Reduzierung durch die phasengenaue Q(U) beträgt 0,17 Prozentpunkte (Index 13). In mehreren Fällen, wie z. B. in den Zeilen 5 und 7, ist die Änderung von k_{u2} durch die phasengenaue Q(U) trotz maximaler Blindleistungsbereitstellung auf den entsprechenden Phasen sehr gering. Die phasengenaue

P(U) hat den größten Einfluss auf die Spannungsunsymmetrie. Die maximale Verringerung beträgt 0,34 Prozentpunkte (Index 11 und 16). Die Veränderung ist in einigen Fällen gering, wie in Zeile 5, weil die Wirkleistungsreduktion in diesen Fällen klein ist. Positive Auswirkungen in Bezug auf die Spannungshaltung sind bei allen Regelungen vorhanden. Der Einfluss der phasengenauen Varianten auf die Spannungseffektivwerte ist größer als der der symmetrischen Varianten. [DIM24]

Tabelle 2-13: k_{u2} in % für die Regelungsansätze in den Tests mit dem Netzsimulatorprofil für die Änderungen Spannungseffektivwerte in Anlehnung an [DIM24]

Index	None	Q(U)	Q(U) phasengenau	P(U)	P(U) phasengenau	P(U)&Q(U)	P(U)&Q(U) phasengenau
1	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,06	0,03
2	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,04
3	0,05	0,06	0,07	0,05	0,05	0,05	0,03
4	0,04	0,07	0,06	0,06	0,05	0,05	0,04
5	1,75	1,74	1,72	1,76	1,71	1,77	1,79
6	1,75	1,75	1,75	1,74	1,76	1,73	1,72
7	2,31	2,30	2,27	2,32	2,06	2,32	2,23
8	3,41	3,42	3,33	3,37	3,43	3,39	3,32
9	1,84	1,83	1,75	1,90	1,81	1,84	1,67
10	1,65	1,67	1,66	1,64	1,69	1,67	1,65
11	2,45	2,40	2,30	2,44	2,11	2,41	2,08
12	3,22	3,24	3,19	3,24	3,26	3,24	3,18
13	2,94	2,98	2,77	3,00	2,94	3,02	2,80
14	3,16	3,11	3,15	3,10	3,05	3,08	3,12
15	4,86	4,92	4,74	4,94	4,77	4,95	4,76
16	5,12	5,07	4,97	5,04	4,78	5,03	4,70

Als Beispiel zeigt Abbildung 2-103 die Phasenspannungen sowie die Phasenverschiebungen, die Wirkleistung und die Blindleistung für Index 7 des Profils mit den Spannungseffektivwertänderungen und die phasengenaue P(U)&Q(U). Der Spannungsfall am Netzsimulator wird bei 15 s eingestellt und die Rückkehr zur Nennspannung erfolgt bei 45 s. Der starke Fall der Wirkleistung am Prüfling bei 15 s wird durch den Spannungsfall verursacht. Anschließend erfolgt die Regelung durch P(U) auf den stationären Zustand. Die Phasenspannung von L1 wird nach dem Spannungsfall des Netzsimulators aufgrund der Verringerung der Wirkleistung und der Bereitstellung von Blindleistung erhöht. Die Änderungen der Phasenspannungen von L2 und L3 werden durch die unsymmetrische Leistung bzw. den unsymmetrischen Strom verursacht, was zu einem Neutralleiterstrom und damit zu einem Spannungsfall über dem Neutralleiter führt. Dies führt zu einer Änderung des Spannungspotentials des Sternpunktes am Anschlusspunkt des Prüflings, weshalb auch die Phasenspannungen von L2 und L3 beeinflusst werden. Die Abweichung der Phasenverschiebung vom Idealwert -120° ist vor allem auf die unsymmetrische Bereitstellung von Blindleistung zurückzuführen. In Niederspannungsnetzen mit einem R/X -Verhältnis > 1 hat die Blindleistung einen größeren Einfluss auf den Phasenwinkel und die Wirkleistung einen

größeren Einfluss auf den Effektivwert bzw. die Amplitude. Eine Änderung des Winkels von nur einer Phasenspannung führt zu Änderungen der Phasenverschiebungen. Zusätzlich führt eine unterschiedliche Änderung aller drei Phasenwinkel, z. B. aufgrund einer unsymmetrischen Leistung, ebenfalls zu Änderungen der Phasenverschiebungen. [DIM24]

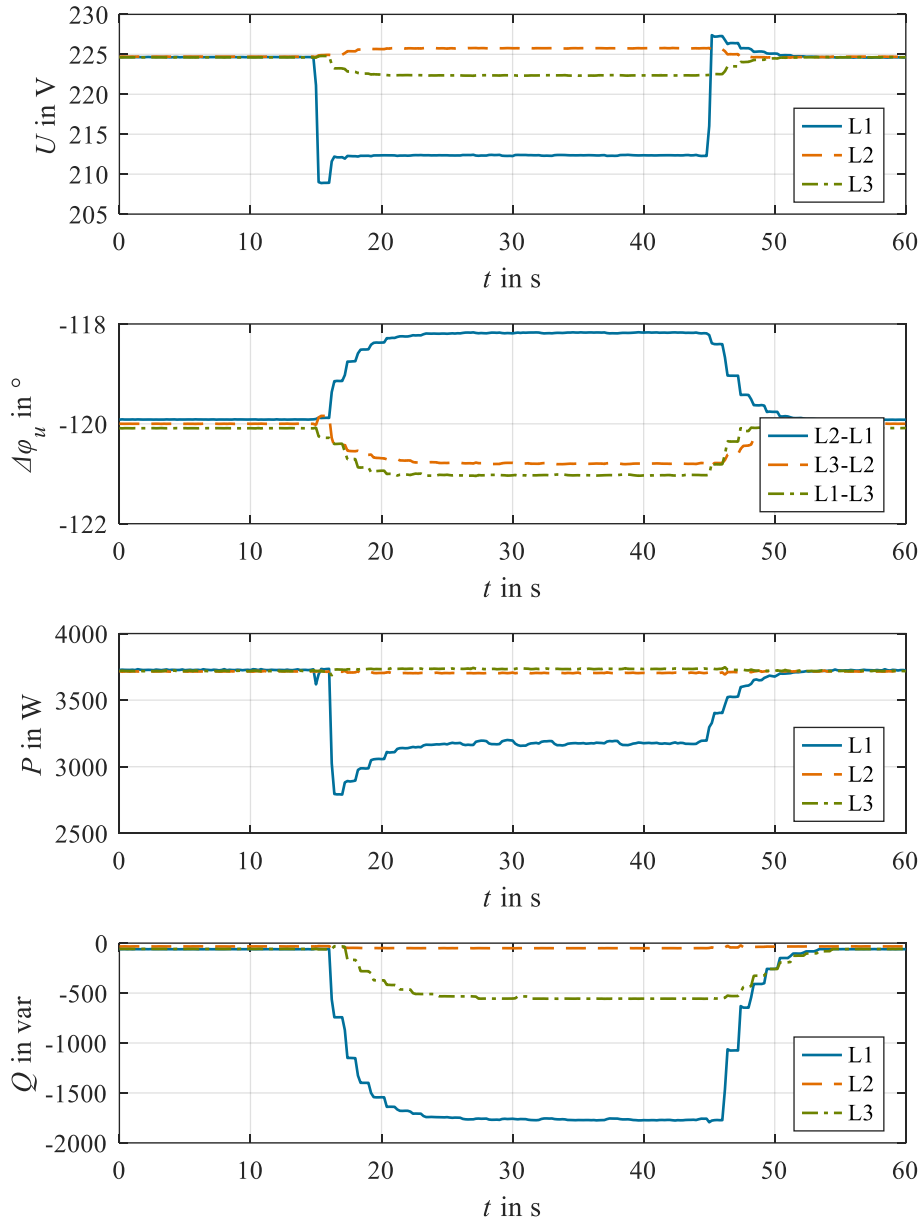


Abbildung 2-103: Phasenspannungen, Phasenverschiebungen, Wirkleistung und Blindleistung für Index 7 des Netzsimulatorprofils mit den Spannungseffektivwertänderungen und $P(U)$ & $Q(U)$ in Anlehnung an [DIM24]

Tabelle 2-14 zeigt die k_{u2} -Werte und Phasenverschiebungen für die verschiedenen Punkte des Netzsimulatorprofils in Tabelle 2-12, wenn $Q(\Delta\varphi_u)$ angewendet wird. Die Bereitstellung von Blindleistung durch $Q(\Delta\varphi_u)$ führt zu einer Annäherung der Phasenverschiebungen an den Idealwert von -120° , was zu einer Verringerung der k_{u2} -Werte führt. Im Vergleich zu $Q(U)$ führt $Q(\Delta\varphi_u)$ auch bei geringerer Blindleistungsbereitstellung zu einer verstärkten Reduzierung der Spannungsunsymmetrie. Dies resultiert aus dem Verhältnis $R/X > 1$, wodurch die Blindleistung

einen größeren Einfluss auf die Spannungsphasenwinkel als auf die Effektivwerte hat. Bei Index 6 wird beispielsweise die Spannungsunsymmetrie bei einer Blindleistungsbereitstellung von 863,0 var um 0,16 Prozentpunkte reduziert. Die höchste k_{u2} -Reduktion beträgt 0,32 Prozentpunkte (Index 20). Sie ergibt sich im betrachteten Punkt des Netzsimulatorprofils durch die Bereitstellung der maximalen Blindleistung auf dem Außenleiter L2. [DIM24]

Tabelle 2-14: k_{u2} in % für die Regelungsansätze in den Tests mit dem Netzsimulatorprofil für die Änderungen Spannungseffektivwerte in Anlehnung an [DIM24]

Index	None			Q($\Delta\varphi_u$)				
	k_{u2} in %	$\Delta\varphi_{uL2L1}$ in °	$\Delta\varphi_{uL3L2}$ in °	$\Delta\varphi_{uL1L3}$ in °	k_{u2} in %	$\Delta\varphi_{uL2L1}$ in °	$\Delta\varphi_{uL3L2}$ in °	$\Delta\varphi_{uL1L3}$ in °
1	0,84	-121,39	-119,98	-118,63	0,79	-121,22	-120,00	-118,78
2	1,42	-122,36	-119,99	-117,65	1,27	-121,74	-120,03	-118,23
3	0,92	-118,49	-119,97	-121,54	0,87	-118,73	-119,96	-121,31
4	1,50	-117,51	-119,97	-122,52	1,36	-118,21	-119,94	-121,85
5	0,89	-118,48	-121,43	-120,10	0,83	-118,71	-121,19	-120,11
6	1,47	-117,50	-122,40	-120,10	1,31	-118,16	-121,69	-120,14
7	0,86	-121,39	-118,53	-120,08	0,82	-121,20	-118,73	-120,07
8	1,45	-122,37	-117,55	-120,08	1,31	-121,75	-118,20	-120,05
9	0,85	-119,93	-121,44	-118,64	0,79	-119,92	-121,26	-118,82
10	1,43	-119,93	-122,41	-117,67	1,27	-119,90	-121,78	-118,33
11	0,90	-119,94	-118,52	-121,54	0,86	-119,96	-118,74	-121,30
12	1,49	-119,95	-117,54	-122,51	1,35	-120,00	-118,18	-121,82
13	1,49	-122,84	-118,53	-118,63	1,39	-122,48	-118,75	-118,77
14	2,48	-124,78	-117,57	-117,65	2,22	-123,53	-118,25	-118,22
15	1,55	-117,02	-121,43	-121,55	1,49	-117,45	-121,24	-121,31
16	2,58	-115,07	-122,40	-122,53	2,35	-116,43	-121,74	-121,83
17	1,74	-122,85	-117,07	-120,08	1,55	-122,01	-117,96	-120,03
18	2,91	-124,79	-115,13	-120,08	2,59	-123,35	-116,68	-119,98
19	1,76	-117,02	-122,88	-120,10	1,55	-117,92	-121,84	-120,24
20	2,93	-115,07	-124,82	-120,11	2,61	-116,42	-123,15	-120,43

Als Beispiel zeigt Abbildung 2-104 für Index 18 des Profils mit den Änderungen der Phasenwinkel die Phasenspannungen sowie die Phasenverschiebungen und die Blindleistung bei Anwendung von Q($\Delta\varphi_u$). Die Änderung der Phasenwinkel am Netzsimulator wird bei 15 s eingestellt. Aufgrund der resultierenden Phasenverschiebungen stellt Q($\Delta\varphi_u$) Blindleistung an der Phase L2 bereit, die die Phasenverschiebungen reduziert. Die Blindleistung führt auch zu einer Spannungsänderung an der Phase L2 sowie an L1 und L3, weil die einphasige Blindleistungsbereitstellung zu einem Spannungsfall über dem Neutralleiter führt. Nach 45 s werden die Spannungsphasenwinkel am Netzsimulator auf den Nennwert zurückgesetzt.

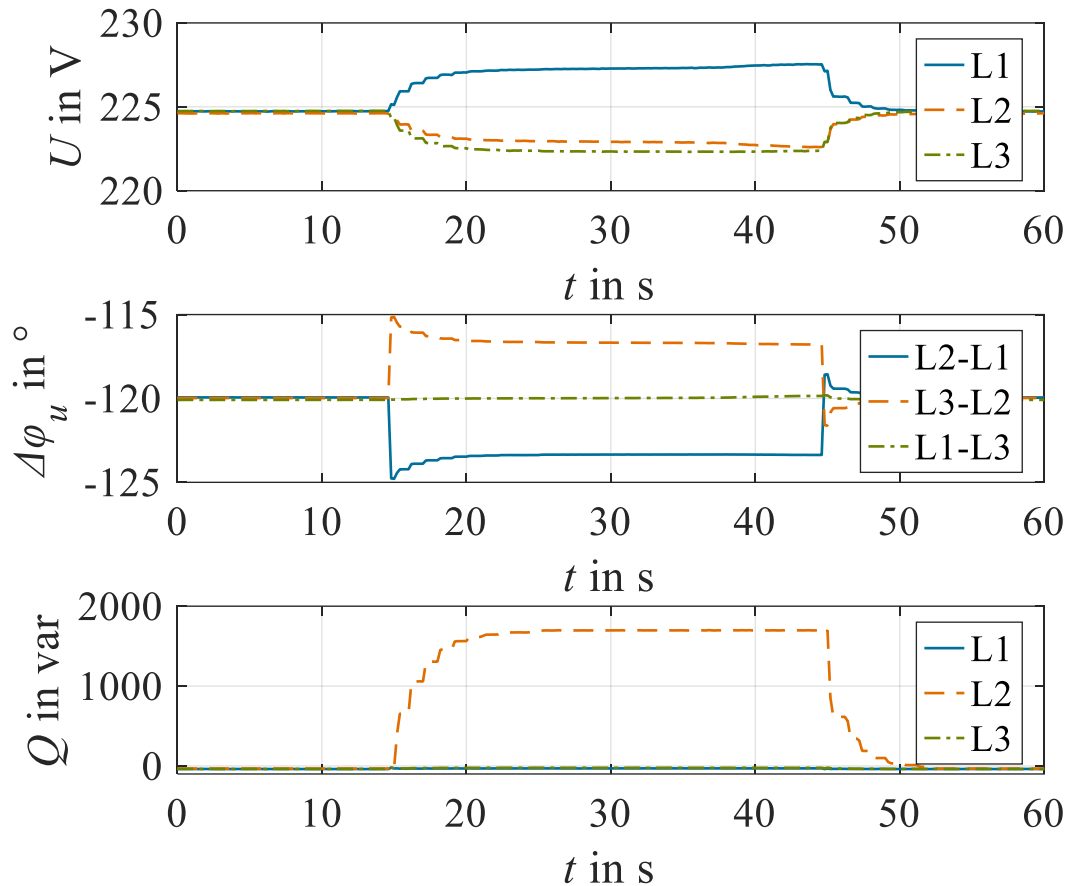


Abbildung 2-104: Phasenspannungen, Phasenverschiebungen, Wirkleistung und Blindleistung für Index 18 des Netzsimulatorprofils mit den Phasenwinkeländerungen und $Q(\Delta\varphi_u)$ in Anlehnung an [DIM24]

Zusammenfassend ist in Niederspannungsnetzen mit einem R/X -Verhältnis > 1 die phasengenaue $P(U)$ und die $Q(\Delta\varphi_u)$ zur Reduzierung von Spannungsunsymmetrie geeignet. Die symmetrische Variante von $P(U)$, bei der der Mittelwert der drei Phasenspannungen verwendet wird, hat nur geringe Einflüsse auf die Spannungsunsymmetrie. Durch die Reduzierung der Wirkleistung beim Laden von Elektrofahrzeugen können hohe Fälle des Spannungseffektivwerts verringert werden. Im Vergleich dazu können die Phasenwinkel und damit die Phasenverschiebungen mit Blindleistung effizienter beeinflusst werden als die Spannungseffektivwerte. Die Laboruntersuchungen zeigen, dass die $Q(U)$ -Regelung einen Beitrag zur statischen Spannungshaltung liefert. Im Vergleich zur $Q(\Delta\varphi_u)$ -Regelung ist die phasengenaue $Q(U)$ -Regelung nicht zur Reduzierung der Spannungsunsymmetrie geeignet. Die symmetrische Variante der $Q(U)$ -Regelung hat wenig Einfluss auf die Spannungsunsymmetrie.

2.4 Feldtest induktiv (AP 3.2)

Installation des Systems bei Fairsenden in Berlin

Vor der Auslieferung wurde das Versuchsfahrzeug umfassend auf Funktion und Zuverlässigkeit überprüft, um während des Feldtests eine einwandfreie Funktion gewährleisten zu können. Nach dem erfolgreichen Abschluss dieser Tests erfolgte für die Durchführung des Feldtests die Überstellung des Fahrzeugs nach Berlin zum Projektpartner Fairsenden. Die für den Betrieb des Ladesystems notwendige Infrastruktur (Herstellen einer geeigneten Stromversorgung, Installationsarbeiten etc.) wurde im Vorfeld beauftragt und durchgeführt, anschließend erfolgte die Installation des Systems. Abbildung 2-105 zeigt die primäre Ladeplatte und den e-Crafter am Einsatzort bei Fairsenden. Durch die örtlichen Gegebenheiten des Paketdepots von Fairsenden wird das Ladepad so angeordnet, dass das Fahrzeug während des Ladevorgangs parallel zur Wand des Paketdepots steht und über die Hecktüren direkt aus dem Depot beladen werden kann. Der Schaltschrank mit der Leistungselektronik für die Primärseite wird im Gebäude derart an der Außenwand positioniert, dass die Verbindung zum Ladepad außen möglichst kurz ausfällt. Zusätzlich zu der elektronischen Positionierhilfe im Fahrzeug werden vor dem Ladepad zwei Schwellen auf der Straße montiert, die eine zusätzliche mechanische Unterstützung für die Positionierung bieten.



