



Schlussbericht vom 2. März 2026

Induktives Laden von Elektrofahrzeugen

INLADE



Quelle: Eniwa / Claudio Richter 2024

**Subventionsgeberin:**

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Ko-Finanzierung:

Kanton Aargau
Departement Bau, Verkehr und Umwelt
CH-5001 Aarau
<https://www.ag.ch/de/verwaltung/bvu>

Kanton Zürich
Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft
CH-8090 Zürich
www.zh.ch/de/audirektion/amt-fuer-abfall-wasser-energie-luft.html

Subventionsempfänger/innen:

BRUGG eConnect AG
CH-5210 Windisch
www.bruggeconnect.com

Empa
CH-8600 Dübendorf
www.empa.ch

Energie Thun AG
CH-3607 Thun
www.energiethun.ch

Eniwa AG
CH-5033 Buchs
www.eniwa.ch

Swisspower AG
CH-3011 Bern
www.swisspower.ch

ZHAW School of Engineering – Institut für Nachhaltige Entwicklung
CH-8401 Winterthur
<https://www.zhaw.ch/de/hochschule>

**Autor/in:**

Christof Knoeri, ZHAW School of Engineering, christof.knoeri@zhaw.ch
Claudio Richter, Eniwa AG, claudio.richter@eniwa.ch
Florian Vancu, ex WiTricity Schweiz GmbH, florian.vancu@gmx.ch
Markus Bittner, ex WiTricity Schweiz GmbH, markus.bittner@icloud.com
Hanspeter Widmer, ex WiTricity Schweiz GmbH, hansp.widmer@gmail.com
Mathias Huber, Empa, mathias.huber@empa.ch
Miriam Elser, Empa, miriam.elser@empa.ch
Mirjam Baumann, ZHAW School of Engineering, mirjam.baumann@zhaw.ch
Philippe Stark, Eniwa AG, philippe.stark@eniwa.ch
Raphael Hoerler, ZHAW School of Engineering, raphael.hoerler@zhaw.ch
Samuel Pfaffen, Eniwa AG, samuel.pfaffen@eniwa.ch

BFE-Projektbegleitung:

Men Wirz, men.wirz@bfe.admin.ch
Luca Castiglioni, luca.castiglioni@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/502727-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren/Autorinnen dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Im Projekt INLADE wurde die technische, regulatorische und betriebliche Machbarkeit des induktiven Ladens von Elektrofahrzeugen in der Schweiz umfassend untersucht. Im Mittelpunkt standen der Umbau von mehreren VW ID.5, die Installation von drahtlosen Ladestationen sowie die Prüfung der Systemleistung unter realen Einsatzbedingungen. Mit der erfolgreichen Integration der WiTricity-Ladesysteme in die Fahrzeuge und der Implementierung der notwendigen Steuerungs-, Sicherheits- und Kühlsysteme konnte gezeigt werden, dass induktives Laden technisch zuverlässig in bestehende Fahrzeuge integriert werden kann.

Ein wesentlicher Projekterfolg war das Erreichen einer regulären und unbefristeten Strassenzulassung aller umgerüsteten Fahrzeuge. Dies ist insofern bemerkenswert, als das induktive Laden in den international harmonisierten Vorgaben zur Fahrzeuggenehmigung bislang nicht eindeutig adressiert ist und deshalb fallbezogene Nachweise erforderlich sind. Das Projekt demonstriert daher einen gangbaren regulatorischen Pfad, der künftigen Retrofit- und OEM-Lösungen Orientierung bietet. Eine Herausforderung stellte die fehlende Konformitätserklärung des Lieferanten der Ladestation dar. Deswegen mussten einerseits Risikoanalysen erstellt werden und andererseits waren die Einsatzorte der Ladestationen auf eigene Standorte bei Eniwa und der Empa limitiert. Die durchgeführten Effizienz- und Netzqualitätsmessungen der Empa zeigen, dass das getestete System mit einem Grid-to-Battery-Wirkungsgrad von rund 90 % in direkter Konkurrenz zu konduktivem AC-Laden steht und sich innerhalb der spezifizierten Positionierungs-Toleranzbereiche sehr stabil verhält. Die gute Systemeffizienz resultieren aus einer optimierter Spulengeometrie, resonanter Kopplung und verlustarmer Leistungselektronik-Komponenten. Die durch den Luftspalt verursachten Übertragungsverluste liegen dabei unter 2 %, welche durch eine hohe Güte des Resonanzkreises erzielt wird. Weitere Effizienzsteigerungen sind durch technologische Weiterentwicklungen durchaus möglich. Vergleichsmessungen am selben Fahrzeug bei konduktivem Laden ergaben einen Grid-to-Battery-Wirkungsgrad von 94 %. Damit liegt die Effizienz der induktiven Ladung nur geringfügig unter dem konduktiven Referenzwert (4 %). Auch unter anspruchsvolleren Umweltbedingungen wie Kälte, Niederschlag oder Eisbildung blieb die Übertragungseffizienz praktisch unverändert. Die Untersuchungen zur Netzqualität bestätigten zudem, dass keine kritischen Flicker-, Oberwellen- oder Spannungsverzerrungen auftreten. Inwieweit die erreichte Effizienz für einen bidirektionalen Betrieb ausreichend ist, kann zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abschliessend beurteilt werden. Eniwa wird voraussichtlich im Nachgang, unter Einbezug der Resultate aus dem INLADE-Projekt, ein Projekt zum bidirektionalen Laden durchführen, um Anforderungen wie beispielsweise die Effizienz solcher Systeme für die Industrie ableiten zu können.

Ergänzend wurde die Nutzerakzeptanz anhand einer systematischen Baseline- und Endline-Umfrage durchgeführt und analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass der wahrgenommene Nutzen und die Einstellung zu induktivem Laden die Akzeptanz der Technologie deutlich positiv beeinflussen. Praktische Erfahrungen führten zu einer weiteren Verbesserung der Einstellung gegenüber der Technologie, während anfängliche Bedenken, insbesondere in Bezug auf Sicherheit und Effizienz, deutlich reduziert wurden.

Über die technischen und betrieblichen Resultate hinaus, lassen sich aus dem Projekt auch zentrale regulatorische Erkenntnisse ableiten: Der bestehende Rechtsrahmen ist in sich konsistent und bildet die klassische Trennung zwischen Fahrzeug und Ladeinfrastruktur sauber ab – induktives Laden durchbricht diese Grenze jedoch systematisch, weil das relevante elektromagnetische Verträglichkeits- und Feldverhalten (EMV / EMF) erst im gekoppelten Gesamtsystem entsteht und damit nicht vollständig in der heutigen Aufteilung abgebildet wird.