Abbildung 2-105: Einsatzbereite Primärkomponenten des Ladesystems in Berlin

Installation des Systems an der TU Braunschweig

Nach dem Ende des Feldtests in Berlin wurde das System zur TU Braunschweig an das Niedersächsische Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) verlegt. Abbildung 2-106 zeigt das fertig installierte Ladesystem am NFF. Fahrzeug und Ladesystem werden dort hauptsächlich vom Fachbereich Gebäudemanagement der TU Braunschweig genutzt, der z. B. für die Haustechnik der Universität zuständig ist. Da sich die einzelnen Liegenschaften der TU über einen größeren Bereich der Stadt Braunschweig erstrecken, entsteht in der Nutzung ein Fahrprofil, das dem aus dem Feldtest in Berlin in den Grundzügen ähnelt. Durch die Verlegung an die TU konnte die Feldtestdauer auch über das Projektende hinaus verlängert werden, gleichzeitig ist die Zugänglichkeit des Systems für Prüfungen und Messungen vereinfacht worden.

Die baulichen Gegebenheiten in Braunschweig sind denen in Berlin ähnlich, im direkten Vergleich musste die Zuleitung vom Wechselrichter zur Primärspule um ca. 2,5 Meter verlängert werden. Die Auswirkungen dieser Änderung wurden untersucht und als nicht relevant für das Systemverhalten eingestuft.



Abbildung 2-106: Einsatzbereites Ladesystem an der TU Braunschweig

Auswertungen

In dem Primärschalterschrank des induktiven Ladesystems ist ein Netzqualitätsanalysegerät implementiert, welches verschiedene elektrische Größen am Netzeingang aufnimmt. Es werden die Spannung, der Strom, die Wirkleistung und die Blindleistung aufgenommen. Die Werte werden mit einer Zeitschrittweite von 10 s aufgezeichnet. Als Gerät wird wie in den

Laboruntersuchungen in Abschnitt 2.3.3 ein Linax PQ5000 der Firma Gossen Metrawatt genutzt. Darüber hinaus werden mit dem EVCC des induktiven Ladesystems im Fahrzeug die DC-Ladedaten (Spannung, Strom, SoC) aufgezeichnet.

Im Feldtest in Berlin bei Fairsenden wurden an dem Anschlusskasten des induktiven Ladesystems Messdaten mit einer PQ-Box aufgenommen. Abbildung 2-107 zeigt den Lastverlauf am Anschlusspunkt des induktiven Ladesystems für einen Tag des Feldtests bei Fairsenden. Die Zwischenladestopps um ca. 10:30 Uhr und 12:30 Uhr zeigen, dass das System zum Gelegenheitsladen genutzt wird.

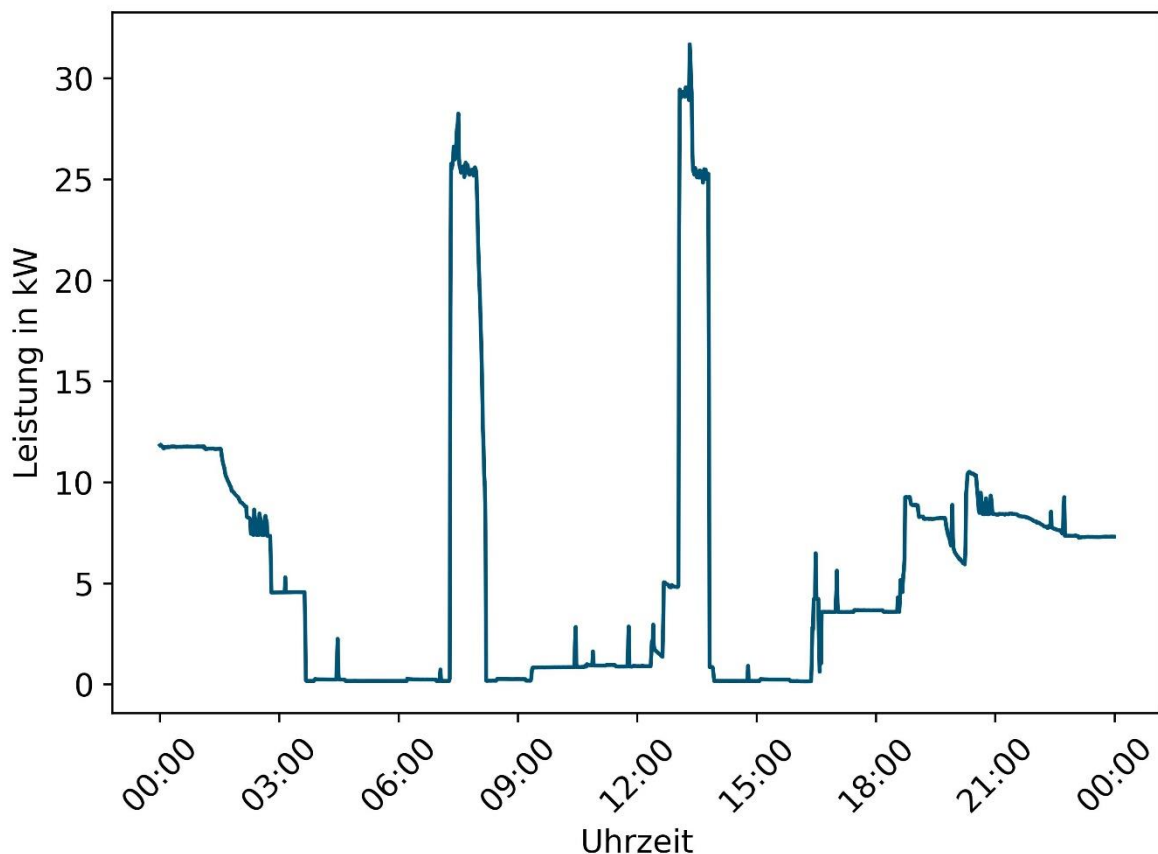


Abbildung 2-107: Ladevorgänge an einem Tag des Feldtests in Berlin

Tabelle 2-15 und Tabelle 2-16 zeigen für die induktiven Feldtests den Anteil der Ladevorgänge für verschiedene Bereiche nachgeladener Energie. Die Ladeenergie entspricht den Werten, die an der Hochvoltbatterie des VW e-Crafter gemessen wird. Der VW e-Crafter hat eine Nettokapazität von 31,7 kWh [VOL24]. Sowohl beim Feldtest in Berlin als auch bei dem Feldtest am NFF wurde bei etwa 60 % der Ladevorgänge ein Energiewert von ≤ 15 kWh nachgeladen. Folglich ist die Ladeenergie im Großteil der Ladevorgänge kleiner als die Hälfte der Nettokapazität. Dies zeigt, dass der Anteil der Gelegenheitsladevorgänge hoch ist. Im Vergleich zum konduktiven Laden bei Fairsenden war beim induktiven Laden in Berlin das Gelegenheitsladen ausgeprägter.

Tabelle 2-15: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests in Berlin nach geladener Energie

Ladeenergiebereich	Anteil der Ladevorgänge in %
Ladeenergie ≤ 5 kWh	30
5 kWh < Ladeenergie ≤ 10 kWh	17
10 kWh < Ladeenergie ≤ 15 kWh	13
15 kWh < Ladeenergie ≤ 20 kWh	26
20 kWh < Ladeenergie ≤ 25 kWh	13

Tabelle 2-16: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests am NFF nach geladener Energie

Ladeenergiebereich	Anteil der Ladevorgänge in %
Ladeenergie ≤ 5 kWh	6
5 kWh < Ladeenergie ≤ 10 kWh	31
10 kWh < Ladeenergie ≤ 15 kWh	25
15 kWh < Ladeenergie ≤ 20 kWh	19
20 kWh < Ladeenergie ≤ 25 kWh	19

Tabelle 2-17 und Tabelle 2-18 zeigen, zu welchen Uhrzeiten die Ladevorgänge in den induktiven Feldtests starteten. Ein Großteil der Ladevorgänge startete in der Zeit zwischen 10:00 Uhr und 16:00 Uhr. Beim Feldtest in Berlin ist der Anteil der Ladevorgänge mit Startzeitpunkt zwischen 04:00 Uhr und 10:00 Uhr erheblich höher, weil der Arbeitsbeginn im Logistikbereich bei Fairsenden früher ist als beim Gebäudemanagement der TU Braunschweig. Im Bereich zwischen 22:00 Uhr und 04:00 Uhr starteten keine Ladevorgänge. Folglich endete die letzte Fahrt des Fahrzeugs an einem Tag stets vor 22:00 Uhr.

Die aufgenommenen Daten zu den Ladevorgängen zeigen, dass das induktive Ladesystem alltäglich genutzt wurde. Es fanden Ladevorgänge nach Betriebsende sowie Zwischenladestopps über den Tag verteilt statt. Die induktive Ladetechnik bietet eine einfache und nutzerfreundliche Integration des Gelegenheitsladens. Ladevorgänge können direkt aus dem Fahrerraum nach Ende einer Fahrt gestartet werden. Dies zeigt das Potenzial des kontaktlosen Ladens im Hinblick auf die Vereinfachung von Betriebsabläufen. Mit dem Erprobungsfahrzeug wurden bis zu drei induktive Ladevorgänge pro Tag durchgeführt. Hierbei kommt der Vorteil des einfachen und nutzerfreundlichen Startens von Ladevorgängen zur Geltung. Ein positiver Effekt von mehreren Ladevorgängen ist, dass sich die Reichweite von Fahrzeugen im Betriebsablauf erhöht. Der Vorteil der Nutzerfreundlichkeit reduziert obendrein die Chance, dass Ladevorgänge im Betriebsablauf vergessen werden. Ein weiterer Nutzen des kontaktlosen Ladens im Logistikbetrieb ist der Wegfall des Ladekabels, das beim Be- und Entladen von Fahrzeugen ein Störfaktor sein kann. Darüber hinaus wurde das Erprobungsfahrzeug im Rahmen des Feldtests ausschließlich induktiv geladen, obwohl

konduktives Laden weiterhin möglich war. Dies zeigt die Zuverlässigkeit der induktiven Ladetechnologie. [TUB24]

Tabelle 2-17: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests in Berlin nach Uhrzeit der Starte

Uhrzeit Ladestart	Anteil der Ladevorgänge in %
04:00 Uhr < Ladestart ≤ 10:00 Uhr	39
10:00 Uhr < Ladestart ≤ 16:00 Uhr	52
16:00 Uhr < Ladestart ≤ 22:00 Uhr	9
22:00 Uhr < Ladestart ≤ 04:00 Uhr	0

Tabelle 2-18: Unterteilung der induktiven Ladevorgänge des Feldtests am NFF nach Uhrzeit der Starte

Uhrzeit Ladestart	Anteil der Ladevorgänge in %
04:00 Uhr < Ladestart ≤ 10:00 Uhr	6
10:00 Uhr < Ladestart ≤ 16:00 Uhr	88
16:00 Uhr < Ladestart ≤ 22:00 Uhr	6
22:00 Uhr < Ladestart ≤ 04:00 Uhr	0

Beim Feldtest am NFF wurden bei einzelnen induktiven Ladevorgängen am Netzeingang Messungen mit einem Power-Quality-Netzanalysator durchgeführt. Als Gerät wurde eine PQ-Box 200 der Firma A. Eberle genutzt. Die Messungen sind mit einer Schrittweite von 1 s höher aufgelöst als die Messungen mit dem Linax PQ5000. Zusätzlich werden im Vergleich zum Linax PQ5000 weitere Größen aufgezeichnet wie z. B. Spannungsqualitätsparameter. Abbildung 2-108 zeigt für einen induktiven Ladevorgang mit dem e-Crafter den SoC und die DC-Ladeleistung. Es ist das CCCV-Ladeverfahren zu erkennen. Bis zum Zeitpunkt von ca. 45 min ist die Ladeleistung konstant bei einem Wert von ca. 22 kW. Dies entspricht der Konstantstromphase. Danach nimmt sie kontinuierlich in der Konstantspannungsphase bis zu einem Wert von ca. 9 kW ab. Dann ist ein SoC von 100 % erreicht und der Ladevorgang wird beendet. Abbildung 2-109 zeigt darüber hinaus die Spannung der Fahrzeugbatterie. Ebenfalls bei ca. 45 min flacht der Spannungsanstieg ab. Anschließend ist die Spannung näherungsweise konstant.

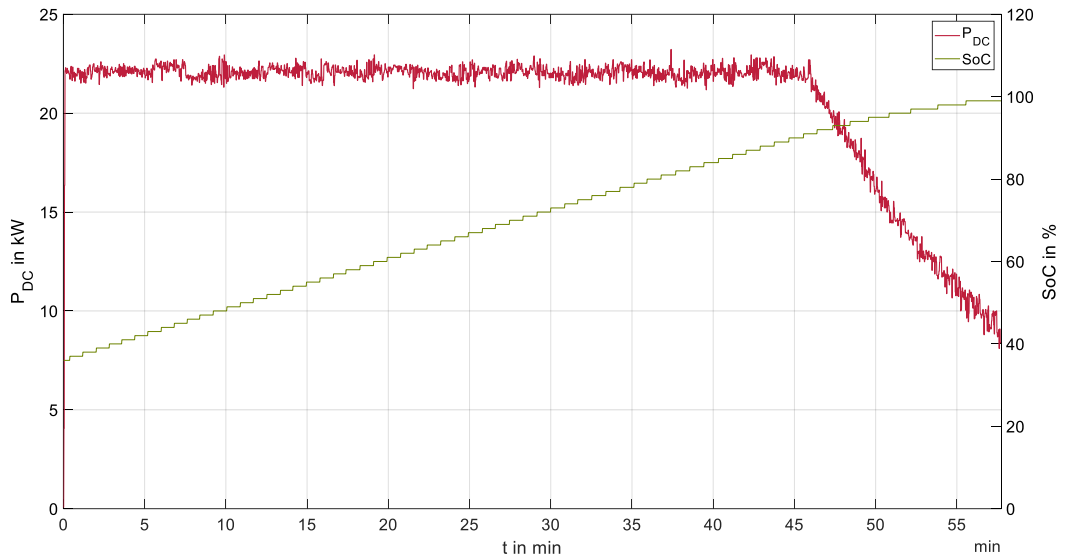


Abbildung 2-108: Ladezustand und Wirkleistung DC eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF

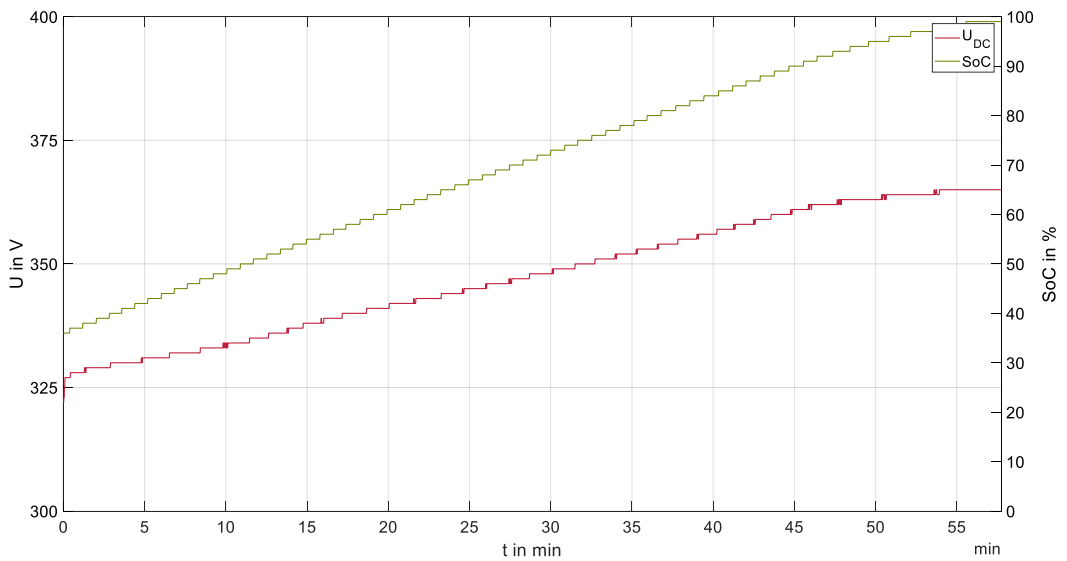


Abbildung 2-109: Ladezustand und Spannung DC eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF

Abbildung 2-110 zeigt die Wirk-, Blind- und Scheinleistung des induktiven Ladevorgangs am Netzeingang in Summe über alle drei Außenleiter. Es ist zu erkennen, dass das AFE untererregtes Verhalten aufweist. Die Blindleistung über alle drei Außenleiter beträgt ca. 12 kvar. Durch Einstellung des Blindleistungssollwertes des AFE ist dieser Wert anpassbar. Die Wirkleistung beträgt ca. 25 kW. Abbildung 2-111 stellt den Leistungsfaktor dar. Er beträgt in der Konstantstromphase ca. 0,9 und nimmt in der Konstantspannungsphase ab 45 min kontinuierlich ab, weil die Ladeleistung reduziert wird, jedoch die Blindleistung nahezu konstant bleibt.