Insgesamt belegt das Projekt damit sowohl die technische Leistungsfähigkeit und Praxistauglichkeit, als auch den Bedarf an einer präziseren regulatorischen Verknüpfung von Fahrzeug und Infrastruktur.



Résumé

Le projet INLADE a examiné de manière approfondie la faisabilité technique, réglementaire et opérationnelle de la recharge par induction des véhicules électriques en Suisse. L'accent a été mis sur la conversion de plusieurs VW ID.5, l'installation de stations de recharge sans fil et le test des performances du système dans des conditions réelles d'utilisation. L'intégration réussie des systèmes de recharge WiTricity dans les véhicules et la mise en place des systèmes de commande, de sécurité et de refroidissement nécessaires ont permis de démontrer que la recharge par induction peut être intégrée de manière fiable sur le plan technique dans les véhicules existants.

L'obtention d'une homologation routière régulière et illimitée pour tous les véhicules convertis a constitué un succès majeur du projet. Cela est d'autant plus remarquable que la recharge par induction n'est pas encore clairement abordée dans les spécifications harmonisées au niveau international pour l'homologation des véhicules et que des preuves au cas par cas sont donc nécessaires. Le projet montre donc une voie réglementaire viable qui peut servir de référence pour les futures solutions de modernisation et d'équipement d'origine. L'absence de déclaration de conformité du fournisseur de la station de recharge a également constitué un défi. Il a donc fallu, d'une part, réaliser des analyses de risques et, d'autre part, limiter les lieux d'utilisation des stations de recharge aux sites propres à Eniwa et à l'Empa. Les mesures d'efficacité et de qualité du réseau effectuées par l'Empa montrent que le système testé, avec un rendement grid-to-battery d'environ 90 %, est en concurrence directe avec la recharge AC conductive et se comporte de manière très stable dans les plages de tolérance de positionnement spécifiées. La bonne efficacité du système résulte d'une géométrie de bobine optimisée, d'un couplage résonnant et de composants électroniques de puissance à faibles pertes. Les pertes de transmission causées par l'entrefer sont inférieures à 2 %, ce qui est obtenu grâce à la haute qualité du circuit résonnant. Des gains d'efficacité supplémentaires sont tout à fait possibles grâce aux progrès technologiques. Des mesures comparatives effectuées sur le même véhicule avec une recharge conductive ont donné un rendement réseau-batterie de 94 %. L'efficacité de la recharge inductive n'est donc que légèrement inférieure à la valeur de référence conductive (4 %). Même dans des conditions environnementales plus difficiles, telles que le froid, les précipitations ou la formation de glace, l'efficacité de la transmission est restée pratiquement inchangée. Les études sur la qualité du réseau ont également confirmé qu'il n'y avait pas de scintillement, d'harmoniques ou de distorsions de tension critiques. À l'heure actuelle, il n'est pas encore possible de déterminer avec certitude dans quelle mesure l'efficacité obtenue est suffisante pour un fonctionnement bidirectionnel. Eniwa prévoit de mener une étude sur la charge bidirectionnelle, en tenant compte des résultats du projet INLADE, afin de pouvoir en déduire les exigences telles que l'efficacité de ces systèmes pour l'industrie.

En complément, l'acceptation par les utilisateurs a été évaluée et analysée à l'aide d'une enquête systématique menée au début et à la fin du projet. Les résultats montrent que les avantages perçus et l'attitude à l'égard de la recharge par induction ont une influence nettement positive sur l'acceptation de cette technologie. L'expérience pratique a encore amélioré l'attitude à l'égard de cette technologie, tandis que les inquiétudes initiales, notamment en matière de sécurité et d'efficacité, ont été considérablement atténuées.

Au-delà des résultats techniques et opérationnels, le projet permet également de tirer des enseignements réglementaires essentiels : le cadre juridique existant est cohérent en soi et reflète clairement la séparation classique entre le véhicule et l'infrastructure de recharge – cependant, la recharge par induction franchit systématiquement cette limite, car la compatibilité électromagnétique et le comportement du champ (CEM / CEMF) pertinents n'apparaissent que dans le système global couplé et ne sont donc pas entièrement représentés dans la répartition actuelle.

Dans l'ensemble, le projet démontre ainsi à la fois la performance technique et la faisabilité pratique, mais aussi la nécessité d'une liaison réglementaire plus précise entre les véhicules et les infrastructures.



Summary

The INLADE project comprehensively investigated the technical, regulatory, and operational feasibility of inductive charging for electric vehicles in Switzerland. The focus was on converting several VW ID.5 vehicles, installing wireless charging stations, and testing system performance under real-world conditions. With the successful integration of WiTricity charging systems into the vehicles and the implementation of the necessary control, safety, and cooling systems, it was demonstrated that inductive charging can be reliably integrated into existing vehicles.

A key project success was the achievement of regular and unlimited road approval for all retrofitted vehicles. This is remarkable in that inductive charging has not yet been clearly addressed in the internationally harmonized vehicle approval specifications and therefore requires case-by-case evidence. The project therefore demonstrates a viable regulatory path that provides guidance for future retrofit and OEM solutions. Another challenge was the lack of a declaration of conformity from the charging station supplier. This meant that risk analyses had to be carried out and the charging stations had to be limited to Eniwa and Empa's own sites. The efficiency and grid quality measurements carried out by Empa show that the tested system, with a grid-to-battery efficiency of around 90 %, is in direct competition with conductive AC charging and behaves very stably within the specified positioning tolerance ranges. The good system efficiency results from optimized coil geometry, resonant coupling, and low-loss power electronics components. The transmission losses caused by the air gap are less than 2 %, which is achieved by a high quality factor of the resonant circuit. Further efficiency gains are certainly possible through technological advances. Comparative measurements on the same vehicle using conductive charging yielded a grid-to-battery efficiency of 94 %. This means that the efficiency of inductive charging is only slightly below the conductive reference value (4 %). Even under more demanding environmental conditions such as cold, precipitation, or ice formation, the transmission efficiency remained virtually unchanged. The grid quality investigations also confirmed that no critical flicker, harmonic, or voltage distortions occur. At this stage, it is not yet possible to conclusively assess the extent to which the efficiency achieved is sufficient for bidirectional operation. Eniwa is expected to conduct a study on bidirectional charging in the follow-up, taking into account the results from the INLADE project, in order to derive requirements such as the efficiency of such systems for industry.

In addition, user acceptance was measured and analyzed using a systematic baseline and endline survey. The results show that perceived benefits and attitudes toward inductive charging have a significant positive influence on acceptance of the technology. Practical experience led to a further improvement in attitudes toward the technology, while initial concerns, particularly with regard to safety and efficiency, were significantly reduced.

Beyond the technical and operational results, key regulatory insights can also be derived from the project: The existing legal framework is consistent in itself and clearly reflects the classic separation between vehicle and charging infrastructure – however, inductive charging systematically breaks through this boundary because the relevant electromagnetic compatibility and field behavior (EMC / EMF) only arises in the coupled overall system and is therefore not fully reflected in the current division.

Overall, the project thus demonstrates both the technical performance and practical suitability, as well as the need for a more precise regulatory link between vehicles and infrastructure.



Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

Technische Machbarkeit bestätigt

Induktives Laden kann technisch zuverlässig in bestehende Fahrzeuge integriert und im Realbetrieb stabil betrieben werden.

Effizienz nahe an konduktivem Laden

Mit einem Wirkungsgrad von rund 90 % (Grid-to-Battery) liegt das System nur geringfügig unter kabelgebundenem AC-Laden von ca. 94 % (gleiches Fahrzeug). Die teilweise vorherrschende Meinung einer grundsätzlich ineffizienten Induktionsladung trifft für moderne Systeme nicht mehr zu.

Robustheit im Alltag

Die Übertragung bleibt innerhalb der Positionierungstoleranzen stabil und zeigt auch bei Eis, Regen und Umgebungstemperaturschwankungen keine relevanten Effizienzeinbussen.

Wirtschaftlichkeit mit aktuellem System noch nicht gegeben

Im Prototypenstadium ist das System kostenintensiv (mittlerer bis oberer fünfstelliger Bereich). Ein Retrofit ist nicht wirtschaftlich. Eine Skalierung ist nur über OEM-Integration direkt bei der Fahrzeugherstellung realistisch. Die ersten Serienprodukte werden noch im Jahr 2026 auf den Markt kommen.

Systemischer Mehrwert durch permanente Konnektivität

Der grösste strategische Nutzen liegt in der signifikant erhöhten Anschlussquote: Fahrzeuge mit induktivem Ladesystem sind beim Parkieren automatisch mit dem Netz verbunden. Dies erhöht das Flexibilitätspotenzial und schafft Voraussetzungen für netz- und systemdienliche Anwendungen.

Komfort schafft Akzeptanz und Vertrauen

Praktische Erfahrung mit induktivem Laden wirkt klar akzeptanzsteigernd. Komfort wird als echter Mehrwert wahrgenommen, anfängliche Bedenken werden deutlich reduziert und die positive Einstellung zur Elektromobilität insgesamt gestärkt.

Regulatorische Einordnung induktiver Ladesysteme

Induktives Laden durchbricht die etablierte Trennung zwischen Fahrzeugrecht und Produktrecht: Wesentliche elektromagnetische Eigenschaften entstehen erst im gekoppelten Gesamtsystem. Da dies in den international harmonisierten Vorgaben zur Fahrzeuggenehmigung bislang nicht eindeutig abgebildet ist, sind fallbezogene Nachweise erforderlich.



Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Zusammenfassung..... | 4 |
| Résumé..... | 5 |
| Summary | 6 |
| Kernbotschaften («Take-Home Messages»)..... | 7 |
| Inhaltsverzeichnis | 8 |
| Abbildungsverzeichnis | 10 |
| Tabellenverzeichnis | 12 |
| Abkürzungsverzeichnis | 13 |
| 1 Einleitung | 15 |
| 1.1 Ausgangslage und Hintergrund | 15 |
| 1.2 Motivation des Projekts | 15 |
| 1.3 Projektziele | 16 |
| 2 Anlagenbeschrieb | 16 |
| 2.1 Funktionsweise und Ladetechnik von WiTricity..... | 16 |
| 2.2 WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Ground Pad | 18 |
| 2.3 WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Wall Box | 19 |
| 2.4 WiTricity-Fahrzeugempfänger (VA)..... | 19 |
| 2.5 Spezifikationen gemäss Lieferantenangabe | 20 |
| 3 Vorgehen und Methode..... | 21 |
| 3.1 Genehmigungsverfahren für induktive Ladesysteme | 21 |
| 3.1.1 Erlangung der Markttauglichkeit der Ladestation | 21 |
| 3.1.2 Zulassungsverfahren für Fahrzeuge | 23 |
| 3.1.3 Homologation des Serienproduktes | 25 |
| 3.1.4 Normative und gesetzliche Anforderungen im Überblick | 26 |
| 3.2 User-Experience | 29 |
| 3.2.1 Literaturanalyse und Forschungsfragen..... | 29 |
| 3.2.2 Methodik | 31 |
| 4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse | 34 |
| 4.1 Fahrzeugumbau am Beispiel des ersten Fahrzeug-Prototyps (Eniwa)..... | 34 |
| 4.1.1 Bericht Umbauarbeiten ABT eLine GmbH | 34 |
| 4.1.2 Ausgeführte Arbeiten WiTricity und Mess- und Prüfinstitute..... | 41 |
| 4.1.3 Integration in Swiss E-Car | 42 |
| 4.2 Fahrzeugumbau am Beispiel des dritten Fahrzeug Prototyps (Empa) | 44 |
| 4.2.1 Reverse-Engineering Fahrzeug Eniwa..... | 44 |
| 4.2.2 Umbauarbeiten AMAG | 45 |
| 4.2.3 Umbauarbeiten Durot Electric | 48 |



| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.3 | Die Zulassung am Beispiel des ersten Fahrzeug-Prototyps | 50 |
| 4.3.1 | Vorabklärungen mit involvierten Parteien..... | 50 |
| 4.3.2 | EMV-Messungen für Fahrzeugzulassung | 51 |
| 4.3.3 | NEV-Prüfung am Fahrzeug Nr. 1 | 55 |
| 4.4 | Zulassung der weiteren Fahrzeug-Prototypen | 57 |
| 4.5 | Nachmessung und unbefristete Zulassung | 57 |
| 4.6 | Installation der Ladestationen..... | 58 |
| 4.6.1 | Standort Eniwa | 58 |
| 4.6.2 | Standort Empa..... | 60 |
| 4.7 | Einfluss auf die Neuwagengarantie resp. Gewährleistung..... | 61 |
| 4.8 | Labormessungen im Realbetrieb..... | 62 |
| 4.8.1 | Messungen der Übertragungseffizienz..... | 62 |
| 4.8.2 | Netzurückwirkungen und deren Auswirkungen auf die Netzqualität | 75 |
| 4.8.3 | Einfluss von Umwelt- und Wetterbedingungen | 75 |
| 4.8.4 | Weitere Messungen..... | 79 |
| 4.9 | User Experience | 82 |
| 4.9.1 | Deskriptive Resultate Baseline-Umfrage..... | 82 |
| 4.9.2 | Resultate SEM-Analyse Baseline-Umfrage..... | 87 |
| 4.9.3 | Resultate Testgruppe (Endline-Survey) | 88 |
| 4.9.4 | Synthese der Ergebnisse der User-Experience | 91 |
| 5 | Bewertung der Ergebnisse | 92 |
| 5.1 | Technische Integration und Fahrzeugumbauten..... | 92 |
| 5.2 | Zulassungsverfahren und regulatorische Erkenntnisse | 92 |
| 5.3 | Installation der Ladeinfrastruktur | 92 |
| 5.4 | Effizienz- und Netzqualitätsmessungen | 92 |
| 5.5 | User Experience | 93 |
| 5.6 | Wirtschaftliche Aspekte | 93 |
| 5.7 | Gesamtfazit..... | 93 |
| 5.8 | Ausblick | 94 |
| 6 | Nationale und internationale Zusammenarbeit | 94 |
| 7 | Kommunikation | 96 |
| 8 | Publikationen | 98 |
| 9 | Literaturverzeichnis | 99 |
| 10 | Anhang | 100 |
| 10.1 | Risikoanalyse Installationsstandort Eniwa | 100 |
| 10.2 | Risikoanalyse Installationsstandort Empa..... | 103 |
| 10.3 | Vollständiges Messprotokoll der Effizienz- und Netzqualitätsmessungen | 106 |
| 10.4 | Fahrzeugausweise mit Eintragung des induktiven Ladesystems (Eniwa) | 108 |



| | | |
|--------|--|-----|
| 10.5 | Fahrzeugausweise mit Eintragung des induktiven Ladesystems (Empa)..... | 108 |
| 10.6 | User-Experience Kontrollgruppe | 109 |
| 10.7 | Terminologie: Genehmigung, Zulassung, Konformität | 110 |
| 10.8 | Normenübersicht an kabelloses Laden von Elektrofahrzeugen | 111 |
| 10.9 | Messungen zu Netzrückwirkungen..... | 112 |
| 10.9.1 | Spannungsschwankungen (Flicker) | 112 |
| 10.9.2 | Oberschwingungen und Verzerrung (THD & FFT)..... | 114 |
| 10.10 | Vollständiger EMV/EMF Prüfbericht | 117 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|---------------|--|----|
| Abbildung 1: | Ladesystem eines EV mit kabelgebundenem AC-Ladegerät (Quelle: WiTricity) | 17 |
| Abbildung 2: | Kabelloses Ladesystem eines EV mit induktiver Ladetechnologie (Quelle: WiTricity) | 17 |
| Abbildung 3: | Induktives Ladesystem von WiTricity (Ground Pad, Wall Box & Verkabelung) | 18 |
| Abbildung 4: | WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Ground Pad | 18 |
| Abbildung 5: | WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Wall Box..... | 19 |
| Abbildung 6: | WiTricity-Fahrzeugempfänger (VA)..... | 20 |
| Abbildung 7: | Wichtige Anforderungen im Bezug zu kabellosem Laden (Quelle: eigene Grafik) | 27 |
| Abbildung 8: | Schematische Darstellung der regulatorischen Einordnung von Ladesystemen | 28 |
| Abbildung 9: | Übersicht zum Forschungsdesign der User-Experience..... | 31 |
| Abbildung 10: | Schematischer Aufbau Fahrzeugintegration | 35 |
| Abbildung 11: | Demontage Unterbodenabdeckung vorne | 35 |
| Abbildung 12: | Innenaufbau der vormontierten Relaisbox | 36 |
| Abbildung 13: | Vehicle Assembly inkl. Montagerahmen und Relaisbox | 36 |
| Abbildung 14: | vorbereiteter Unterboden vor der Montage der Fahrzeugeinheit (Vehicle Assembly)... | 37 |
| Abbildung 15: | Unterboden mit installiertem Montagerahmen und vorbereiteten Kühlschläuchen | 37 |
| Abbildung 16: | Fertig installierter Unterboden inkl. Schirmbleche | 38 |
| Abbildung 17: | Steuereinheit «Ladekommunikation» | 38 |
| Abbildung 18: | Kabelbaum Niedervoltssystem (12 V) vor Fahrzeuginstallation | 39 |
| Abbildung 19: | Installation Kabelbaum im Fahrzeuginneren..... | 39 |
| Abbildung 20: | Installation Kabelbaum im hinteren Fahrzeugbereich..... | 40 |
| Abbildung 21: | Zusätzliches Display zur Visualisierung des Systemzustands | 40 |
| Abbildung 22: | Modifikation am WiTricity-Fahrzeugempfänger im Eniwa Fahrzeug bei der Empa | 41 |
| Abbildung 23: | Folgemessungen der abgestrahlten Emissionen bei WiTricity | 42 |
| Abbildung 24: | Autodisplay mit Fehlermeldung..... | 42 |
| Abbildung 25: | Verkabelung der Platine für die Keyless-Box..... | 43 |
| Abbildung 26: | Fertige Keyless-Box | 43 |
| Abbildung 27: | OBD-Steckplatz im Fahrzeug..... | 44 |