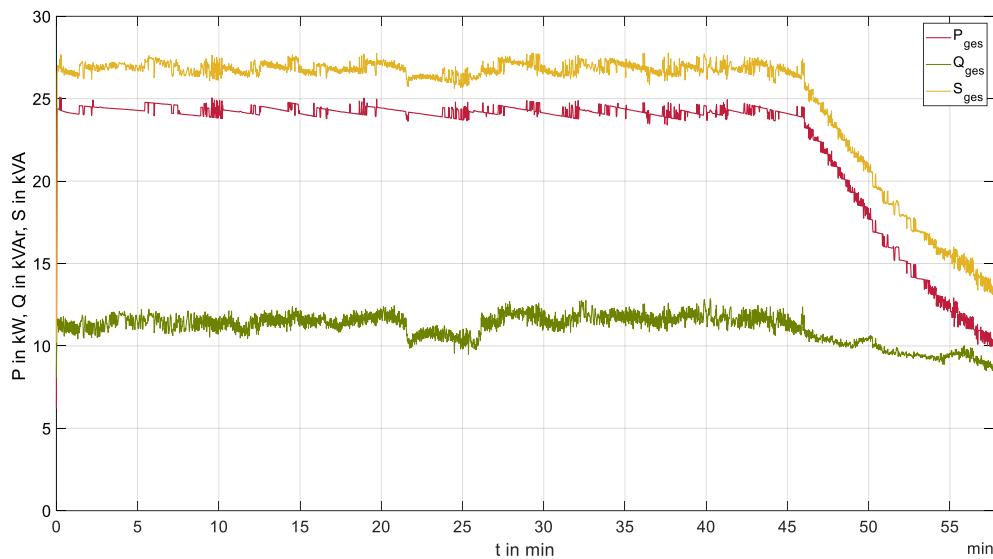


Abbildung 2-110: Wirk-, Blind- und Scheinleistung am Netzeingang eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF

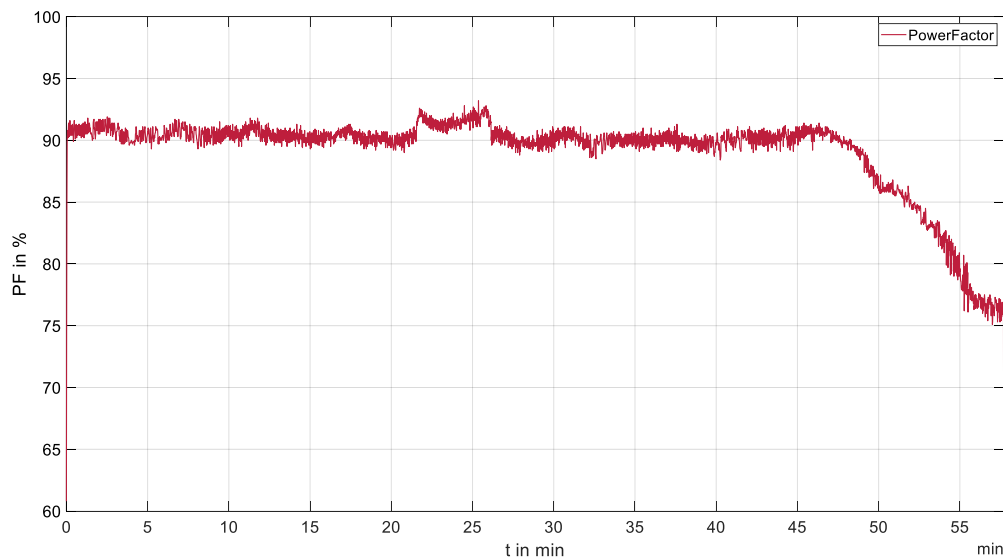


Abbildung 2-111: Leistungsfaktor am Netzeingang eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF

Abbildung 2-112 zeigt den Wirkungsgrad des induktiven Ladevorgangs. Berücksichtigt wird die Wirkleistung am Netzeingang und an der Batterie des e-Crafter. Der Wirkungsgrad liegt in der Konstantstromphase im Bereich von 91 %. In der Konstantspannungsphase nehmen die Schwankungen aufgrund der Leistungsreduzierung erheblich zu. Dies zeigt, dass mit induktivem Laden im praktischen Einsatz vergleichbare Wirkungsgrade zum kabelgebundenen Laden möglich sind.

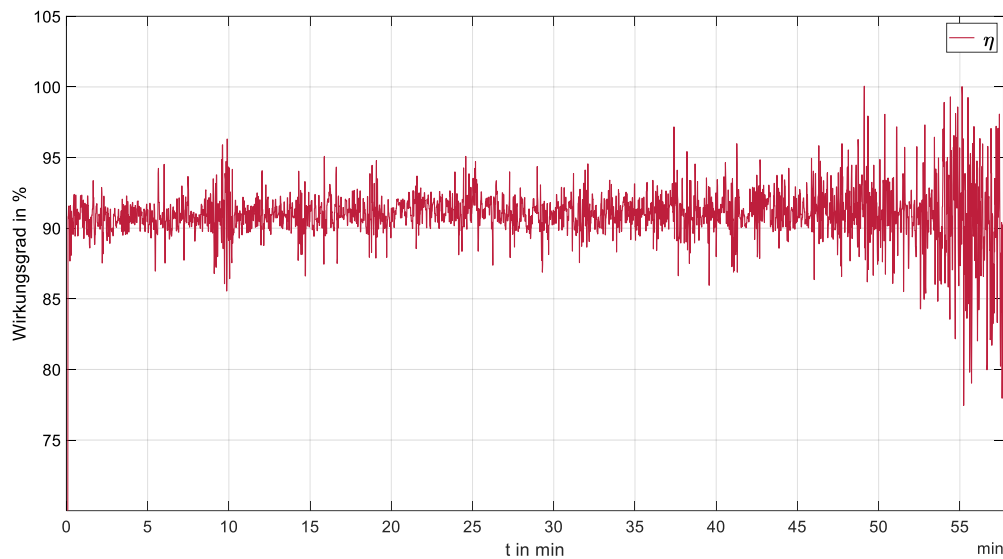


Abbildung 2-112: Wirkungsgrad eines induktiven Ladevorgangs mit dem e-Crafter am NFF

Die induktive Ladestation befindet sich am NFF in der Nähe der Trafostation, weshalb die Ladevorgänge nur geringe Auswirkungen auf die Netzspannung haben. Deshalb sind netzorientierte Methoden zur Spannungshaltung an diesem Netzverknüpfungspunkt nicht notwendig.

Abbildung 2-113 zeigt im Vergleich dazu einen Ladevorgang des e-Crafter an einer herkömmlichen DC-Ladesäule. Als Ladesäule wurde eine EVTEC coffee&charge 3in1 genutzt. Die Abbildung stellt den Verlauf der DC-Wirkleistung und der DC-Spannung der Fahrzeugbatterie dar. Der Ladeverlauf entspricht dem CCCV-Ladeverfahren. Die Ladespannung steigt und bleibt ab ca. 95 min konstant. Der Spannungsanstieg zu Beginn entspricht dem Cable Check, der beim DC-Laden vor Start des Ladevorgangs erforderlich ist. Die Ladeleistung steigt, weil die maximale Ladeleistung des e-Crafter aufgrund der Strombegrenzung der Ladesäule nicht erreicht wird. Die Ladesäule ist auf einen DC-Strom von 50 A begrenzt [EVT24]. Aufgrund des Spannungsanstiegs steigt auch die Ladeleistung. Der Ladevorgang ist bei ca. 105 min abgeschlossen. Die Ladeleistung entspricht zu diesem Zeitpunkt ca. 9 kW. Dieser Wert ist identisch zu dem Ladeendwert beim induktiven Laden in Abbildung 2-108. Der DC-Spannungsverlauf ist mit Ausnahme der Spannungsspitze des Cable Checks identisch zu dem des induktiven Ladevorgangs in Abbildung 2-109. Das gleiche Verhalten auf der DC-Seite ist beim induktiven Laden und konduktiven DC-Laden zu erwarten, weil das induktive Ladesystem die CCS-Schnittstelle nutzt.

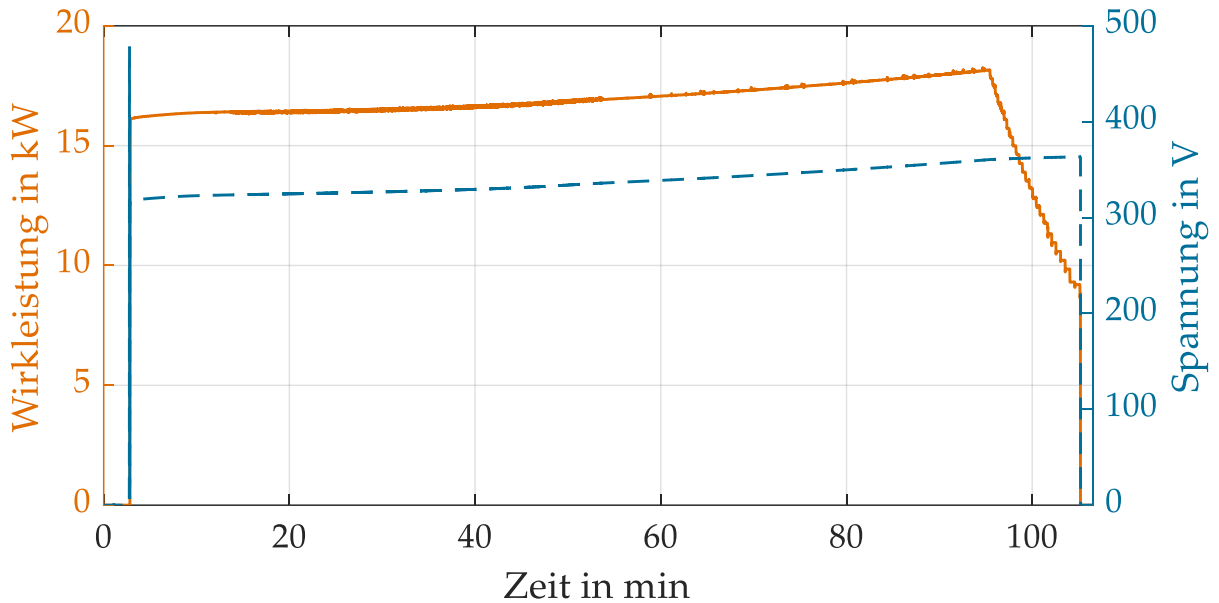


Abbildung 2-113: DC-Ladeleistung und -Spannung eines konduktiven DC-Ladevorgangs mit dem e-Crafter

Messungen der Übertragungssystemeffizienz auf dem Prüfstand

Neben den Messungen am Versuchsfahrzeug wurden zusätzlich Messungen an den parallel aufgebauten Prüfständen durchgeführt, um die Auslegung des Systems zu verifizieren und das Systemverhalten weiter zu untersuchen.

Dazu wurden u. a. Messungen der Hauptinduktivität bei horizontalem Versatz (x - und y -Richtung) und vertikalem Abstand (z -Richtung) der Spulen und Messungen der Effizienz des Gesamtsystems bei Spulenversatz und veränderlicher Zwischenkreis- und Batteriespannung vorgenommen. Für die Effizienzmessung wurde die Eingangsleistung P_1 am Ausgang des regelbaren Gleichspannungsnetzteils und die Ausgangsleistung P_2 am Ausgang des Sekundärgleichrichters definiert (siehe Abbildung 2-114).

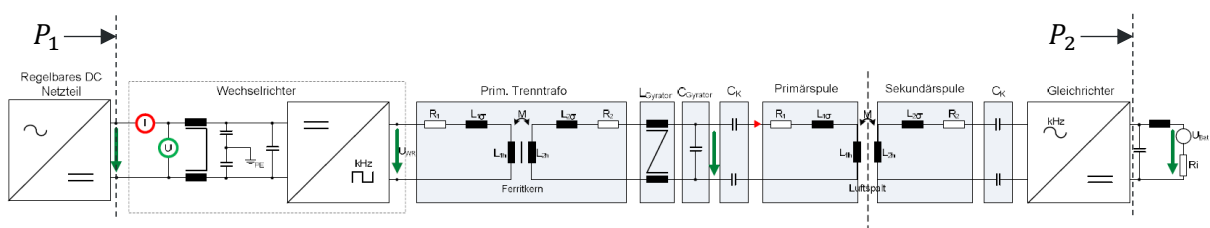


Abbildung 2-114: Schematischer Aufbau des Induktivladesystems mit Leistungsmesspunkten

Für die Messung des Wirkungsgrades wird ein Leistungsmessgerät vom Typ Hioki PW6001 mit den zugehörigen Stromsensoren CT6904A verwendet. Als Batterienachbildung wird eine rückspeisefähige Gleichspannungsquelle (Regatron TopCon TC-GSS) verwendet, die als Senke arbeitet. Als speisendes Netzteil kommt eine bidirektionale Laborstromversorgung PSB 11000-80 der Firma Elektroautomatik zum Einsatz.

Für die Prüfstandmessungen wurden weitere Spulen aufgebaut, die mit den Spulen am Fahrzeug übereinstimmen. Die leistungselektronischen Komponenten wurden ebenfalls dupliziert. Als sekundärseitige Leistungselektronik wurde für diese Messungen das bereits für die Auslegungsverifikationen genutzte Labormuster eingesetzt.

Für die Wirkungsgradmessungen wurden neben Versatz und Abstand auch die Batteriespannung $U_{\text{Batt}} = \{320, 340, 365\} \text{ V}$ und die Zwischenkreisspannung am Ausgang des regelbaren DC-Netzteils $U_{\text{ZK}} = \{600, 650, 700\} \text{ V}$ variiert. Die Eingangsleistung des Wechselrichters wird konstant bei 22 kW eingeregelt.

Abbildung 2-115 zeigt den Wirkungsgrad des Induktivladesystems über dem Versatz in x -Richtung und dem Abstand in z -Richtung. Er liegt im gesamten Bereich zwischen 94 % und 95,5 %. Je größer der Versatz und der Abstand sind, desto größer wird der Wirkungsgrad. Das bedeutet, dass der Wirkungsgrad mit schlechterer Kopplung steigt.

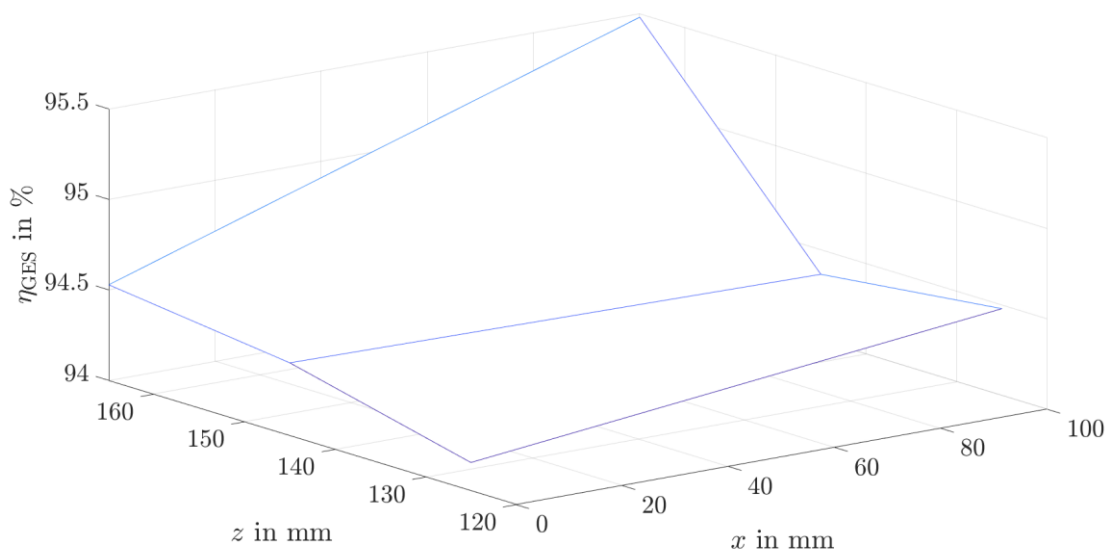


Abbildung 2-115: Wirkungsgrad des Gesamtsystems über dem Versatz in x - und z -Richtung für $y = 75 \text{ mm}$, $U_{\text{ZK}} = 650 \text{ V}$, $U_{\text{Batt}} = 340 \text{ V}$

Die in Abbildung 2-116 dargestellten Messergebnisse zeigen, dass mit kleinerer Zwischenkreisspannung U_{ZK} und zunehmender Batteriespannung U_{Batt} , der Wirkungsgrad steigt. Auch hier liegen die gemessenen Werte zwischen 94 % und 95,5 %.

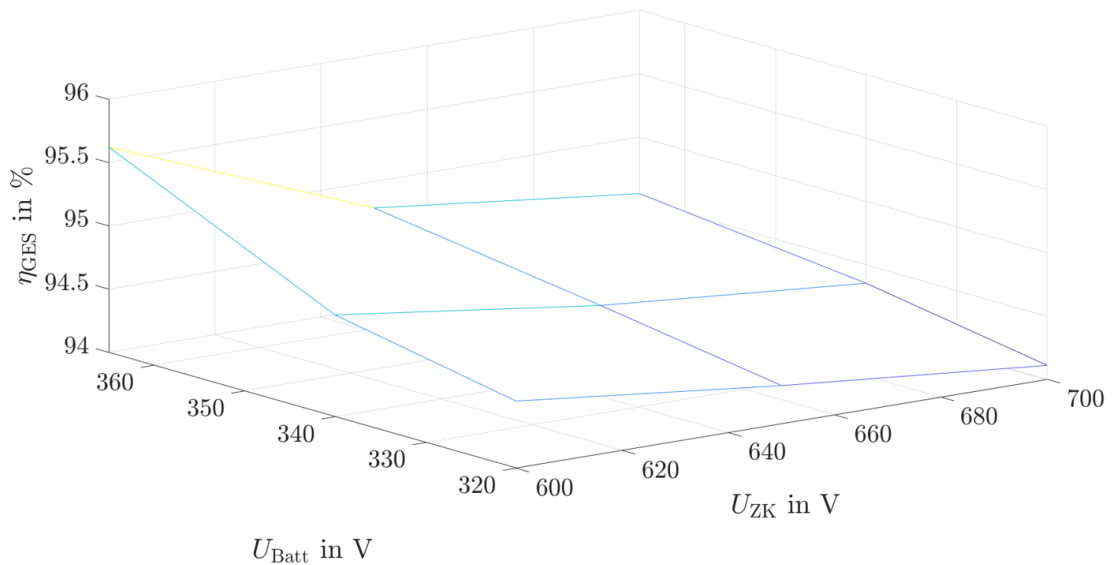


Abbildung 2-116: Wirkungsgrad des Gesamtsystems über der Batteriespannung U_{Batt} und der Zwischenkreisspannung U_{ZK} des Wechselrichters für $x = 0$ mm, $y = 75$ mm und $z = 165$ mm

Dass der Gesamtwirkungsgrad bei schlechterer Kopplung steigt, lässt sich nachvollziehen, wenn die Wirkungsgrade einzelner Komponenten gemessen werden. In Abbildung 2-117 sind die Wirkungsgrade des Wechselrichters, der induktiven Energieübertragung und des Gleichrichters über dem Abstand in z -Richtung aufgetragen. Für z werden die Werte 125, 145 und 165 mm verwendet.

Aufgrund der konstanten Übertragungsleistung und der konstanten Batteriespannung sind der Ausgangsstrom und damit der Arbeitspunkt des Gleichrichters versatzunabhängig. Das induktive Übertragungssystem wird mit steigendem Abstand in z -Richtung ineffizienter. Der Effizienzunterschied zwischen $z = 125$ mm und $z = 165$ mm beträgt näherungsweise 0,7 Prozentpunkte.