| | |
|--|----|
| Abbildung 28: Admin-Portal Swiss E-Car..... | 44 |
| Abbildung 29: Beispiel Anbindung an Fahrzeug-Kabelstrang..... | 45 |
| Abbildung 30: Installierte Fahrzeugeinheit (VA) am Unterboden..... | 46 |
| Abbildung 31: Neue Halterung der Kühlmittelpumpe und des Magnetventils..... | 46 |
| Abbildung 32: Display zur Visualisierung der Einparkhilfe auf Mittelkonsole..... | 47 |
| Abbildung 33: neue elektrische Leitungen in orange..... | 47 |
| Abbildung 34: Musterrahmen mit Kabelstrang..... | 48 |
| Abbildung 35: Zusätzliche Sicherungshalter im vorderen Sicherungskasten..... | 48 |
| Abbildung 36: Vormontage der Hochvoltkomponenten des WiTricity-Systems..... | 49 |
| Abbildung 37: Neue Abzweigdose des Hochvoltsystems..... | 49 |
| Abbildung 38: Fahrzeug Nr. 1 im EMV-Labor mit Feldgenerator zur Prüfung der Immunität..... | 52 |
| Abbildung 39: Grenzwerte gestrahlter Störaussendungen im Bereich von 30 MHz bis 1 GHz..... | 53 |
| Abbildung 40: Messung nach UN-R10 - Test 1, rechte Fahrzeugseite & vertikale Ausrichtung..... | 54 |
| Abbildung 41: Messung nach IEC 61980 (Test 4, 360°)..... | 55 |
| Abbildung 42: Prüfung des Isolationswiderstandes an der Empa..... | 56 |
| Abbildung 43: Nachmessung der Breitbandemissionen nach UN-R10..... | 57 |
| Abbildung 44: Installation des Leerrohrs beim ersten Ladestationsstandort..... | 58 |
| Abbildung 45: Box mit Monitoring- und Abrechnungssystem..... | 59 |
| Abbildung 46: Fertiggestellte induktive Ladestation bei Eniwa in Buchs..... | 60 |
| Abbildung 47: Kabellose Ladestation auf dem Campus der Empa Dübendorf..... | 60 |
| Abbildung 48: Effizienzmessungen im Labor der Empa..... | 62 |
| Abbildung 49: Testsetup für Effizienzmessungen..... | 64 |
| Abbildung 50: Schematische Übersicht der Messstellen zur Wirkungsgradmessung..... | 65 |
| Abbildung 51: Zeitaufgelöster Verlauf einer beispielhaften Ladung..... | 68 |
| Abbildung 52: Einfluss Längs- und Querachsenabweichungen auf G2B-Wirkungsgrad..... | 69 |
| Abbildung 53: Einfluss Längs- und Querachsenabweichungen auf G2B-Wirkungsgrad (erweitert).... | 70 |
| Abbildung 54: Effizienzverlauf in Längs- und Querrichtung über den erweiterten Offset-Bereich..... | 71 |
| Abbildung 55: Effizienzverteilung auf der Hochachse (Z-Offset)..... | 72 |
| Abbildung 56: Vergleich mit konduktivem Laden..... | 73 |
| Abbildung 57: Vergleich Ladeeffizienz Serienfahrzeuge (Quellen: Green NCAP & INLADE-Projekt) . | 74 |
| Abbildung 58: Das Ground Pad mit 6 cm dicker Eisschicht in Klimazelle..... | 76 |
| Abbildung 59: Einfluss von Wetter- und Umgebungsbedingungen auf die Übertragungseffizienz..... | 77 |
| Abbildung 60: Kabellose Ladung und Messung bei Regen..... | 78 |
| Abbildung 61: Messung der Batteriezellentemperatur (induktiv blau, konduktiv rot)..... | 79 |
| Abbildung 62: Kühlmitteltemperatur am Batterie Ein- & Ausgang beim konduktiven Laden..... | 80 |
| Abbildung 63: Kühlmitteltemperatur am Batterie Ein- & Ausgang beim induktiven Laden..... | 81 |
| Abbildung 64: Ladeleistung und Energie um Leistungsbedarf der Kühlung korrigiert..... | 81 |
| Abbildung 65: ÖV-Abos der Befragten..... | 83 |



| | |
|---|-----|
| Abbildung 66: Autobesitz der Befragten..... | 83 |
| Abbildung 67: Wahrgenommener Nutzen und Benutzerfreundlichkeit von kabellosem Laden (KL) | 84 |
| Abbildung 68: Wahrgenommene Risiken von kabellosem Laden..... | 84 |
| Abbildung 69: Einstellungen zu kabellosem Laden (KL)..... | 85 |
| Abbildung 70: Nutzung von Carsharing | 85 |
| Abbildung 71: Nutzungsabsichten der Befragten zu kabellosem Laden (KL)..... | 86 |
| Abbildung 72: Zahlungsbereitschaft der Befragten für kabelloses Laden (KL)..... | 86 |
| Abbildung 73: SEM-Analyse intention to use | 87 |
| Abbildung 74: SEM-Analyse intention to buy | 88 |
| Abbildung 75: Zufriedenheit mit induktivem Laden | 89 |
| Abbildung 76: Schwierigkeiten mit induktivem Laden | 89 |
| Abbildung 77: Gefühlte Sicherheit beim induktiven Laden | 90 |
| Abbildung 78: Vergleich zu kabelgebundenem Laden..... | 90 |
| Abbildung 79: Häufigkeit Veränderung der Einstellung | 90 |
| Abbildung 80: Flickermessung | 114 |
| Abbildung 81: FFT-Analyse der harmonischen Oberschwingungen (Spannung blau, Strom rot)..... | 115 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|-----|
| Tabelle 1: Spezifikationen gemäss Lieferantenangabe | 20 |
| Tabelle 2: Literaturübersicht zu User-Experience | 30 |
| Tabelle 3: Baseline- und Endline-Umfrage | 32 |
| Tabelle 4: Definierte Prüfungen im Rahmen des erstellten Testprogramms | 51 |
| Tabelle 5: Messgerätespezifische Messunsicherheit..... | 66 |
| Tabelle 6: Reproduzierbarkeit der Effizienzmessungen | 67 |
| Tabelle 7: effektive Ladeeffizienz unter Berücksichtigung des Leistungsbedarfs des Kühlsystems | 81 |
| Tabelle 8: Demographische Daten der Befragten in der Baseline-Umfrage..... | 82 |
| Tabelle 9: Normen und Regelungen zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen..... | 111 |
| Tabelle 10: Ergebnisse der Flickermessung | 113 |
| Tabelle 11: THD-Analyse | 116 |