Der Wechselrichter hingegen arbeitet bei schlechterer Kopplung effizienter, wie Abbildung 2-117 zeigt, und kompensiert damit den Abfall des Wirkungsgrads des induktiven Übertragungssystems, sodass der Gesamtwirkungsgrad näherungsweise konstant bleibt. Zur Erklärung des Verhaltens des Wechselrichters sind die zeitlichen Strom- und Spannungsverläufe bei $x = 0$ mm (gute Kopplung) und $x = 100$ mm (schlechte Kopplung) in Abbildung 2-118 und Abbildung 2-119 dargestellt. Wie oben beschrieben ist bei schlechterer Kopplung ein stärkeres Magnetfeld nötig, welches durch eine größere Wechselrichterspannung bzw. einer größeren Einschaltdauer erreicht wird (vgl. Abbildung 2-118 und Abbildung 2-119). Bei gleicher Übertragungsleistung folgt daraus ein kleinerer Wechselrichterstrom, wie die beiden Diagramme belegen.

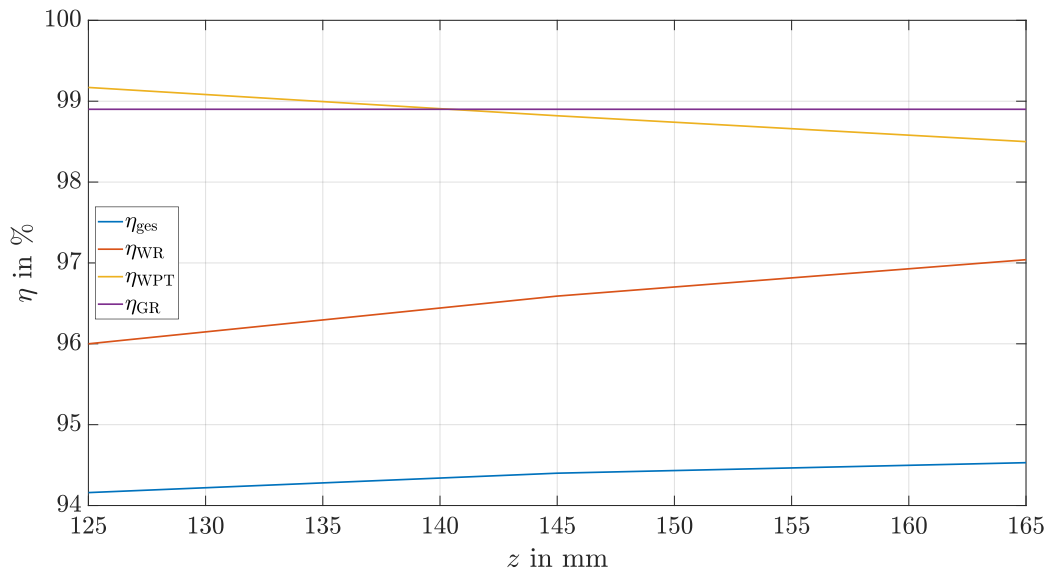


Abbildung 2-117: Wirkungsgrad des Gesamtsystems η_{ges} , des Wechselrichters η_{WR} , der induktiven Energieübertragung η_{WPT} (Primär- zu Sekundärspule) und des Gleichrichters η_{GR} über dem Versatz in x -Richtung für $y = 75$ mm, $U_{ZK} = 650$ V und $U_{Batt} = 340$ V

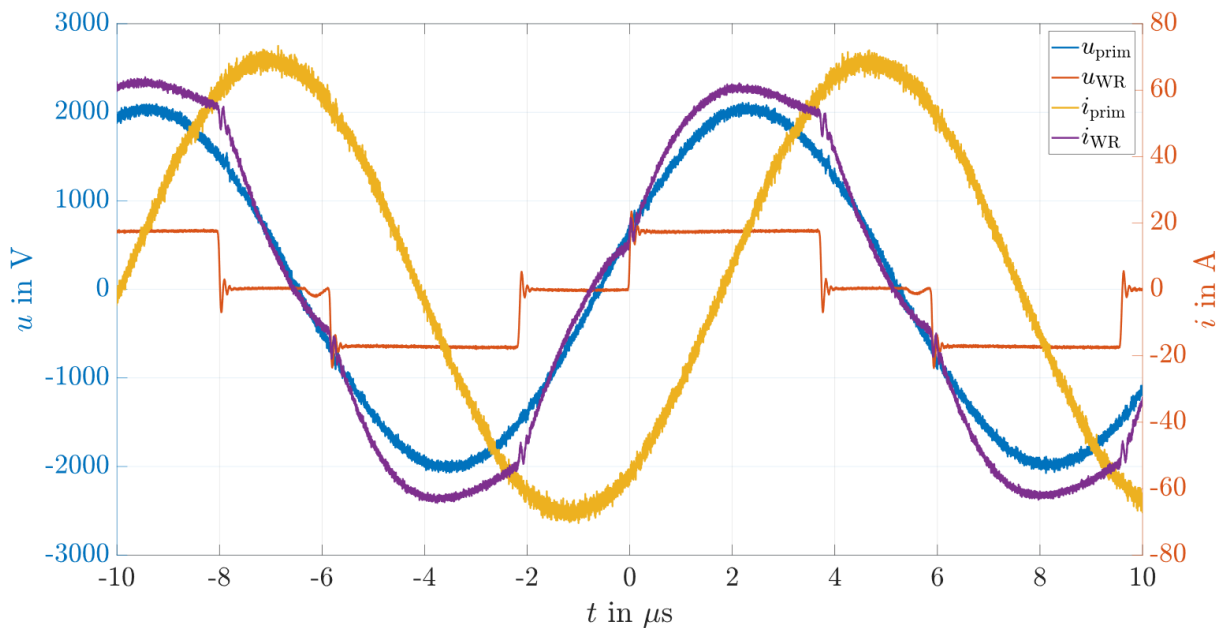


Abbildung 2-118: Zeitliche Verläufe von Spannung und Strom in der Primärspule u_{prim} und i_{prim} und des Wechselrichters u_{WR} und i_{WR} für $x = 0$ mm, $y = 75$ mm, $z = 165$ mm, $U_{ZK} = 365$ V und $U_{Batt} = 340$ V

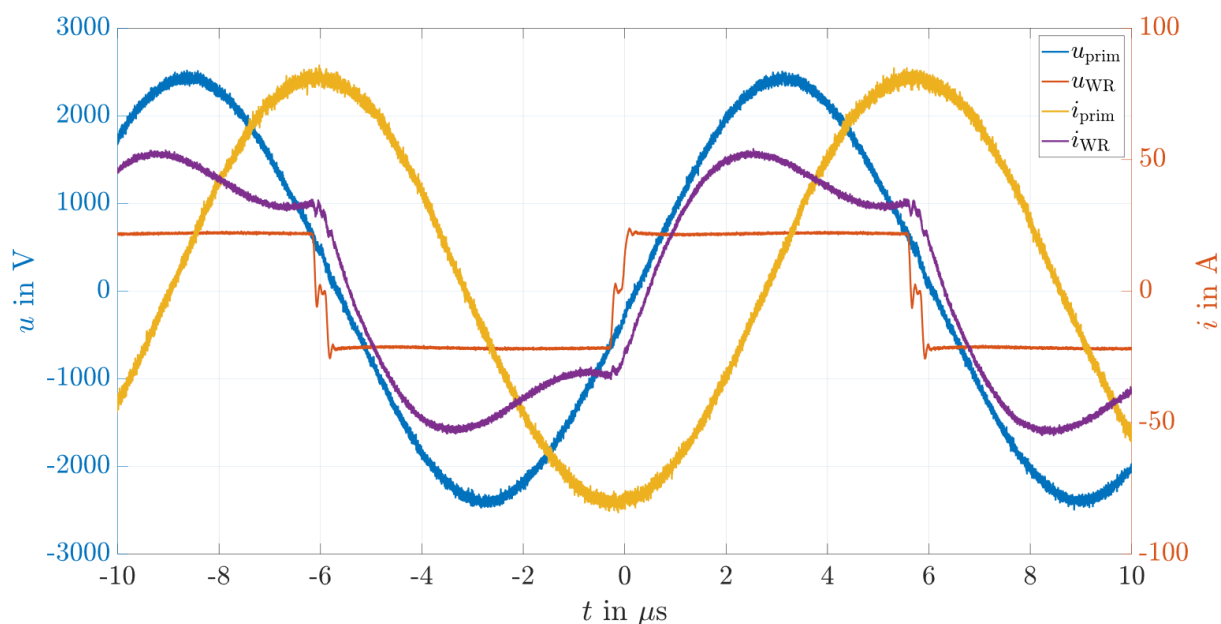


Abbildung 2-119: Zeitliche Verläufe von Spannung und Strom in der Primärspule u_{prim} und i_{prim} und des Wechselrichters u_{WR} und i_{WR} für $x = 100 \text{ mm}$, $y = 75 \text{ mm}$, $z = 165 \text{ mm}$, $U_{\text{ZK}} = 365 \text{ V}$ und $U_{\text{Batt}} = 340 \text{ V}$

Aus den Zeitverläufen wird ersichtlich, dass der Wechselrichter bei größerem Versatz wegen des kleineren Stroms und dem größeren Tastverhältnis bei kleinerem Strom schaltet (siehe Abbildung 2-119), als es bei kleinem Versatz der Fall ist (siehe Abbildung 2-118).

Aus den Messungen folgt das Fazit, dass das entwickelte Induktivladesystem unabhängig von Versatz, Abstand, Zwischenkreisspannung und Batteriespannung die Energie mit einer höheren Effizienz überträgt, als es in der DIN EN IEC 61980-3 gefordert wird. Ein Vergleich gängiger Wirkungsgrade findet sich in [RAM24].

Handlungsempfehlungen

Das hier vorgestellte System erreicht die in der Planungsphase festgelegten technischen Eigenschaften und konnte seine Zuverlässigkeit sowohl in den umfangreichen Auslieferungstests als auch im Einsatz beim Logistikdienstleister bzw. im TU-internen Feldtest nachweisen. Ausgehend von den zuvor dargestellten Erfahrungen der Benutzer können folgende Feststellungen getätigt werden, auf deren Basis jeweils Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

- 1) Induktive Ladetechnik für den lokalen Lieferverkehr

Die Feldversuche haben eine problemlose Integration von Fahrzeugen mit kontaktloser Ladetechnik in den Betriebsablauf gezeigt. Die einfache und nutzerfreundliche Integration von Gelegenheitsladevorgängen bietet Potenzial für die Vereinfachung von Betriebsabläufen im Anwendungsfall City-Logistik. Bezüglich der Infrastrukturausnutzung hat sich in der in Berlin demonstrierten Anwendung gezeigt, dass mit einer einzelnen Ladestation mehrere Fahrzeuge

bedient werden könnten. Drei Fahrzeuge, wie ursprünglich geplant, hätten im Tagesgeschäft vermutlich ein einzelnes Ladepad besser auslasten können. Für längere Ladevorgänge (z. B. nachts) ergibt sich für höher ausgelastete Infrastruktur die Herausforderung, dass die Fahrzeuge zeitweise umgeparkt werden müssen.

Für zukünftige Untersuchungen sind daher auch Anwendungen von Interesse, die einen echten 24-Stunden-Betrieb fahren. Die Rotation der Fahrzeuge auf den Ladestationen wäre dann maximal groß und es würde bei korrekter Wahl des Verhältnisses von Fahrzeugen und Ladestationen die pro Ladestation ermöglichte Fahrstrecke maximiert werden.

2) Dimensionierung des Spulensystems

Das Spulensystem ist für die Anwendung am vorliegenden Nutzfahrzeug ausreichend kompakt dimensioniert und priorisiert einen hohen Wirkungsgrad und hohe Versatztoleranz vor den kleinstmöglichen Abmessungen. Die Versatztoleranz hat sich in den praktischen Tests als vollständig ausreichend für das manuelle Parken der Fahrzeuge erwiesen.

Für zukünftige Anwendungen sollte das System mit einer erweiterten Parkführungsfunktion ausgeführt werden, die beim Parken entweder noch präzisere Fahranweisungen erteilt oder den Parkvorgang über die bestehenden Assistenzsysteme automatisiert.

3) Fahrzeugimplementierung

Die Anbindung des Ladesystems erfolgt beim Prototyp über die CCS-Schnittstelle. Dieses Vorgehen hat zwei wesentliche Vorteile. Für prototypische Aufbauten kann dank der standardisierten und gut dokumentierten Schnittstelle eine einfache Anbindung des Ladesystems an das Fahrzeug vorgenommen werden, ohne dass in die ggf. sicherheitsrelevanten Systeme des Fahrzeugs eingegriffen werden muss, deren Dokumentation erheblich schwieriger zu beziehen ist.

Für Klein- und Großserienfahrzeuge ist es hingegen notwendig das induktive Ladesystem vollständig in die Ladearchitektur des Fahrzeugs und in das BMS einzubinden. Neben den dadurch möglicherweise entstehenden Synergien in der Nutzung von leistungselektronischen Baugruppen verkleinert sich damit auch der Installationsaufwand und die Anzahl der notwendigen Protokollwandlungen.

4) Übertragungsleistung und Effizienz

Die Übertragungsleistung des Systems beträgt 22 kW, im Laborbetrieb sind mit den bestehenden Komponenten auch Leistungen größer 25 kW darstellbar gewesen. Für die im Zielfahrzeug verbaute Batterie ergibt sich damit eine Ladezeit in der Größenordnung einer Stunde. Im vorliegenden Anwendungsfall hat sich diese Ladezeit als ausreichend kurz erwiesen. Weiterhin waren die Ladezeiten im Anwendungsfall häufig kürzer, wenn durch den Fahrzyklus die Gesamtreichweite des Fahrzeugs während eines Tages nur anteilig ausgenutzt wurde und während der regelmäßigen Stopps im Depot daher nur kleine Energiemengen aufgenommen werden mussten, um einen permanent hohen Ladestand der Traktionsbatterie zu erreichen.

Für abweichende Nutzungsszenarien mit höherem Energieverbrauch und Traktionsbatterien mit zunehmend größerer Kapazität sollte die Ladeleistung weiter erhöht werden. Der Standardisierungsprozess, der sich während der Laufzeit dieses Projekts auf die Klasse WPT4 (22 kW) konzentriert hat, sollte anschließend auf höhere Leistungen ausgedehnt werden, um auch bei größeren Ladeleistungen auf standardkonforme Lösungen setzen zu können, die interoperabel funktionieren und in ihrer Leistungsklasse konkurrenzfähig zu induktiven Ladesystemen sind.

Der Wirkungsgrad des induktiven Ladesystems inklusive Netzanbindung liegt im praktischen Betrieb bei Nennleistung im Bereich von 91 %. Dies gilt auch bei Versatz der Ladespulen, der beim manuellen Parken auftreten kann. Folglich ist der Wirkungsgrad der induktiven Ladetechnologie vergleichbar zum induktiven Laden. Deshalb sollte die Effizienz kein Ausschlusskriterium für die induktive Ladetechnik sein.

5) Netz- und Systemintegration

Die Systemintegration von induktiven Ladesystemen in ein zentrales Lademanagementsystem ist wie beim induktiven Laden von zentraler Bedeutung. Besonders für einen zukünftigen Einsatz im öffentlichen Raum ist sie im Hinblick auf Themen wie Abrechnung und Authentifizierung wichtig. Für die Umsetzung zentraler Energiemanagementkonzepte ist sie ebenfalls relevant.

In vorbelasteten Netzgebieten mit bereits reduzierter Netzspannung ist die Anwendung von netzorientierten Ladekonzepten zweckmäßig. Mit ihnen kann ein Beitrag zur Netzstützung geleistet werden und Netzausbau vermindert werden. Blindleistungsbereitstellung in Abhängigkeit der Netzspannung bietet einen effektiven Ansatz zur statischen Spannungshaltung beim Laden von Elektrofahrzeugen. Ein Vorteil von Ladesystemen mit Netz-Frontend im Ladepunkt, wie es bei induktiven Laden und DC-Laden gegeben ist, besteht darin, dass die Blindleistungsbereitstellung unabhängig vom Elektrofahrzeug ist.

Zusammenfassung

Zusammenfassend wurde mit den Feldtests gezeigt, dass die Technologie des induktiven Ladens im Realbetrieb technisch umsetzbar und funktionsfähig ist [TUB24]. Das induktive Laden wurde sowohl von Projektpartner Fairsenden in Berlin als auch vom Gebäudemanagement der TU Braunschweig erfolgreich in die jeweiligen Betriebsabläufe eingebunden [TUB24]. Dies zeigt die einfache Integrierbarkeit von induktiver Ladetechnik. Die aufgenommenen Ladedaten belegen, dass das induktive Ladesystem alltäglich genutzt wurde, sowohl für Laden nach Betriebsende als auch für Gelegenheitsladen. Von den Nutzern wurde das System in der Anwendung positiv bewertet [TUB24]. Dies verdeutlicht die Nutzerfreundlichkeit der Ladetechnologie. Die hohe Akzeptanz und Zuverlässigkeit der induktiven Ladetechnologie wird auch dadurch belegt, dass das Erprobungsfahrzeug in den Feldtests ausschließlich induktiv geladen wurde, obwohl induktives Laden weiterhin möglich war. Weiterhin hat der bisherige praktische Einsatz gezeigt, dass die Zuverlässigkeit des Systems hoch ist und die notwendigen Wartungsarbeiten an der Technik gering sind [TUB24].

2.5 Fazit und Ausblick

In Bezug auf die Auslegung eines induktiven Ladesystems mit einer Gesamteffizienz > 90 % wurde im Forschungsprojekt LISA4CL erfolgreich eine vollständige Systemauslegung und Implementierung durchgeführt. Der Systemwirkungsgrad für das entwickelte System ist durchgehend hoch und die Versatzeempfindlichkeit im festgelegten Versatzbereich ist gering. Die Anforderungen der DIN EN IEC 61980-3 bezüglich geforderter Wirkungsgrade werden übertroffen. Voraussetzung für diese Eigenschaften war die Optimierung insbesondere des induktiven Übertragungssystems auf die konkreten Anforderungen der Anwendung. Die Komponentenentwicklung und Optimierung bis hin zum voll funktionsfähigen und alltagstauglichen Versuchsfahrzeug wurde durchgeführt. Die Optimierung der Einzelkomponenten führte zur Maximierung des Gesamtwirkungsgrads. Die Aufstellung der Anforderungen des Ladesystems für ein leichtes Nutzfahrzeug im Lieferverkehr zeigt, dass die Berücksichtigung fahrzeugspezifischer Randbedingungen bei der Auslegung notwendig ist. Leichte Nutzfahrzeuge bieten ausreichend Bauraum für wirkungsgrad- und versatzoptimierte Systeme. Im nutzbaren Laderaum des Fahrzeugs ist ein möglichst geringer Platzbedarf des Systems erstrebenswert.