Abkürzungsverzeichnis

| | |
|------------------|---|
| AC | Alternating Current / Wechselstrom |
| APS | Anerkannte Prüfstelle (CH) |
| ASTRA | Bundesamt für Strassen |
| BAKOM | Bundesamt für Kommunikation |
| BFE | Bundesamt für Energie |
| BMS | Battery Management System / Batterie-Management-System |
| CE | Conformité Européenne / Europäische Konformität |
| CENELEC | Europäischen Komitees für elektrotechnische Normung |
| CoC | Certificate of Conformity / Übereinstimmungsbescheinigung |
| cos φ | Leistungsfaktor |
| dB | Dezibel |
| DC | Direct Current / Gleichstrom |
| dc | Relative stationäre Spannungsänderung |
| dmax | Maximale relative Spannungsänderung |
| DoC | Declaration of Conformity / Konformitätserklärung |
| ECE | Economic Commission for Europe / Wirtschaftskommission für Europa |
| EMF | elektromagnetische Felder / Exposition |
| EMV / EMC | Elektromagnetische Verträglichkeit / Electromagnetic compatibility |
| EU | Europäische Union |
| EV | Electric vehicle / Elektrofahrzeug |
| FOD | Foreign Object Detection / Erkennung von Fremdkörper |
| Fz. | Fahrzeug |
| GSR | General Safety Regulation / Allgemeine Sicherheitsverordnung |
| GWh | Gigawattstunde |
| Hz | Hertz |
| IB | Intention to Buy |
| IEC | International Electrotechnical Commission / Internationale Elektrotechnische Kommission |
| IMN | Impedance Matching Network / Impedanz Anpass-Netzwerk |
| I _{rms} | Durchschnittlicher Strom-Effektivwert |
| ISO | International Standards Organization / Internationale Organisation für Normung |
| IU | Intention to Use |
| kWh | Kilowattstunde |
| LOD | Livion Object Detection / Erkennung lebender Objekte |
| NB | Notified Body / benannte Stelle im EU-Produktrecht (CE) zur Konformitätsbewertung |
| NEV | Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse |
| NIV | Niederspannungs-Installationsverordnung |
| OBD | On Board Diagnose |
| OEM | Original Equipment Manufacturer / Originalgerätehersteller |
| PBB | Polybromierte Biphenyle |
| PBDE | Polybromierte Diphenylether |
| PC | Perceived Concern |
| PD | Passive Beacon Position Detection / Passive Positionserfassung |
| PEOU | Perceived Ease of Use |
| PFC | Power Factor Correction / Leistungsfaktorkorrektureinheit |
| P _{lt} | Langzeitflickerwert |
| P _{rms} | Durchschnittlicher Leistungs-Effektivwert |
| P _{st} | Kurzzeitflickerwert |
| PU | Perceived Usefulness |
| Q | Blindleistung |
| RoHS | Restricion of Hazardous Substances / Beschränkung gefährlicher Stoffe |
| S | Scheinleistung |
| SAE | Society of Automotive Engineers / Gesellschaft der Kraftfahrzeugingenieure |
| SN | Subjective Norm |



| | |
|-------|---|
| STVA | Strassenverkehrsamt |
| TAM | Technology Acceptance Model |
| TD | Technischer Dienst / nach EU-Typgenehmigungsrecht benannter Technischer Dienst |
| Td(t) | Dauer eines Flickereignisses |
| TGV | Verordnung über Typengenehmigung von Strassenfahrzeugen |
| THD | Gesamte Oberschwingungsverzerrung |
| TPB | Theory of Planned Behavior |
| UN | United Nations / Vereinte Nationen |
| UNECE | United Nations Economic Commission for Europe / Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa |
| Urms | Durchschnittlicher Spannungs-Effektivwert |
| V2G | Vehicle-to-Grid / Vom Fahrzeug zum Netz |
| VA | Vehicle Assembly / Fahrzeugempfänger (SAE Standard Terminologie) |
| VEMV | Verordnung über elektromagnetische Verträglichkeit |
| VO | Verordnung |
| VREG | Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte |
| VTS | Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge |
| VW | Volkswagen |
| WEEE | Waste from Electrical and Electronic Equipment / Abfälle aus elektrischen und elektronischen Geräten |
| WP.29 | Weltforum für die Harmonisierung von Fahrzeugschriften |
| WPT | Wireless Power Transfer / Drahtlose Energieübertragung |
| WVTA | Whole Vehicle Type Approval / Fahrzeug-Gesamtgenehmigung |



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Hintergrund

In den letzten Jahren hat sich die Elektromobilität in der Schweiz stetig weiterentwickelt und es wurden bedeutende Fortschritte im Rollout von Ladeinfrastruktur erzielt. Es ist davon auszugehen, dass zukünftig auch autonome Fahrzeuge auf den Schweizer Strassen unterwegs sein werden. Das induktive Laden von Elektrofahrzeugen stellt dabei eine vielversprechende neue Technologie dar, die besonders durch ihren Komfort und die Nutzung bei autonomen Fahrzeugen einen Vorteil gegenüber den konventionellen Ladesystemen bietet. Diese Technologie eliminiert das manuelle Anschliessen von Ladekabeln und eröffnet neue Möglichkeiten für die Nutzung von Elektrofahrzeugen im städtischen Raum und darüber hinaus. Das Projekt «Induktives Laden von Elektrofahrzeugen» (INLADE) zielt darauf ab, die Machbarkeit dieser Technologie durch Pilotinstallationen zu testen und ihre Vor- und Nachteile in der Praxis zu evaluieren.

Bisher wurde induktives Laden vorwiegend in Testumgebungen oder als Prototyp mit geringer Ladelistung eingesetzt. Die früheren Systeme waren durch geringe Ladeleistungen von typischerweise 3 – 4 kW, Wirkungsgrade um 85 % sowie fehlende Standardisierung limitiert.

So realisierten BMW und BRUSA ein induktives Ladesystem für Personenfahrzeuge (Brüch, 2018), das in Kleinstserie umgesetzt wurde, jedoch keinen Übergang in eine breite industrielle Skalierung erfuhr. Parallel dazu wurden in Deutschland Pilotprojekte zum dynamischen induktiven Laden realisiert (Stuttgart, 2023), bei denen Spulensysteme in Beton bzw. Fahrbahninfrastruktur integriert wurden, um das Laden während der Fahrt zu testen.

Das Projekt INLADE sieht vor, die Ladelösung für verschiedene Fahrzeugtypen nutzbar zu machen und das induktive Laden in den Alltag zu integrieren, um so den Komfort und die Akzeptanz der Elektromobilität weiter zu steigern.