Die an zwei Einsatzorten durchgeführten induktiven Feldtests belegen anschaulich die Praxistauglichkeit von induktiven Ladesystemen. Eine Erkenntnis aus den praktischen Tests ist die große Zuverlässigkeit der induktiven Ladetechnologie und die hohe Akzeptanz bei den Nutzerinnen und Nutzern. Dies verdeutlicht, dass induktive Ladesysteme ein anwenderfreundliches Laden ermöglichen. Zusätzlich ist eine einfache Integration des induktiven Ladens in Betriebsabläufe möglich. Weiterhin ist der Wirkungsgrad des induktiven Ladens im praktischen Betrieb vergleichbar zu dem beim konduktiven Laden. Die Vorteile von induktivem Laden gegenüber dem konduktiven Laden sind entscheidend für eine Etablierung der Technologie in verschiedenen Anwendungsbereichen. Es ist jedoch hervorzuheben, dass induktives Laden nicht in einem Verdrängungswettbewerb mit konduktiven Schnellladesystemen steht. Die induktive Ladetechnologie kann durch verringerten Bedienungsaufwand als Komfortfunktion oder zur Vereinfachung von Betriebsabläufen z. B. bei Lieferfahrzeugen, Taxibetrieben und Shuttlediensten dienen. Sie bietet zusätzlich eine erhöhte Sicherheit durch den Verzicht auf sichtbare Kabel, die in Betriebsabläufen Stolperfallen darstellen und störend wirken können. Zudem bietet die induktive Ladetechnik eine optisch unauffällige Lösung für das Stadtbild. Darüber hinaus ist sie eine Schlüsseltechnologie für autonome Fahrzeuge im Fahr- und Parkbetrieb.

Im Hinblick auf intelligente Ladekonzepte wurden im Projekt verschiedene erzeugungs- und netzorientierte Methoden für das Laden von Elektrofahrzeugen entwickelt und untersucht. Die Methoden zur Integration erneuerbarer Energien beim Laden beinhalten preisbasierte Ansätze, variable Stromtarife und CO₂-basiertes Laden. Es wurde erfolgreich gezeigt, dass eine ökonomische und ökologische Optimierung des Betriebs einer Elektrofahrzeugflotte durch erzeugungsorientierte Ladekonzepte möglich ist. Bei den netzorientierten Methoden zeigt sich, dass eine Wirkleistungsreduzierung in Abhängigkeit der Spannung und eine

Blindleistungsbereitstellung einen netzstützenden Beitrag zur statischen Spannungshaltung ermöglichen. Phasengenaue Regelungsansätze bieten Potenzial zur Reduzierung von Spannungsunsymmetrie. Eine phasengenaue Wirkleistungsreduzierung in Abhängigkeit der Spannung und eine Blindleistungsbereitstellung in Abhängigkeit der Phasenverschiebung der Spannungen können Beiträge zur Spannungssymmetrierung liefern. Die netzorientierten Ladekonzepte sind abhängig von der Topologie der Ladegeräte aus technischer Sicht praktisch umsetzbar. Außerdem ist die Systemintegration eines induktiven Ladesystems praktisch umsetzbar. Die induktiven Feldtests zeigen, dass eine Einbindung in ein zentrales Lademanagementsystem möglich ist. Bei der Systemintegration ist die Berücksichtigung der vorherrschenden Standards für Ladekommunikation wie ISO 15118, IEC 61980-2 und OCPP unabdingbar.

Die gleichzeitige Betrachtung der Systementwicklung für ein induktives Ladesystem zusammen mit Fragestellungen zu intelligenten Ladekonzepten und der Netzintegration von Ladeinfrastruktur haben mit den Feldtests eine umfassende Darstellung zur Nutzbarkeit von induktiven Ladesystemen ermöglicht.

Weiterer Forschungsbedarf besteht in der Untersuchung des induktiven Ladens in Kombination mit autonomem Fahren und Parken in verschiedenen Anwendungsbereichen. Zusätzlich ist die Integration induktiver Ladesysteme in bestehende Fahrzeugsysteme ein zentraler Aspekt. Die Integration der Ladetechnik in den On-Board-Charger ist hierbei ein Untersuchungspunkt. Zudem kann die Nutzung gemeinsamer Sensorik für autonomes Fahren und Fahrzeugpositionierung betrachtet werden. Die Entwicklung bidirektionaler induktiver Ladesysteme verbunden mit wirkungsgradorientierter Komponentenoptimierung bietet ebenfalls Potenzial für zukünftige Untersuchungen. Das bidirektionale Laden im Kontext netz- und erzeugungsorientierter Ansätze spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

2.6 Wichtige Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

TU Braunschweig, elenia

Zur erfolgreichen Bearbeitung des Projektes sind am elenia Personalausgaben für 2,5 wissenschaftliche Mitarbeiterstellen sowie die Beschäftigung von studentischen Hilfskräften angefallen. Die durchgeführten Arbeiten umfassen folgende Punkte:

- Die Projektkoordination (Planen und Durchführen von Projektterminen, Öffentlichkeitsarbeit sowie organisatorische Aspekte wie die Erstellung des Projektlogos und die Forderung des Erprobungsfahrzeugs)
- Gemeinsame Entwicklung der Kommunikations- und Steuerinfrastruktur des induktiven Ladesystems (Fahrzeug- und Infrastrukturseite) mit den Projektpartnern, inklusive Hardware- und Softwareumsetzung
- Gemeinsame Erprobung der Kommunikations- und Steuerinfrastruktur (Einzelkomponenten- und Gesamtsystemtests) mit den Projektpartnern, inklusive Tests der Sicherheitsfunktionen und des Systemverhaltens bei Fehlern
- Das Planen, Vorbereiten, Durchführen und anschließende Auswerten der Feldversuche (konduktiv und induktiv)
- Entwicklung von Konzepten für erzeugungs- und netzorientiertes Laden von Elektrofahrzeugen
- Das Planen, Vorbereiten, Durchführen und anschließende Auswerten der Netzsimulationen zum Test der Ladekonzepte
- Das Planen, Vorbereiten, Durchführen und anschließende Auswerten der Laborversuche zur praktischen Erprobung der Ladekonzepte
- Ableiten von Handlungsempfehlungen aus dem induktiven Feldtest
- Erstellung und Präsentation wissenschaftlicher Veröffentlichungen

Ein Teil der Sachmittel wurde für die Umsetzung der Kommunikations- und Steuerinfrastruktur des induktiven Ladesystems verwendet. Dies beinhaltet unter anderem Hardware für die Protokollkonverter und für die Schnittstelle zur CCS-Kommunikation sowie Komponenten für die Realisierung der drahtlosen Kommunikation. Zusätzlich wurde als Netz-Frontend für das induktive Ladesystem im Projekt ein Active Front End angeschafft, um unter anderem Blindleistungsbereitstellung zu ermöglichen.

Zur Durchführung der Simulationen der Ladekonzepte sowie für Laboruntersuchungen und für Einsätze im Feldtest wurde ein Rechner angeschafft. Für die Laboruntersuchungen der Ladekonzepte wurde ein aktiver Gleichrichter (Cinergia B2C-20+) angeschafft, der ein Ladegerät für Elektrofahrzeuge darstellt. Mit diesem wurden netzorientierte Ladekonzepte erprobt. Zusätzlich sind Mittel in die Realisierung der erforderlichen Laboraufbauten geflossen. Weiterhin wurden zwei Messgeräte für das Messkonzept der netzorientierten Ladekonzepte erworben. Eins dient der Anwendung in den Laboruntersuchungen und das andere wurde in den infrastrukturseitigen Schaltschrank des induktiven Ladesystems integriert.

Für den induktiven Feldtest wurden zwei AC-Wallboxen, die eine Backendanbindung via OCPP ermöglichen, erworben. Für die netzseitigen Messungen im Rahmen der Feldtests, die der Feldtestauswertung dienen, wurde ein Netzanalysegerät (PQ-Box 200 von A. Eberle) angeschafft.

Die Installation der Wallboxen im induktiven Feldtest in Berlin bei Fairsenden und die Installation des induktiven Ladesystems in Berlin erfolgte über Aufträge an ein externes Elektrotechnik-Dienstleistungsunternehmen. Die Entwicklung des Projektlogos und die Beklebung des Erprobungsfahrzeugs erfolgte ebenfalls über Aufträge an entsprechende Dienstleister.

Die Positionen der Dienstreisen dienten einerseits der Teilnahme an nationalen und internationalen Kongressen für die Veröffentlichung von Projektergebnissen. Zusätzlich wurden sie für die Teilnahme an Konsortialtreffen bei der INTIS GmbH in Lathen genutzt. Zudem wurden sie für das Vorbereiten und Durchführen der Feldtests in Berlin verwendet. Für die Erprobungen des induktiven Ladesystems bei der INTIS GmbH sind mehrere Dienstreisen erforderlich gewesen, die nicht in der Planung berücksichtigt waren. Dies wurde dadurch kompensiert, dass andere Positionen der Dienstreisen wie die Dienstreisen für die Feldtests nicht vollständig ausgeschöpft wurden.

Das Erprobungsfahrzeug musste in der Projektlaufzeit dreimal mit einer Spedition transportiert werden. Dies war in der ursprünglichen Projektplanung nicht berücksichtigt. Die Kosten wurden durch Positionen, die nicht ausgeschöpft waren, gedeckt. Ein Transport war für die Hauptuntersuchung des Fahrzeugs. Der zweite Transport war von Lathen nach Braunschweig für die Abnahme des mit dem induktiven Ladesystems umgerüsteten Fahrzeugs durch VW. Der letzte Transport war von Braunschweig nach Berlin für den induktiven Feldtest.

TU Braunschweig, IMAB

Für die Bearbeitung des Projektes wurden am IMAB Personalmittel für zwei Mitarbeiterstellen und die Beschäftigung von studentischen Hilfskräften aufgewendet.

Dabei wurden u. a. folgende Arbeiten in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern getätigt:

- Konzeptionierung des Induktiven Ladesystems
- Betrachtung geeigneter Topologien und Auswahl der vielversprechendsten Lösung
- Durchführung der Auslegung für alle benötigten Komponenten
- Aufbau von Komponenten als Labormuster und Weiterentwicklung zu fahrzeugtauglichen Komponenten
- Ausarbeitung von Sicherheitskonzepten und Testkatalogen zur Überprüfung
- Inbetriebnahme und Test des Gesamtsystems zur Vorbereitung des Feldtests
- Aufbau und Inbetriebnahme des Ladesystems in Berlin und Begleitung des Feldtests
- Kooperation mit den Projektpartnern in den Projektphasen der Entwicklung, Erprobung und Inbetriebnahme

- Koordination der Prozesse bezüglich der Ladesystementwicklung zwischen den Projektpartnern
- Darstellung des Projektes auf Fachtagungen

Die Mittel für Dienstreisen wurden einerseits für die Teilnahme an Fachtagungen aufgewendet, vorrangig jedoch für Konsortial- und Arbeitstreffen beim Projektpartner INTIS GmbH in Lathen. Dabei fielen die notwendigen Dienstreisen nach Lathen umfangreicher aus, als in der anfänglichen Planung vorgesehen. Die hierbei entstandenen Mehrkosten konnten allerdings durch geringer ausgefallene Dienstreisekosten zu anderen Zielen ausgeglichen werden. Ferner wurden mehrere Dienstreisen zum Projektpartner Fairsenden nach Berlin unternommen, um notwendige Randbedingungen vor Ort zu sammeln, die Anlage zu planen, die Errichtung des Induktivladesystems vorzunehmen und schließlich den Rückbau des Systems zu begleiten.

Für die Entwicklung des Systems wurde die zur Vermessung notwendige Messtechnik (Hioki Leistungsmessgerät PW6001 inkl. zugehöriger Stromsensoren) beschafft, die z. B. die Bestimmung des Systemwirkungsgrades ermöglicht. Zur Speisung des Systems wurde zudem eine DC-Quelle (Elektroautomatik EA-PSB 11000-80) beschafft, die eine ausreichend hohe Leistung und die notwendige Spannung für den Betrieb des induktiven Ladesystems zur Verfügung stellen kann. Nach der Inbetriebnahme des Systems, das ab diesem Zeitpunkt über das parallel beschaffte Active Front End versorgt wurde, wurde die Quelle für den Betrieb der Prüfstandaufbauten verwendet.

Die übrigen Mittel für den Aufbau der einzelnen Komponenten wurden für die Materialbeschaffung und für die Realisierung der Komponenten sowohl als Labormuster, als auch für Ausführungen für den Fahrzeugeinbau verwendet.

Die Vergabe eines Unterauftrages zur Unterstützung der normrelevanten Projektteile wurde im Rahmen des Projektes durchgeführt und die Dienste des Auftragnehmers wurde in Anspruch genommen.

INTIS

Für die Bearbeitung des Projektes entstanden bei INTIS projektbezogene Personalkosten im Förderzeitraum auf Basis insgesamt geleisteter Personalstunden in Höhe von 5.146 Stunden. Dies entspricht im Mittel einem Jahresvolumen von 1.300 Personalstunden und somit etwa 0.8 Mitarbeitern pro Jahr im Bewilligungszeitraum (einschließlich zugestimmter Projektlaufzeitverlängerung).

Verwendung von Mitteln für die Facharbeit und für Arbeiten an administrativen Themen:

Die seitens INTS maßgeblich zu bearbeitenden und/ oder zu unterstützenden Arbeiten lagen insbesondere bei (technisch):

- der Konzeptionierung des Induktiven Ladesystems (gesamt), mit Untersuchungen zu geeigneten Topologien und Auswahl der vielversprechendsten Lösung gemeinsam mit den Projektpartnern
- der Auslegung der Übertragungsspulen auf Basis der zwischen den Projektpartnern abgestimmten Kriterien
- der Magnetische Simulation auf Basis der final mit den Projektpartnern abgestimmten Gesamtsystemlösung
- den elektrischen Simulationen auf Basis der final mit den Projektpartnern abgestimmten Gesamtsystemlösung
- der Auslegung und Optimierung der im Projekt einzusetzenden Übertragungsspulen hinsichtlich:
 - o des zu werdenden Wicklungskabelmaterials
 - o der Anordnung der Leiter in den Übertragungsspulen
 - o der Querschnitte, Lagen und Geometrien der Ferrite
 - o der Geometrien für Schirmbleche
 - o der geometrischen Verhältnisse, nebst Abständen zwischen Leitern, Ferriten und Schirmblechen
- dem Bau sämtlicher im Projekt zur Verfügung stehender Übertragungsspulen
- dem Bau aller weiteren Bestandteile des primärseitigen Leistungspfad mit Netzanbindung/ EMV-Filtern, Netzüberspannungsschutz, Leitungsschutz, Schützen, Anbindung an das AFE, den Wechselrichter, den Gyrator, den Ausgangstransformator (sowohl für Laborversuche aber auch den Feldversuch)
- der experimentellen Validierung in einer Laborumgebung auf Basis der final mit den Projektpartnern abgestimmten Gesamtsystemlösung
- der experimentellen Validierung der Stabilität des Regelungsverhaltens in einer Laborumgebung
- detaillierten Abstimmungen mit den Projektpartnern über Struktur und Umfang von Daten, die zwischen primär- (SECC) und sekundärseitigen (EVCC) Komponenten auszutauschen sind und Abgleich mit geltenden Standards (IEC 61980-2 und ISO 15118-20)
- der experimentellen Validierung der Kommunikation zwischen primär- (SECC) und sekundärseitigen (EVCC) Komponenten
- dem Vergleich von Ergebnissen aus Simulationen und experimentellen Validierungen (Labor)
- dem Finden einer geeigneten Lösung für die Befestigung der fahrzeugseitigen Spule am Fahrzeugunterboden und Vorgaben an die Integration von elektronischen Baugruppen ins Fahrzeug
- dem Bau aller Befestigungselemente für die Fahrzeugspule

- dem Bau aller Elemente für die magnetische Schirmung am Fahrzeug
- der Integration der fahrzeugseitigen Spule und der fahrzeugseitigen elektronischen Baugruppen
- der Ausarbeitung von Sicherheitskonzepten und Testkatalogen zur Überprüfung in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit den Projektpartnern
- der Absicherung der Begleitung durch die abnehmende Behörde
- der Begleitung der Abnahme mit dem Ergebnis, dass die Nachrüstung durch die Zulassungsbehörde in den Fahrzeugpapieren eingetragen werden konnte
- der Begleitung der Inaugenscheinnahme/ Abnahme mit finaler Zustimmung seitens VW-Nutzfahrzeuge
- der Begleitung der Installation, Inbetriebnahme und Systemoptimierung am Standort Berlin
- der Begleitung der Installation, Inbetriebnahme und Systemoptimierung am Standort Braunschweig
- der Durchführung von EMV-Messungen am Standort Berlin und am Standort Braunschweig

Die seitens INTS maßgeblich zu bearbeitenden und/ oder zu unterstützenden Arbeiten lagen insbesondere bei (administrativ):

- der regelmäßigen Teilnahme an Projektstandmeetings (administrativ)
- der regelmäßigen Teilnahme an Projektstandmeetings (fachlich)
- der Ausarbeitung von Präsentationen und der Lieferung von Inhalten für Fachvorträge und Veröffentlichungen
- der Lieferung von Beiträgen für Fachvorträge/ -veranstaltungen
- der Vorbereitung und Lieferung von Beiträgen in/ zu Quartals-Berichterstattungsmeetings
- der Vorbereitung und Durchführung von Inaugenscheinnahmen (VW-Nutzfahrzeuge) und Abnahmen durch die zuständige Behörde zur Aufrechterhaltung der Straßenzulassung des Fahrzeugs
- der Lieferung von Input/ die Berichterstattung über standardisierungsrelevante Projektergebnisse in Standardisierungsgremien, insbesondere in das deutsche Spiegelgremium (DKE 353.0.1) von IEC TC 69 WG7 und für „Wartungsarbeiten“ an ISO 19363.

Verwendung von Mitteln für Dienstreisen:

Mittel für Dienstreisen fielen an, um:

- an technischen Meetings beim Projektpartner TU-Braunschweig (IMAB, elenia) teilzunehmen
- an Fachvortragsveranstaltungen und Projektergebnispräsentationen teilzunehmen
- die Installation/ Inbetriebnahme am Standort Berlin sicherzustellen

Verwendung von Mitteln für Beschaffungen:

Für projektspezifische Beschaffungen fielen Mittel im Umfang der Erwartungen aus der Projektantragsphase an. Es wurden keine Beschaffungen durchgeführt, die nicht projektspezifisch waren.

2.7 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Aufgrund des Klima- und Ressourcenschutzes besteht von Seiten der Bundesregierung die Forderung nach umfangreicher Elektrifizierung von Straßenfahrzeugen, wobei die Versorgung dieser Fahrzeuge zum heutigen Zeitpunkt eine noch nicht vollständig gelöste Aufgabe und daher von hohem öffentlichem Interesse ist. Das induktive Laden kann verglichen zum konduktiven Laden in bestimmten Anwendungsfällen die Vorteile von batterieelektrischen Fahrzeugen erhöhen und somit zu einer höheren Durchdringung der Mobilität mit Elektrofahrzeugen beitragen. Auch im Hinblick des autonomen Fahrens ist es wichtig frühzeitig eine technische Reife des induktiven Ladens zu erreichen, um eine breite Marktdurchdringung zu ermöglichen. Vor dem Hintergrund, dass ökonomische und ökologische Aspekte beim Betrieb von batterieelektrischen Fahrzeugen eine zentrale Rolle im Hinblick einer starken Erhöhung der Durchdringung von Elektrofahrzeugen einnehmen und zudem eine Aufrechterhaltung der Netzstabilität zu beachten ist, sind intelligente Ladekonzepte, die diese Faktoren berücksichtigen, unabdingbar. Die Notwendigkeit der Förderung ergibt sich folglich auch aus der Forderung nach einer Erhöhung der Durchdringung von Elektrofahrzeugen.

Die zukünftige Transformation der Mobilität hin zu einem elektrifizierten Straßenverkehr und der daraus resultierende Bedarf an geeigneter Ladeinfrastruktur für unterschiedliche Anwendungsfälle stellen vielfältige Herausforderungen dar. Im Projektverlauf zeigte sich, dass insbesondere im Bereich des induktiven Ladens mit hohen Wirkungsgraden größer 90 %, der Normung von induktiven Systemen mit Nennleistungen bis 22 kW, des Ladens von Elektrofahrzeugen im City-Logistik-Bereich und der intelligenten Ladekonzepte im Hinblick eines erzeugungs- und netzorientierten Ladens von Elektrofahrzeugen noch vielfältige Fragestellungen und offene Forschungsfragen existieren. Das Projekt liefert vor diesem Hintergrund einen vollständig entwickelten funktionsfähigen Prototyp für stationäres induktives Laden mit 22 kW, der im praktischen Einsatz im Bereich City-Logistik betrieben wurde und hohe Wirkungsgrade größer 90 % aufweist. Dies erbringt einen wichtigen Beitrag im Hinblick der technischen Umsetzung, Praxistauglichkeit und Zuverlässigkeit des induktiven Ladens. Im Hinblick der intelligenten Ladekonzepte stellt das Projekt vielfältige Werkzeuge und Antworten zur Verfügung, die sowohl durch simulative Untersuchungen als auch durch Labormessungen validiert und technisch erprobt wurden. Dies leistet einen wesentlichen Beitrag zur Netz- und Systemintegration von Elektrofahrzeugen.

Über die technischen Erkenntnisse und Ergebnisse hinaus hatte das Projekt auch eine Öffentlichkeitswirkung und kann damit einen positiven Beitrag für die Elektromobilität in der öffentlichen Wahrnehmung leisten. Besonders hervorzuheben sind hierbei die Feldtests und das Abschlussevent des Projekts. Der innovative Charakter des Ladesystems erhöhte ebenfalls die Sichtbarkeit des Projekts. Durch die Veröffentlichung der Projektergebnisse und die Einbringung technischer Ergebnisse in Normungsgremien für das induktive Laden werden die breite Öffentlichkeit und die Industrie von den gewonnenen Erkenntnissen profitieren können. Die durchgeführten Arbeiten und Entwicklungen werden somit unter Beachtung aller

gewonnenen Erkenntnisse und gemessen an hierfür verwendeten Fördergeldern und finanziellen Eigenbeteiligungen als notwendig und angemessen eingestuft.

2.8 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplanes

TU Braunschweig (elenia und IMAB)

Die erzielten Projektergebnisse finden und fanden Einzug in Normungsgremien, Projektanträgen (auf Basis der geplanten Zusammenarbeit in Folgeprojekten), studentischen Arbeiten, Dissertationen, Veröffentlichungen und in der Weiterentwicklung von Untersuchungen, Messungen und Simulationen im wissenschaftlichen Kontext. Die durch das Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden zukünftig zudem Inhalt von Lehr- und Weiterbildungsveranstaltungen bei den beiden beteiligten Instituten der TU Braunschweig. Das Forschungsprojekt liefert wichtige Erkenntnisse und praktische Erfahrungen zu induktiven Ladesystemen sowie intelligenten Ladekonzepten zum erzeugungs- und netzorientierten Laden von Elektrofahrzeugen. Aus Sicht der beiden Institute sind die positiven Ergebnisse des Projektes LISA4CL in mehreren Bereichen der Forschung verwertbar und können dabei zu einer weiteren Entwicklung der induktiven Ladetechnik und von Ladekonzepten beitragen und eine frühe Auseinandersetzung von angehenden Ingenieurinnen und Ingenieuren mit diesen Fachthemen und Technologien bereits im Studium fördern.

Das aufgebaute Prototypenfahrzeug und die zugehörige Ladestation wurde nach Ende des Feldtests in Berlin nach Braunschweig transportiert und dort auf dem Gelände des Niedersächsischen Forschungszentrums Fahrzeugtechnik (NFF) wieder in Betrieb genommen. Dort wird das Fahrzeug aktuell von der Haustechnik der TU Braunschweig genutzt und absolviert dabei ein Fahrprofil, das dem Einsatz als Paketdienstfahrzeug ähnelt. Dieser Betrieb soll so lange wie möglich aufrechterhalten werden, um Langzeiterfahrungen bezüglich Nutzungsprofil und Verhalten der Technik zu gewinnen. Gleichzeitig steht das Fahrzeug für weitere Versuche und Modifikationen zur Verfügung. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können für die Auslegung neuer Ladesysteme und für die Suche nach neuen Anwendungsgebieten für die kontaktlose Ladetechnologie genutzt werden.

Die parallel zum Versuchsfahrzeug aufgebaute Prüfstandtechnik wird für weitere Untersuchungen und die Weiterentwicklung induktiver Ladesysteme genutzt. Für zukünftige wissenschaftliche Vorhaben können durch die bestehende Prüfstandtechnik Versuchsaufbauten schneller realisiert und genutzt werden. Gleichzeitig erlaubt der Prüfstandsaufbau die Vermessung induktiver Ladesysteme bei reproduzierbaren Parametern, wohingegen Versuche am Fahrzeug höheren Toleranzen in der Positionierung und sich während der Messung verändernder elektrischer Parameter (Batteriespannung) unterliegen.

Das elenia und das IMAB förderten sowohl auf ihren Fachbereichen als auch gemeinsam mit dem Projektpartner INTIS die wissenschaftliche und technische Verwertung der Projektergebnisse auf wissenschaftlich renommierten Plattformen. Im Zuge dessen wurden Veröffentlichungen auf Konferenzen, Fachtagungen und in Fachzeitschriften sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene umgesetzt. Die Veröffentlichungen im Laufe des Projekts sind in Abschnitt 2.11 aufgelistet. Die durchgeführten Veröffentlichungen auf

Konferenzen boten auch eine Plattform für die Darstellung des Projekts LISA4CL. Zudem erfolgte die Darstellung des Projekts öffentlichkeitswirksam im Rahmen einer Abschlussveranstaltung mit Vertretern aus Wirtschaft, Forschung, Politik und Medien.

Darüber hinaus wurden gemeinsam im Projektkonsortium Projektfortschritte im Rahmen von Pressemitteilungen veröffentlicht (Auflistung siehe Abschnitt 2.11) und erarbeitete technische Lösungen auf Messen bzw. Ausstellungen wie der Elektromobilitäts-Konferenz 2023 ausgestellt. Durch den aktuellen Betriebsstandort des induktiven Ladesystems am NFF in Braunschweig kann es auf zukünftigen Veranstaltungen vor Ort ausgestellt und vorgeführt werden. Eine weitere Ausstellungsmöglichkeit sind Führungen direkt am NFF. Zusätzlich werden durch die Weiterführung des induktiven Feldtests am NFF über die Projektlaufzeit hinaus die Sichtbarkeit der Ladetechnologie erhöht und weitere Ergebnisse generiert, auch hinsichtlich eines Langzeitbetriebs eines induktiven Ladesystems, welche von den Instituten elenia und IMAB verarbeitet werden können.

Des Weiteren werden die Projekthinhalte in die Lehre (z. B. im Bereich der Elektromobilität) eingebunden, um Studierende des Ingenieurwesens mit aktuellen Forschungsergebnissen und Informationen zur Ladetechnik auszubilden. Dies beinhaltet einerseits die inhaltliche Erweiterung der Lehrinhalte für diverse Lehrveranstaltungen am elenia und am IMAB mit den Projekterkenntnissen z. B. aus der Entwicklung des induktiven Ladesystems. Zusätzlich finden Erkenntnisse und Laboraufbauten aus dem Projekt Einzug in Lehrpraktika. Beispielsweise wurden Laboraufbauten für die Erprobung der netzorientierten Ladekonzepte aus Abschnitt 2.3.3 bereits in Laborversuche für das *Labor Master Elektromobilität* des Studiengangs Elektromobilität der TU Braunschweig integriert. In diesem Laborpraktikum können die Studierenden mithilfe der DC-Ladenachbildung auch die Vorteile des bidirektionalen Ladens näher untersuchen und mit dem vorgestellten Messkonzept, welches im Projekt eingesetzt wurde, Einblicke über die Herausforderungen der Netzintegration der Elektromobilität gewinnen. Dazu zählen u. a. Spannungsqualitätsprobleme im Netz bzw. am Anschlusspunkt der Ladesäule oder Spannungsbandverletzungen. Zudem wurden die beiden AC-Wallboxen aus dem induktiven Feldtest am Ladepark des elenia integriert. Durch die Möglichkeit der Einbindung des Ladeparks in die Laborumgebungen des elenia können sie in Lehrpraktika eingesetzt und auch für Untersuchungen in zukünftigen Forschungsprojekten genutzt werden. Ebenso bietet der Prüfstand am IMAB die Möglichkeit Versuche mit den Studierenden im Rahmen von Abschlussarbeiten oder Laborversuchen durchzuführen.

Während der Bearbeitungszeit des Projekts sind zudem mehrere Themenbereiche entdeckt worden, die sich im Rahmen von studentischen Abschlussarbeiten untersuchen lassen. Abschlussarbeiten zur Weiterentwicklung der induktiven Technologie oder zur Lösung spezieller Probleme (beispielsweise zur notwendigen Messtechnik) sind während des Projektzeitraumes entweder abgeschlossen worden oder werden aktuell noch bearbeitet. Außerdem werden die im Projekt erstellten Laboraufbauten zum Themenbereich intelligente Ladekonzepte und die dafür erworbenen Laborgeräte für laufende und zukünftig anlaufende Abschlussarbeiten eingesetzt, die weitere wissenschaftliche Ergebnisse in der Netzintegration von Elektrofahrzeugen erzielen. Zusätzlich geben sie den Studierenden die Möglichkeit, tiefere

Einblicke und Kenntnisse in einzelnen Teilbereichen aufzubauen. Ferner hat das Projekt wesentliche Fortschritte für ein Promotionsvorhaben in dem Themengebiet der induktiven Ladetechnik geliefert. Darüber hinaus schloss Herr Dr. Jonas Wussow im Zuge des Projekts LISA4CL seine Dissertation mit dem Titel *Technische Lösungsansätze zur Erhöhung der Aufnahmekapazität von Niederspannungsnetzen für Elektrofahrzeuge* erfolgreich ab. Zusätzlich starten die Projektbearbeiter Gian-Luca Di Modica und Lukas Ebbert ihre Promotionen in dem Themenfeld Netzintegration von Elektrofahrzeugen im Rahmen des Projekts LISA4CL.

Die Projekterkenntnisse und Projektentwicklungen sowie deren wissenschaftlich-technische Verwertung dient auch der Stärkung des Forschungsstandorts Braunschweig und der Region Niedersachsen. Dies betrifft auch Fachzentren wie das Niedersächsische Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) und das Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN), bei denen das elenia und das IMAB Mitglieder sind. Darüber hinaus zeichnet sich das elenia durch große Präsenz in fachspezifischen Gremien aus. Herr Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel ist u. a. bei der Initiative Energiesysteme der Zukunft (ESYS) der acatech, Leopoldina und Akademieunion sowie im Vorstand der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) des VDE und des Energieforschungszentrums Niedersachsen (EFZN) aktiv.

Weiterhin entstand im Rahmen von LISA4CL eine Kooperation des elenia mit der aency GmbH bzw. der EAAZE GmbH. Ein Ergebnis dieser Kooperation ist die Verwendung des EAAZE-Backend innerhalb der Feldtests inklusive der Einbindung des induktiven Ladesystems in das zentrale Lademanagementsystem. Darüber hinaus entwickeln das elenia und die EAAZE GmbH gemeinsam ein Energiemanagementsystem, das zukünftig beispielsweise mit bidirektionalem Laden erweitert werden kann. Im Zuge der Kooperation fließen auch direkt Projektergebnisse in die Industrie.

Bezüglich der Mitarbeit in Fachgremien und zum strategischen Ausbau von Fachzentren bietet die aktuelle Verwendung des Ladesystems am Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF) eine gute Grundlage, um weitere in den Fachzentren organisierte Institute und Partner für gemeinsame Forschungsarbeiten und die Bildung von Projektkonsortien zu animieren, um beispielsweise eine noch umfassendere Betrachtung der Integrationsmöglichkeiten induktiver Ladetechnik in Elektrofahrzeuge zu untersuchen oder auch die Anwendungsgebiete der Technik weiter auszudehnen.

INTIS

Spulentopologie:

Die Arbeiten an der Auslegung und Realisierung eines Spulenübertragungssystem mit bis zu 22 kW Übertragungsleistung (WPT-4 → IEC 61980-1,-3) lieferten INTIS im Rahmen des Projekts LISA4CL sehr wertvolle Informationen. Bekannte Vor- und Nachteile der im Projekt gewählten Spulentopologie (zirkular, kreisrund) konnten bestätigt werden, es gab aber auch Erkenntnisse zu zunächst nicht erwarteten Eigenschaften dieser zirkularen Spulentopologie. Mit diesen Erkenntnissen will INTIS abwägen, ob die in LISA4CL gewählte Spulentopologie

das Potenzial hat (ggfs. bzgl. der Abmessungen der fahrzeug- und der straßenseitigen Spule noch abzuändern bzw. zu optimieren), als zirkulare Referenzspule bei IEC TC 69 WG7 für die Leistungsklasse WPT4 (bis 22 kW) eingebracht zu werden. Im Nachgang zu LISA4CL wird INTIS weiterführende Eigenschaftsvermessungen durchführen, insbesondere zum Vermögen beider Spulen, um der jeweils anderen bzw. gegenüberliegenden Spule einen gewissen magnetischen Fluss im Bereich spezifizierter Spulenversatztoleranzen (X,Y,Z) anbieten zu können. Die erreichbaren bzw. so ermittelten Flusswerte können helfen, diesbezügliche Anforderungen an Produktpulen für diesen Leistungsbereich zu definieren und hiermit Kriterien für den Nachweis von Interoperabilität mit den Spulen anderer Hersteller zu formulieren.

Active Front End (AFE):

Für das Induktivladen wurde im Rahmen von AP 1.1 die Anforderung gestellt ein AFE zum Einsatz zu bringen, dessen Ausgangsspannung, die auch die Zwischenkreisspannung des Wechselrichters ist, innerhalb gewisser Grenzen veränderbar ist, um hiermit einen Einfluss auf die Übertragungsleistung des Induktivladesystems über die Höhe der Zwischenkreisspannung des Wechselrichters ausüben zu können. Die Primäreinheit wurde dementsprechend realisiert und die Eigenschaften des Zusammenwirkens von AFE und Wechselrichter wurden sowohl an der TU Braunschweig als auch in der Laborumgebung bei INTIS experimentell untersucht. Im Zuge dieser Untersuchungen offenbarte sich ein zusätzlicher Verlustbeitrag des AFE zu den Energieverlusten des Gesamtsystems von ca. 3 % bei einer Ladeleistung von ca. 22 kW (siehe auch Abbildung 2-120).

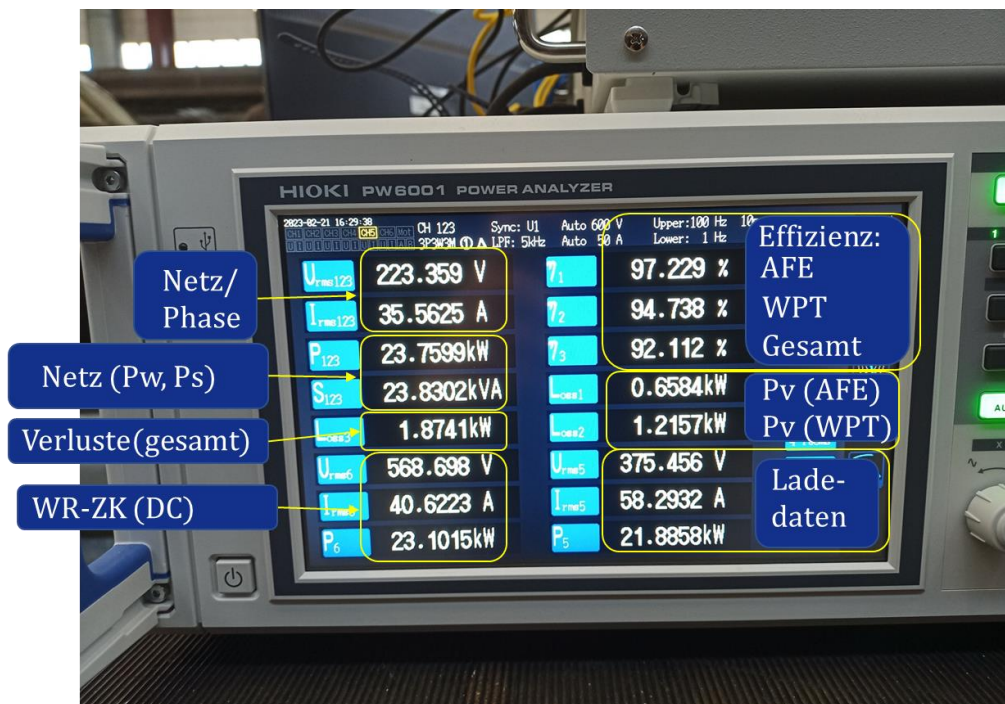


Abbildung 2-120: Beispiel zu Verlustbeiträgen des AFE

Hierbei lag die Ausgangsspannung des AFE und damit die DC-Zwischenkreisspannung des Wechselrichters am unteren Ende des AFE-Spannungsstellbereichsvermögens. Dieser

zusätzliche Verlustbeitrag des AFE soll nicht überbewertet werden, da das verbaute AFE nicht dem modernsten Stand der Technik entspricht. Der neueste Stand der AFE-Technik wird erwartungsgemäß zu einem geringeren Verlustbeitrag führen.