1.2 Motivation des Projekts

Die Nachfrage nach benutzerfreundlichen Mobilitätslösungen sowie die politischen Rahmenbedingungen, wie die Energiestrategie 2050, machen das induktive Laden von Elektrofahrzeugen zu einem nächsten logischen Schritt. Es stellt sich die Frage, ob durch die Vorteile des komfortablen und kabellosen Ladens und die Reduzierung des Wartungsaufwands eine höhere Akzeptanz und Nutzung von Elektrofahrzeugen erreicht werden kann.

Induktives Laden könnte auch beim bidirektionalen Laden eine zentrale Rolle spielen, da es den Ladeprozess automatisiert und die Nutzung von Fahrzeugen als mobile Energiespeicher vereinfacht und deren Verfügbarkeit (Konnektivität mit dem Netz) steigert. Dies trägt zur Stabilisierung des Stromnetzes bei und unterstützt die Integration erneuerbarer Energien.

Die bisherigen Pilotprojekte zeigen das Potenzial dieser Technologie, jedoch bestehen offene Fragen zur Effizienz, Zuverlässigkeit und regulatorischen Umsetzbarkeit im Realbetrieb. Das Projekt adressiert diese Lücken durch Pilotinstallationen unter Praxisbedingungen. Mit der eingesetzten WiTricity-Technologie werden frühere Hürden hinsichtlich Ladeleistung und Wirkungsgrad reduziert. Untersucht werden insbesondere Energieeffizienz, Umwelteinflüsse, regulatorische Zulassungspfade sowie das Nutzerverhalten.

Der erwartete energetische Impact liegt in der erhöhten Konnektivität der Fahrzeuge: Sobald ein Fahrzeug parkiert ist, ist es automatisch mit dem Netz gekoppelt, ohne dass ein manuelles Einstecken erforderlich ist. Dadurch steigt die potenzielle Verfügbarkeit für netzdienliche Lade- und Entladevorgänge signifikant. Diese permanente Anschlussbereitschaft kann die systemdienliche Integration erneuerbarer Energien verbessern und die Stabilität des Stromsystems nachhaltig stärken.

Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass der erhöhte Komfort des kabellosen Ladens die Attraktivität von Elektrofahrzeugen generell steigert und als Enabler-Technologie wirkt. Dies könnte dazu



führen, dass sich mehr Personen für den Kauf eines Elektrofahrzeugs entscheiden. Die These wird im Rahmen einer begleitenden Studie mit E-Carsharing-Teilnehmenden untersucht, um zu analysieren, ob und inwiefern praktische Erfahrung mit induktivem Laden die Akzeptanz und Kaufabsicht beeinflusst.

1.3 Projektziele

Das übergeordnete Ziel des Projekts ist die technische Machbarkeit des induktiven Ladens von Elektrofahrzeugen in der Schweiz zu demonstrieren und die Praxistauglichkeit dieser Technologie zu evaluieren. Dies umfasst insbesondere die folgenden Ziele.

- **Technische Machbarkeit:** Installation und Betrieb von 6-7 Ladestationen und entsprechenden Fahrzeugen. Der Fokus liegt auf der erfolgreichen Zulassung der Ladesysteme und Fahrzeuge in der Schweiz, basierend auf den regulatorischen Anforderungen.
- **Energieeffizienz und Zuverlässigkeit:** Die EMPA wird technische Untersuchungen durchführen, um die Energieeffizienz und Zuverlässigkeit der Systeme zu bewerten.
- **Nutzererfahrung (User-Experience):** Die ZHAW führt eine Studie zur Nutzererfahrung durch, um zu analysieren, wie die Technologie im Alltag angenommen wird, insbesondere im Bereich des E-Carsharings.
- **Erweiterungspotenzial:** Es sollen zusätzliche Anwendungsfälle evaluiert werden, um die Skalierbarkeit der Technologie für den breiteren Einsatz in der Elektromobilität zu prüfen.

Langfristig soll das Projekt zeigen, ob das induktive Laden eine tragfähige Lösung für die Zukunft der Elektromobilität darstellt und welche Optimierungen für eine breitere Markteinführung notwendig sind.

2 Anlagenbeschreibung

2.1 Funktionsweise und Ladetechnik von WiTricity

Das kabellose Laden basiert auf dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion, bei dem Energie drahtlos zwischen einer Senderspule in einer Ladeplatte (Ground Pad) am Boden und einer Empfängerspule in einem Fahrzeugempfänger (Vehicle Assembly) übertragen wird. Die Übertragung erfolgt über einen Luftspalt, anstelle der konventionellen Übertragung über einen Eisenkern in einem Transformator. Je grösser der Luftspalt ist, desto mehr sinkt die Effizienz der Energieübertragung. Auch eine ungenaue Ausrichtung (Versatz) zwischen der Ladeplatte am Boden und der Empfängerspule im Fahrzeug kann die Effizienz verringern.

Das Ladesystem von WiTricity verwendet ein optimiertes Spulendesign und spezielle Low-Loss-Resonatoren, um Verluste in der Übertragung vom Sender zum Empfänger zu minimieren und die Effizienz zu steigern. Zudem hilft ein Positionierungssystem dabei, den Versatz zwischen den beiden Ladeplatten zu reduzieren, was eine höhere Übertragungseffizienz ermöglicht. Dadurch erreicht das induktive System Wirkungsgrade, die mit konventionellen konduktiven Ladegeräte nahezu vergleichbar sind.

In früheren Labortests wurden Ladeeffizienzen zwischen 88 % und 92 % gemessen, abhängig von der Bodenfreiheit (z-Höhe) des Fahrzeugempfängers (im Bereich 14 cm bis 18 cm) und den Positionierungsversatz zwischen den Ladeplatten (im Bereich ± 10 cm lateral, $\pm 7,5$ cm longitudinal in Fahrrichtung). Diese Wirkungsgrade sind nahe an einem Mittelwert von Level-2-Ladestationen (Kabelgebundene AC-Ladegeräte (On-Board Charger) mittlerer Leistung, typischerweise im Bereich 3,3 – 22 kW).