Im Zuge dieser Untersuchungen offenbarte sich aber auch, dass höhere AFE-Ausgangsspannungen bzw. Wechselrichter-Zwischenkreisspannungen (bis zu 750 V) auch zu höheren Schaltverlusten in der Endstufe des Wechselrichters führten. Die Suche nach möglichen Ursachen hierfür gestaltete sich sehr komplex und ist potenziell im Zusammenhang mit dem Schaltverhalten der zum Einsatz gebrachten SiC-Halbleiter der Wechselrichterendstufe und dem gewählten Ansteuerungsmuster der Gates dieser Halbleiter zu finden. Bei der für den Feldeinsatz letztlich realisierten Ausprägung des induktiven Ladesystems fiel die Entscheidung auf eine konstante Wechselrichterzwischenkreisspannung und somit auf den Verzicht der Einflussnahme auf die Leistungsübertragung durch Veränderung der Zwischenkreisspannung. INTIS wird dieses Thema wieder aufgreifen, sobald PFC/ AFE-Hersteller, insbesondere Lieferanten für die Automobilindustrie, mit neuen Produkten am Markt sind, um diese Produkte in zukünftigen Lösungen verbauen und auch experimentell validieren zu können.

Störausstrahlungen (EMC):

Mit der Entscheidung (im Rahmen von AP 1.1), einen symmetrisch anzuordnenden „Gyrator“ in L-C-L-Topologie in den primärseitigen Leistungspfad zu integrieren, konnte gezeigt und experimentell validiert werden, dass eine sehr sinusähnliche Speisespannungsform an den Anschluss terminals der Primärspule realisierbar ist. Dies war schon deshalb zu erwarten, weil der L-C-L-Gyrator eine erhebliche Filterwirkung (Tiefpass) für Oberschwingungen der spulenspeisenden Spannung haben muss. Es zeigte sich aber, dass die bezüglich Störaussendungen (abgestrahlt → EMV) als vorteilhaft vermutete sinusförmige Spulenspeisespannungsform nicht zu einer signifikanten Reduzierung der Störaussendungen führte. Dies bestätigt die von INTIS bereits vor dem LISA4CL-Projekt sehr häufig gewonnene Erkenntnis, dass Spulenzuleiter und die Primärspule selbst nicht maßgebliche Emittenten für höherfrequente Störaussendungen sein müssen. Quellen für Störaussendungen sind häufig WPT-systemfremde Baugruppen, wie Schaltnetzteile oder Mikroprozessoren, die für die Erzeugung von Kleinstspannungen für die Energieversorgung der WPT-Baugruppen oder für Prozessablaufsteuerungen oder Ethernet-Funktionen etc. zu verbauen sind (insbesondere bei Frequenzen oberhalb von 1 MHz). Die in LISA4CL diesbezüglich gewonnenen Erkenntnisse bestärken INTIS dahingehend, dass ein geeigneter Ausgangstransformator zwischen Wechselrichter und Primärspule (insbesondere mit möglichst geringen Kopplungskapazitäten zwischen seiner Primär- und Sekundärwicklung) eine weitaus wirksamere Methode zur Verminderung von Störaussendungen sein kann und zudem ist ein Ausgangstransformator sehr viel einfacher zu realisieren und zu parametrieren als ein resonant abzustimmender symmetrisch zu realisierender L-C-L-Gyrator. Dies gilt insbesondere mit Sicht auf den Bauraumbedarf für einen symmetrisch anzuordnenden Gyrator, mit Sicht auf potenziell zusätzliche Übertragungsverluste und hinsichtlich der Tatsache, dass ein auf eine

Resonanzfrequenz abgestimmter Gyrator zwangsläufig zur Verminderung der Frequenzverstimmungs-Immunität eines WPT-Gesamtsystems führen wird.

Die Entscheidung für den Einsatz eines primärseitigen Gyrtors wurden in AP 1.1 aber auch getroffen, um untersuchen zu können, welchen Einfluss diese zusätzliche Baugruppe auf die Stabilität der Leistungsreglung haben wird, wobei von Anfang an klar war, den Leistungsregler auf der Primärseite zu verorten. Unter Berücksichtigung der Wirkung sonstiger Blindleistungskompensationselemente auf der Primär- und der Sekundärseite wurde mit dem Gyrator ein Spannungsquellenübertragungsverhalten des Leistungspfads realisiert. Dies bedeutet, dass die Ausgangsspannung des Wechselrichters näherungsweise proportional zur Ausgangsspannung am sekundärseitigen Gleichrichter ist. Dies ist ein für Ladegeräte grundsätzlich ungünstiges Übertragungsverhalten (mit Batterie als Senke), da kleine Spannungsänderungen zu großen Änderungen des Ladestroms der Batterie führen können (kleiner differentieller Batteriewiderstand). Diese Konstellation stellte erwartungsgemäß höhere Anforderungen an die Dynamik des Leistungsreglers, als es bei einem alternativ realisierbaren Stromquellenübertragungsverhalten in dem Auslegungsfall ohne Integration eines Gyrtors der Fall wäre.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen zeigten, dass der implementierte primärseitige Leistungsregler eine ausreichende Dynamik und eine ausreichende Reglungstabilität lieferte. Mit Sicht auf das Verwertungsinteresse der Ergebnisse aus LISA4CL wird INTIS hierüber in der Fachwelt berichten und vorschlagen, bei ISO (15118) einen zusätzlichen Parameter aufzunehmen, der – zur Absicherung von Interoperabilität - anzeigt, ob es sich bei einem Teilsystem (primär- oder sekundärseitig) um ein Teilsystem mit Spannungsquellen-Übertragungscharakteristik oder um ein Teilsystem mit Stromquellen-Übertragungscharakteristik handelt.

Weitere Zusammenarbeit der Projektpartner mit dem Ziel der Verwertung von Ergebnissen aus dem Projekt

INTIS:

Die Projektmitarbeiter der TU Braunschweig haben ihre Beiträge auf hohem wissenschaftlich-technischen Niveau, mit Kenntnis des aktuellen Stands der Technik und mit großen Erfahrungen im Bereich der Realisierung von Hard- und Software geliefert. Gegenseitiger Respekt, Verantwortungsbewusstsein und die Bereitschaft zu gegenseitiger Unterstützung prägten das Arbeitsklima. Das Projekt wurde vom Verantwortlichen der TU Braunschweig Herrn Di Modica souverän geführt. Es fanden bereits Gespräche über mögliche Folgeprojekte statt, sowohl zu Forschungsthemen aber auch im Zusammenhang mit INTIS-Kundenprojekten, sowohl zum induktiven Laden aber auch in anderen Bereichen wie beispielsweise im Projekt Sunlider.

Die Verwertungsmöglichkeiten für Projektergebnisse in Bezug auf die induktive Ladetechnik sind sehr vielfältig. Die Übertragungsspulen sind ggf. noch zu optimieren, um sie dann den Normungsgremien bei IEC, ISO, SAE als Referenzspulen für die Leistungsklasse bis 22 kW

(WPT4, IEC 61980-3 & -4) vorzuschlagen. Erkenntnisse aus dem Projekt zum Aufbau und der Optimierung von Gyrotoren sowie ihre Wirkung auf das Störaussendungsverhalten (EMV) sind für kommende Entwicklungen und Auslieferungen sehr wertvoll. Dies gilt auch für Erkenntnisse, die im Zusammenhang mit dem Einsatz des AFE stehen, insbesondere hinsichtlich des Potenzials zur Steigerung der Effizienz induktiver Ladetechnik durch eine Veränderbarkeit der Zwischenkreisspannung für Leistungswechselrichter. Es konnten weitere Erkenntnisse gewonnen werden, die den Automobilherstellern und ihren Zulieferern im Rahmen des INTIS-Beratungs- und Entwicklungsunterstützungsgeschäfts weitergegeben werden können. Gerne möchten wir zukünftig die beiden Institute IMAB und elenia der TU Braunschweig in derartige Aktivitäten einbinden.

TU Braunschweig (elenia und IMAB):

Die Projektmitarbeiter der INTIS GmbH leisteten mit ihrer hohen fachlichen Expertise und ihrem großen Engagement einen wesentlichen Beitrag im Projekt und trugen maßgeblich zum Erfolg von LISA4CL bei. Ohne ihre technischen Arbeiten wäre eine Umsetzung des induktiven Ladesystems in der vorhandenen Form nicht möglich gewesen. Die gegenseitige Unterstützung und das gegenseitige Vertrauen bildeten die Grundlage der sehr guten Zusammenarbeit. Die umfangreichen fachlichen Beiträge von Herrn Dr. Effenberger, sein Einsatz bei der Öffentlichkeitsdarstellung des Projekts sowie seine Unterstützung bei Themen des Projektmanagements sind besonders hervorzuheben.

Das elenia und das IMAB werden die Projekterkenntnisse und -inhalte in die Forschung integrieren. Die Vernetzung der beiden Forschungsinstitute mit industriellen Partnern stellt eine mögliche Grundlage für die Entwicklung neuer Forschungsideen dar. Dies ermöglicht weitere wissenschaftliche Anschlussprojekte in den Bereichen Netzintegration der Elektromobilität, induktive Leistungsübertragung, induktives Laden von Flotten und Ladeoptimierung. Es besteht großes Interesse die INTIS GmbH bei Anschlussprojekten einzubeziehen und die erfolgreiche Zusammenarbeit aus LISA4CL weiterzuführen. Darüber hinaus werden mit solchen Vorhaben dem wissenschaftlichen Nachwuchs weiterhin interessante Themenfelder auf den unterschiedlichen Fachgebieten geboten. Eine aktuelle Projektidee des elenia und des IMAB auf Basis des Projekts LISA4CL, in der auch INTIS eingebunden ist, beinhaltet die Entwicklung eines bidirektionalen induktiven Ladesystems, mit dem erstmalig die Vorteile des autonomen Fahrens in der Umgebung eines autonomen Parkhauses mit einer effizienten und intelligent vernetzten kontaktlosen Ladevorrichtung verknüpft werden.

2.9 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind keine bekannt.

2.10 Danksagung und Erfahrungen aus der Zusammenarbeit

Die TU Braunschweig (elenia, IMAB) und die INTIS GmbH möchten sich herzlich bedanken bei:

- dem BMDV für die Förderung des Projekts
- dem PtJ und der NOW GmbH für die Begleitung und Betreuung des Projekts
- Volkswagen Nutzfahrzeuge für die Bereitstellung des Erprobungsfahrzeugs und die Unterstützung der Projektdurchführung
- der Berliner Agentur für Elektromobilität eMO für die Projektbegleitung und die Unterstützung bei der Öffentlichkeitsarbeit
- der Fairsenden GmbH für die Teilnahme am Feldtest

INTIS

Aus INTIS-Sicht war die Zusammenarbeit mit Instituten der TU Braunschweig (IMAB, elenia), im Rahmen des Projekts LISA4CL, mit dem Ziel des Findens neuer, auf wissenschaftlicher Basis fundierter Lösungen, sehr erfolgreich. Hierzu hat maßgeblich beigetragen:

- Ein konsequent umgesetztes Management des Projekts (Projektleiter: TU Braunschweig/ elenia) mit Durchsetzung von regelmäßigen Projektstandsitzungen (wöchentlich: sowohl zu administrativen als auch zu fachlichen Themen)
- Die außerordentlich hohe Fachkompetenz der beteiligten wissenschaftlichen Mitarbeiter (elenia, IMAB)
- Das Engagement der beiden gegenwärtigen Institutsleiter (elenia, IMAB)
- Die außerordentlich wertvollen Beiträge ehemaliger Mitarbeiter des IMAB
- Die auf Pragmatismus und auf wissenschaftlichen Fokus orientierte Arbeitsweise der Mitarbeiter von INTIS, elenia und IMAB
- Der ständige und offene Austausch mit dem Projektträger des Vorhabens LISA4CL (PtJ)
- Der ständige und offene Austausch mit der NOW GmbH

Sehr gerne und jederzeit wollen wir (INTIS) Projekte in einer LISA4CL-vergleichbaren Projektpartnerkonstellation und unter vergleichbaren Rahmenbedingungen begleiten, bei dem sich auch zukünftig auf ein hohes Maß an wissenschaftlicher Orientierung und Effizienz der Zusammenarbeit zwischen den Beteiligten aus Wissenschaft und Industrie konzentriert wird.

Der Geschäftsführer der INTIS GmbH, Dr. R. Effenberger, bedankt sich insbesondere bei:

- Herrn Professor M. Henke (TU Braunschweig/ IMAB) und Herrn Professor B. Engel (TU Braunschweig/ elenia) für ihre Mitwirkung im Projekt und für ihre Unterstützung im Zusammenhang mit der Verfügbarmachung von hochqualifiziertem wissenschaftlichem Personal der TU Braunschweig und dem Zugang zu ihren Versuchs-/ Laboreinrichtungen

- Herrn Professor a.D. J. Meins und Herrn H. May für ihre unschätzbaren Beiträge zu fachlichen Themen
- Herrn G.-L. Di Modica (TU Braunschweig/ elenia) für das Projektmanagement, für seine Beiträge zur Realisierung einer stabilen Kommunikationsverbindung zwischen Fahrzeug und WPT-Infrastruktur und zu den Inbetriebnahmen
- Herrn T.-H. Dietrich (TU Braunschweig/ IMAB) für seine Beiträge zur Realisierung der fahrzeugseitigen Komponenten und zu den Inbetriebnahmen
- weiteren Mitarbeitern der TU Braunschweig, Herrn H. Schillingmann, Herrn M. Becker, Herrn H. Marks, Herrn L. Ebbert und mir namentlich nicht näher bekannten wissenschaftlichen Mitarbeitern und Studenten der TU Braunschweig/ elenia/ IMAB
- meinen Mitarbeitern Herrn G. Snieders und Herrn J. Schulte für Ihre Beiträge zu Simulationsmodellen, zu den experimentellen Validierungen, zum Aufbau aller Bestandteile des induktiven Ladesystems (für Labormuster und für die Feldanwendungen) und zu den Inbetriebnahmen
- meinen Mitarbeitern Herrn R. Jansen und Herrn A. Schlüter für die Ausarbeitung der Kommunikations- und Prozessteuerung und für ihre Unterstützung bei den Inbetriebnahmen
- allen Mitarbeitern der INTIS' mechanischen und elektrischen Werkstätten, für ihre Beiträge zur mechanischen und elektrischen Integration und zu den Inbetriebnahmen, insbesondere Herrn U. Einhaus, Herrn W. v. Hebel, Herrn F. Obst, und Herrn W. Brameyer
- unserer INTIS-Projektadministratorin Frau L. Stahlhut mit ihrem Engagement, einmal mehr zu erfolgreicher Projektarbeit beigetragen zu haben

TU Braunschweig (elenia, IMAB)

Für das elenia und das IMAB war das Forschungsprojekt LISA4CL mit den erreichten Ergebnissen und gewonnenen Erkenntnissen ebenfalls sehr erfolgreich. Die sehr gute Zusammenarbeit mit der INTIS GmbH spielte dabei eine entscheidende Rolle. Im Folgenden sind wesentliche Punkte, die für den erfolgreichen Abschluss des Projekts von zentraler Bedeutung waren, aufgelistet.

- Die sehr große fachliche Expertise und das hohe Maß an praktischem Wissen aller Beteiligten der INTIS GmbH
- Der große Einsatz der INTIS GmbH bei der technischen Realisierung des entwickelten Ladesystems
- Das allseitig hohe Engagement der Mitarbeitenden für das Projekt
- Die durchgehend gute Kommunikation und die enge Zusammenarbeit der Mitarbeitenden
- Die sehr engagierte Begleitung des Projekts durch die NOW GmbH
- Der offene Austausch mit dem Projektträger Jülich

In möglichen Folgeprojekten ist auf Basis der Erfahrungen aus LISA4CL eine weitere Zusammenarbeit mit der INTIS GmbH sehr wünschenswert.

Das elenia und das IMAB bedanken sich bei:

- der INTIS GmbH und ihren Mitarbeitern für die warmherzige und freundliche Aufnahme während Projektmeetings und Erprobungen des Ladesystems am Standort in Lathen
- Herrn Dr. R. Effenberger (INTIS) für seinen umfangreichen fachlichen Input und sein sehr hohes Engagement
- Herrn R. Jansen (INTIS) und Herrn A. Schlüter (INTIS) für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Entwicklung und Erprobung der Kommunikations- und Prozesssteuerung
- Herrn G. Snieders (INTIS) und Herrn J. Schulte (INTIS) für die sehr gute Zusammenarbeit bei der Entwicklung des induktiven Ladesystems und ihre Beiträge bei dem Aufbau, der Erprobung und der Inbetriebnahme des induktiven Ladesystems
- den weiteren Mitarbeitern der INTIS GmbH, Herrn U. Einhaus, Herrn M. Hoppe, Frau L. Stahlhut
- Herrn Professor a.D. J. Meins und Herrn H. May für die wertvolle Beratung, ihr großes Engagement und ihren Einsatz im Bereich der Normung und Standardisierung
- den Mitarbeitenden der Werkstätten der beiden Institute für die Unterstützung bei der Realisierung des Ladesystems
- den Studierenden, die mit ihren Abschlussarbeiten und ihren Tätigkeiten als wissenschaftliche Hilfskräfte einen Beitrag im Projekt geleistet haben

2.11 Projektveröffentlichungen

- Di Modica, G., Choi, W., Dietrich, T., Ebbert, L., Effenberger, R., Meins, J., Schillingmann, H., Wussow, J., Engel, B., Henke, M.: LISA4CL – Development and Grid Integration of an Inductive Charging System for City Logistics, NEIS 2021 - Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems, Hamburg digital, 13.-14. September 2021, S. 180-185. ISBN 978-3-8007-5651-3
- Pressemitteilung zum Projektstart: https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/elektromobilitaet-induktives-laden-statt-kabelgewirr-2/?mtm_campaign=week
- Lukas Ebbert, Gian-Luca Di Modica, Jonas Wussow und Bernd Engel: Comparing different price models and their impact on the charging times of battery electric vehicles, 6th E-Mobility Power System Integration Symposium, Den Haag, Niederland, 10. Oktober 2022.
- Tim-Hendrik Dietrich: Entwicklung eines normkompatiblen, schnellladefähigen, induktiven Ladesystems für den Flotteneinsatz, Tagung Hybrid and Electric Vehicles – HEV, Gifhorn, 19.-20. Oktober 2022.
- Pressemitteilung zum induktiven Feldtest: <https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/elektromobilitaet-logistikflotte-unter-strom/>
- Das Projekt wurde auf der Elektromobilitäts-Konferenz 2023 des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr (BMDV) in Hamburg im Rahmen eines Vortrags und der Ausstellung des Spulensystems auf der Tagung einem breiten Publikum präsentiert. Zusätzlich wurde das Spulensystem auf der Ladeinfrastruktur-Konferenz 2023 des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr in Berlin ausgestellt.
- Artikel zum induktiven Laden bei der Electrosuisse, Verband für Elektro-, Energie- und Informationstechnik (<https://www.bulletin.ch/de/news-detail/drahtlos-laden-in-der-mobilitaet.html>)
- Di-Modica, G., Ebbert, L., Kösjan, H., Müller, N., Engel, B.: Phase-Precise Control of Electric Vehicles to Reduce Voltage Unbalance in Low-Voltage Grids, ETG-Fb. 170: ETG Kongress 2023, ETG-Kongress 2023 - Die Energiewende beschleunigen, Kassel, Frankfurt: VDE-Verlag, 25.-26. Mai 2023, S. 121-128. ISBN 978-3-8007-6108-1
- Ebbert, L., Di-Modica, G., Engel, B.: Field test of a battery electric logistics fleet: results from a field test and comparison of different charging strategies, 7th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2023), Copenhagen, Denmark, 25. September 2023, S. 9-15. DOI: 10.1049/icp.2023.2679
- G.-L. Di Modica und B. Engel: „Phasengenaues Laden von Elektrofahrzeugen“, de – das elektrohandwerk, Bd. 2023, Nr. 22, Nov. 2023.
- Di Modica, G.-L.; Ebbert, Lukas; Engel, Bernd: Investigation of Control Methods for Electric Vehicle Charging to Reduce Voltage Unbalance, 18. Internationaler MTZ-Fachkongress Zukunftsantriebe, Chemnitz, 14.- 15. Mai 2024
- Pressemitteilung zum induktiven Feldtest: <https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/elektromobilitaet-kabelloses-laden-komfortabel-und-automatisierbar/>

- Dietrich, T., Marks, H., Di Modica, G., Ebbert, L., Henke, M., Engel, B.: Design and implementation of an inductive charging system for electric vehicles in inner-city delivery services, Internationale Tagung EEHE 2024, Bamberg, 15.-16. Mai 2024
- Pressemitteilung zum Abschlussevent: <https://magazin.tu-braunschweig.de/post/elektromobilitaet-kabelloses-laden-im-alltag/>

Literaturverzeichnis

- [AGO23] Agora Energiewende (2023): Strompreiszonen für Deutschland: Vorbild Skandinavien? Online verfügbar unter <https://www.agora-energiewende.de/aktuelles/strompreiszonen-fuer-deutschland-vorbild-skandinavien>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [AME11] Ametek - Programmable Power (2011): MX Series - MX 45. Online verfügbar unter <https://www.programmablepower.com/products/ac-power-sources/mx-series>, zuletzt geprüft am 20.08.2024.
- [AWA24] aWATTar GmbH (2024): HOURLY - mehr Wind und Sonne, mehr sparen! Online verfügbar unter <https://www.awattar.at/tariffs/hourly>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [BDE24] BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2024): BDEW-Strompreisanalyse Juli 2024. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [BIE21] Biedermann, Cornelius; Di Modica, G.-L.; Engel, Bernd (2021): Measurement of the Voltage Quality and Load Profiles of Electric Vehicles. In: IET (Hg.): CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. CIRED 2021 - The 26th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution. Online Conference, 2021-09-20/2021-09-23 (2021), S. 891–895.
- [BUN15] Bunk, Marcus (2015): Nachhaltige Netzplanung in der Niederspannungsebene unter Berücksichtigung hochaufgelöster Zeitreihen. Dissertation. Technische Universität Braunschweig.
- [CAL16] Caltest Instruments Ltd (2016): BE Battery Emulator. Online verfügbar unter <https://www.caltest.co.uk/shop/be-battery-emulator/>, zuletzt geprüft am 21.08.2024.
- [CIN22] Cinergia Power Solutions (2022): Cinergia EL15. Online verfügbar unter <https://cinerגיapower.com/de/produkte/el-ac>, zuletzt geprüft am 21.08.2024.
- [CIN24] Cinergia Power Solutions (2024): Cinergia B2C. Online verfügbar unter <https://cinerגיapower.com/de/produkte/bidirectional-dc-converter>, zuletzt geprüft am 21.08.2024.
- [COM23] CompuLab (2023): IOT-GATE-RPI4 Reference Guide.
- [DIM21] Di Modica, G.-L.; Choi, Wai-Yee; Dietrich, Tim-Hendrik; Ebbert, Lukas; Effenberger, Ralf; Meins, Jürgen et al. (2021): LISA4CL – Development and Grid Integration of an Inductive Charging System for City Logistics. In: VDE (Hg.): NEIS 2021;

Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems. NEIS 2021; Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems. Hamburg, Deutschland, 2021-09-13/2021-09-14, S. 1–6.

- [DIM23] Di Modica, G.-L.; Ebbert, Lukas; Kösjan, Hendrik; Müller, Nils Alexander; Engel, Bernd (2023): Phase-Precise Control of Electric Vehicles to Reduce Voltage Unbalance in Low-Voltage Grids. In: VDE (Hg.): ETG Kongress 2023. ETG Kongress 2023. Kassel, Deutschland, 2023-05-25/2023-05-26, S. 1–8.
- [DIM24] Di Modica, G.-L.; Ebbert, Lukas; Engel, Bernd (2024): Investigation of Control Methods for Electric Vehicle Charging to Reduce Voltage Unbalance. In: Springer Vieweg (Hg.): 18. Internationaler MTZ-Fachkongress Zukunftsantriebe. Antriebe und Energiesysteme von morgen 2024. 18. Internationaler MTZ-Fachkongress Zukunftsantriebe – Antriebe und Energiesysteme von morgen 2024. Chemnitz, Deutschland, 2024-05-14/2024-05-15. Wiesbaden.
- [DIN16] DIN EN ISO 15118-2, August 2016: Straßenfahrzeuge – Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation – Teil 2: Anforderungen an das Netzwerk- und Anwendungsprotokoll.
- [DIN19] DIN EN IEC 61851-1, Dezember 2019: Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen – Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 1: Allgemeine Anforderungen.
- [DIN21] DIN EN ISO 15118-8, Februar 2021: Straßenfahrzeuge – Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation – Teil 8: Anforderungen an Bitübertragungs- und Sicherungsschicht für die drahtlose Kommunikation.
- [DIN22a] E DIN EN IEC 61980-2, Mai 2022: Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge – Teil 2: Besondere Anforderungen für die Kommunikation zwischen Elektrostraßenfahrzeug (EV) und Infrastruktur.
- [DIN22b] DIN EN ISO 15118-20, Dezember 2022: Straßenfahrzeuge – Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation – Teil 20: Anforderungen der 2. Generation an das Netzwerk- und Anwendungsprotokoll.
- [DIN22c] DIN EN IEC 61980-3, Dezember 2022: Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge – Teil 3: Spezifische Anforderungen für die kontaktlosen Energieübertragungssysteme mit Magnetfeld.
- [EBB22] Ebbert, L.; Di Modica, G.-L.; Wussow, J.; Engel, B. (2022): Comparing different price models and their impact on the charging times of battery electric vehicles. In: 6th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2022). 6th E-Mobility Power System Integration Symposium (EMOB 2022). Hybrid Conference, The Hague, Netherlands, 10 October 2022. Stevenage, Hertfordshire, UK: IET, S. 107–113.

- [ENE24] energis GmbH (2024): Blockheizkraftwerk – das sind die Vor- und Nachteile. Online verfügbar unter https://energis.de/ratgeber/heizung/blockheizkraftwerk_vor_und_nachteile, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [ENT24] ENTSO-E (2024): Data View. Online verfügbar unter [https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/r2/dayAheadPrices/show?name=&defaultValue=false&viewType=GRAPH&areaType=BZN&atch=false&dateTime.dateTime=27.09.2024+00:00|CET|DAY&bittingZone.values=CTY|10YSE-1-----K!BZN|10Y1001A1001A47J&resolution.values=PT15M&resolution.values=PT30M&resolution.values=PT60M&dateTime.timezone=CET_CEST&dateTime.timezone_input=CET+\(UTC+1\)+/+CEST+\(UTC+2\)](https://transparency.entsoe.eu/transmission-domain/r2/dayAheadPrices/show?name=&defaultValue=false&viewType=GRAPH&areaType=BZN&atch=false&dateTime.dateTime=27.09.2024+00:00|CET|DAY&bittingZone.values=CTY|10YSE-1-----K!BZN|10Y1001A1001A47J&resolution.values=PT15M&resolution.values=PT30M&resolution.values=PT60M&dateTime.timezone=CET_CEST&dateTime.timezone_input=CET+(UTC+1)+/+CEST+(UTC+2)), zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [EUR21] European Commission. Joint Research Centre. (2021): Vehicle-to-grid and/or vehicle-to-home round-trip efficiency: a practical case study: Publications Office.
- [EVT24] EVTEC AG (2024): coffee&charge 3in1. Online verfügbar unter chrome-extension://oemmndcbldboiebfnladdacbfmadadm/https://www.evtec.ch/application/files/3015/9845/3343/EVTEC_AG_-_factsheet_coffeecharge_3in1_de.pdf, zuletzt geprüft am 02.09.2024.
- [FIG22] Figgener, Jan; Hecht, Christopher; Haberschusz, David; Bors, Jakob; Spreuer, Kai Gerd; Kairies, Kai-Philipp et al. (2022): The development of battery storage systems in Germany: A market review (status 2023). Online verfügbar unter https://www.researchgate.net/profile/Jan-Figgener/publication/369479477_The_development_of_battery_storage_systems_in_Germany_A_market_review_status_2023/links/641d47ec66f8522c38ccfd6d/The-development-of-battery-storage-systems-in-Germany-A-market-review-status-2023.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [GAS22] GASAG AG (2022-07-04T09:30Z[UTC]): Wie viele CO2-Emissionen verursachen erneuerbare Energien? In: GASAG AG, 2022-07-04T09:30Z[UTC]. Online verfügbar unter <https://www.gasag.de/magazin/nachhaltigkeit/co2-emissionen-erneuerbaren-energien/>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [GOS22] Gossen Metrawatt GmbH (2022): LINAX PQ5000. Online verfügbar unter <https://www.gossenmetrawatt.de/produkte/LINAX-PQ5000>, zuletzt geprüft am 21.08.2024.
- [INT20] in-tech smart charging GmbH (2020): EVAcharge SE Datasheet. April 2020.
- [IRE24] International Renewable Energy Agency (IRENA) (2024): Renewable power generation costs in 2023. Online verfügbar unter https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Sep/IRENA_Renewable_power_generation_costs_in_2023.pdf, zuletzt geprüft am 27.09.2024.

- [KOG23] Koglin Oliver (Z-TXX-K) ext (2023): NNE-B-2023. Online verfügbar unter <https://www.stromnetz.berlin/files/globalassets/dokumente/entgelte/zugang/entgelt-e-01.01.2023/NNE-B-2023.pdf>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [LIN16] Lindner, Marco; Aigner, Christian; Witzmann, Rolf; Wirtz, Frank; Berber, Ibrahim; Gödde, Markus; Frings, Robert (2016): Aktuelle Musternetze zur Untersuchung von Spannungsproblemen in der Niederspannung.
- [LÜB07] Lübbert, Daniel (2007): Co2-Bilanzen verschiedener Energieträger im Vergleich. Yumpu.com. Online verfügbar unter <https://www.yumpu.com/de/document/read/2221200/co2-bilanzen-verschiedener-energietraeger-im-vergleich>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [MÜH21] Mühle, Clara (2021): Amazon-Mitarbeiter packt über übles Punkte-System aus: „Frustrierend“. In: *DerWesten.de*, 12.04.2021. Online verfügbar unter <https://www.derwesten.de/panorama/vermishtes/amazon-mitarbeiter-fahrer-touren-ueberwachung-app-fahrten-dienstleister-bewertung-id232012499.html>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [NOB18] Nobis, Claudia; Kuhnimhof, Tobias (2018): Mobilität in Deutschland – MiD Ergebnisbericht. infas Institut für angewandte Sozialwissenschaft GmbH; DLR Institut für Verkehrsforschung; IVT Research GmbH; infas 360 GmbH. Bonn, Berlin.
- [NOV23] Novotný, Radomír (2023): Drahtlos Laden in der Mobilität. In: *Bulletin Electrosuisse* (3/2023), S. 6–13. Online verfügbar unter <https://www.bulletin.ch/de/news-detail/drahtlos-laden-in-der-mobilitaet.html>.
- [QUA22] Quaschnig, Volker (2022): Spezifische Kohlendioxidemissionen verschiedener Brennstoffe. Online verfügbar unter <https://www.volker-quaschnig.de/datserv/CO2-spez/index.php>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [QUA23] Quaschnig, Volker (2023): Regenerative Energiesysteme. Technologie - Berechnung - Klimaschutz. 12., aktualisierte Auflage. München: Hanser.
- [RAM24] Ramakrishnan, Venkatesan; A, Dominic Savio; C, Balaji; Rajamanickam, Narayanamoorthi; Kotb, Hossam; Elrashidi, Ali; Nureldeen, Waleed (2024): A Comprehensive Review on Efficiency Enhancement of Wireless Charging System for the Electric Vehicles Applications. In: *IEEE Access* 12, S. 46967–46994. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3378303.
- [RAU12] Rausch, Lothar; Fritsche, Uwe R. (2012): Aktualisierung von Ökobilanzdaten für Erneuerbare Energien im Bereich Treibhausgase und Luftschadstoffe.
- [RUD22] Rudschies, Wolfgang (2022): Elektroauto und Ladeverluste: So können Sie Kosten vermeiden. In: *ADAC*, 13.09.2022. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/laden/ladeverluste-elektroauto-studie/>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.

- [SCH17] Schwab, Adolf Josef (2017): Elektroenergiesysteme. Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie. 5. Auflage 2017. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- [SIE20a] Siemens AG (2020): Gerätehandbuch SINAMICS S120 Leistungsteile Booksize. Juni 2020. Erlangen, Deutschland.
- [SIE20b] Siemens AG (2020): Gerätehandbuch SINAMICS S120 Control Units und ergänzende Systemkomponenten. Juni 2020. Erlangen, Deutschland.
- [SMA24] SMA Solar Technology AG (2024): SMA Energy Meter. Online verfügbar unter <https://www.sma.de/produkte/monitoring-control/sma-energy-meter>, zuletzt geprüft am 21.08.2024.
- [SOL24] Solar and Storage Modelling Pty Ltd (2024): Solar API and Weather Forecasting Tool | Solcast™. Online verfügbar unter <https://www.solcast.com/>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [STU21] Studt, Julian; Hadlak, Mattias; Schuster, Merten; Herr, Henrik; Engel, Bernd (2021): Electricity Spot Price Forecast: In Depth Analysis of Different Machine Learning Methods. In: 10th INREC CONFERENCE 2021, 15.-16. September 2021.
- [SYS24] SySiK GmbH (2024): DC-Schütz K3PV-80. Online verfügbar unter <https://www.schuetze24.com/gleichstromschuetz/bis-1200-volt-dc/dc-schuetz-k3pv-80>, zuletzt geprüft am 21.08.2024.
- [TJA15] Tjaden, Tjarko; Bergner, Joseph; Weniger, Johannes; Quaschnig, Volker (2015): Repräsentative elektrische Lastprofile für Wohngebäude in Deutschland auf 1-sekündiger Datenbasis.
- [TUB24] TU Braunschweig (2024): Elektromobilität: Kabelloses Laden im Alltag. Online verfügbar unter <https://magazin.tu-braunschweig.de/pi-post/elektromobilitaet-kabelloses-laden-im-alltag/>.
- [UBA24] Umweltbundesamt: Holzheizungen: Schlecht für Gesundheit und Klima. Online verfügbar unter <https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen/quellen-der-luftschadstoffe/holzheizungen-schlecht-fuer-gesundheit-klima#klimaschutz-und-die-energetische-nutzung-von-holz>, zuletzt geprüft am 27.09.2024.
- [VAN21] Vanselow, Alexander; Krahl, Simon; Meyer, Jan; Möller, Friedemann; Meyer, Marian; Simon, Sandor et al. (2021): Abschlussbericht Studie Unsymmetrie in der Niederspannungsebene. Maximal zulässiger Unsymmetrie-Grenzwert der Bemessungsscheinleistung beim Anschluss und Betrieb von elektrischen Verbrauchsmitteln, Ladeeinrichtungen für Elektrofahrzeuge, Erzeugungsanlagen und Speichern für Kundenanlagen am öffentlichen Niederspannungsnetz. Hg. v. VDE FNN. FGH e.V.; TU Dresden – IEEH; RWTH Aachen – IAEW; TU München; TU Braunschweig – elenia.

- [VDE18] VDE-AR-N 4105, November 2018: Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz –Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz.
- [VDE19] VDE-AR-N 4100, April 2019: Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Niederspannungsnetz und deren Betrieb (TAR Niederspannung).
- [VOL24] Volkswagen AG (2024): Der e-Crafter. Online verfügbar unter <https://www.volkswagen-nutzfahrzeuge.de/de/modelle/vorgaengermodelle-und-oldtimer/vorgaengermodelle/e-crafter.html>, zuletzt geprüft am 20.09.2024.
- [WEE22] Weemaes, Guy (2022): Elektroauto Wiki: Ladung und Ladestecker. Online verfügbar unter <https://www.goingelectric.de/wiki/Ladung-und-Ladestecker/>, zuletzt geprüft am 05.01.2022.
- [WIE21] Wieler, Jochen (2021): Elektroautos im Test: So hoch ist die Reichweite wirklich. Online verfügbar unter <https://www.adac.de/rund-ums-fahrzeug/elektromobilitaet/tests/stromverbrauch-elektroautos-adac-test/>, zuletzt geprüft am 07.12.2021.
- [WUS19] Wussow, Jonas; Di Modica, G.-L.; Engel, Bernd (2019): Grid-Oriented Charging of Electric Vehicles as Approach for Increasing Penetration in Residential Areas. In: VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V. (Hg.): Internationaler ETG-Kongress 2019; ETG-Fachtagung. Internationaler ETG-Kongress 2019; ETG-Fachtagung. Esslingen, Deutschland, 2019-05-08/2019-05-09, S. 1–6.
- [WUS21] Wussow, Jonas (2021): Technische Lösungsansätze zur Erhöhung der Aufnahmekapazität von Niederspannungsnetzen für Elektrofahrzeuge. Dissertation. Technische Universität Braunschweig.