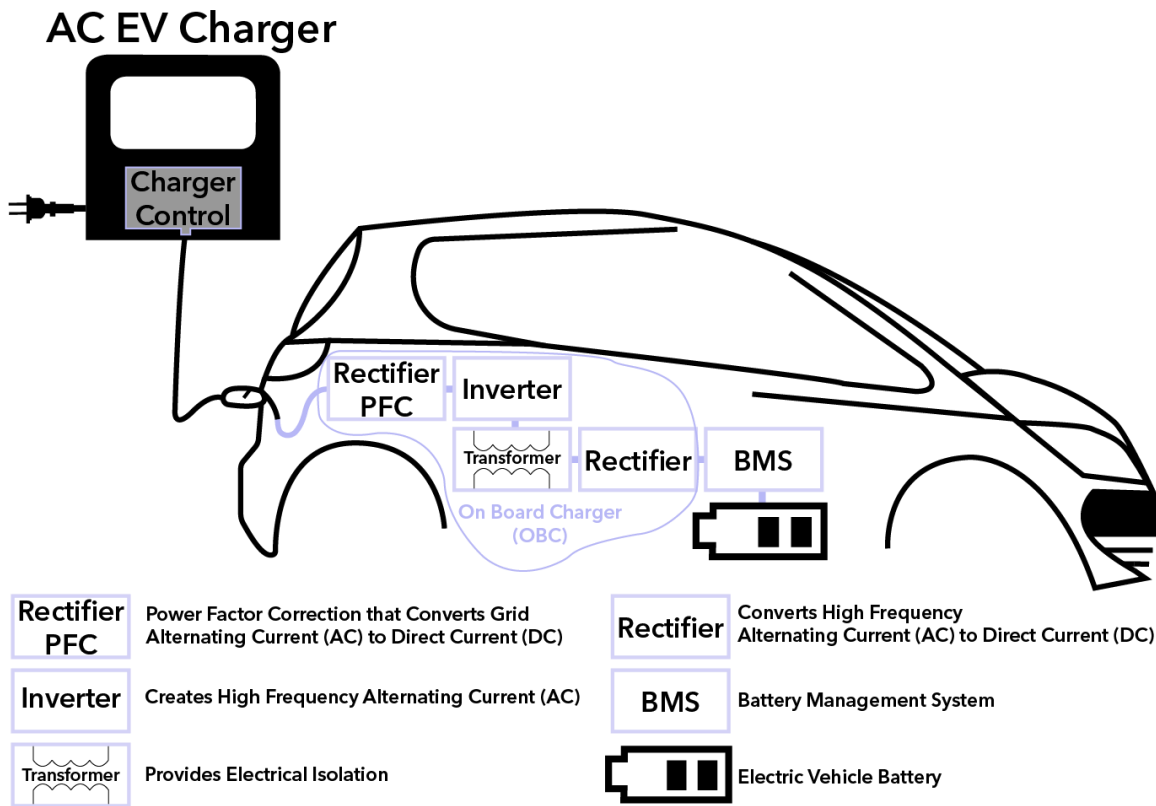


Abbildung 1: Ladesystem eines EV mit kabelgebundenem AC-Ladegerät (Quelle: WiTricity)

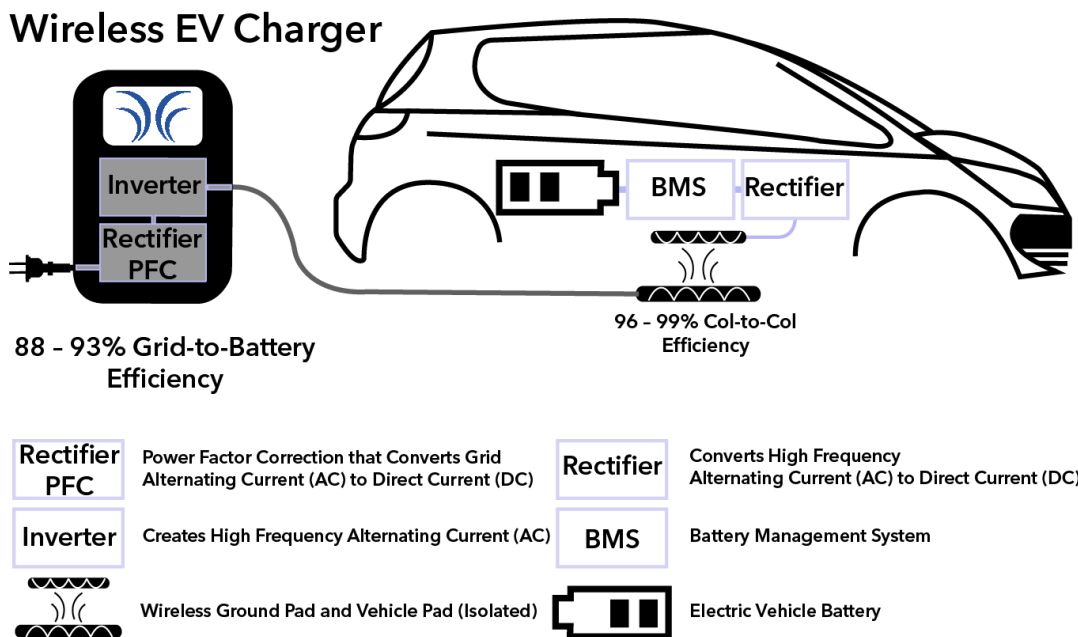


Abbildung 2: Kabelloses Ladesystem eines EV mit induktiver Ladetechnologie (Quelle: WiTricity)



Das System von WiTricity beinhaltet das «WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Ground Pad», die «WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Wall Box», die «WiTricity Vehicle Assembly» sowie auch ein Betriebshandbuch.

Das System ermöglicht eine netto Energieübertragung von bis zu 10,1 kW an eine DC-Last oder an den Hochspannungsbus eines Elektrofahrzeugs bei einer AC-Eingangsleistung von 11 kW. Es ist konform mit den SAE J2954- und den entsprechenden IEC/ISO-Normen. Die induktive Energieübertragung erfolgt mit einer festen Frequenz von 85,5 kHz.



Abbildung 3: Induktives Ladesystem von WiTricity (Ground Pad, Wall Box & Verkabelung)

2.2 WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Ground Pad

Das Ground Pad enthält die Senderspule sowie ein Impedanz Anpass Netzwerk (IMN), welche den sendeseitigen Resonanzkreis bilden. Zusätzlich ist ein Hilfssystem zur Erkennung von metallischen Fremdkörpern (FOD) und lebenden Objekten (LOD) integriert. Das FOD-System dient auch der Positions-Detektion (PD) mit Hilfe einer in die Empfängerspule integrierten Passive Beacon Schaltung. Das Ground Pad ist für reale Einsatzbedingungen konzipiert, für einen Umgebungstemperaturbereich von -40°C bis $+80^{\circ}\text{C}$ spezifiziert, kann von Fahrzeugen überfahren werden und ist wasserdicht nach IP68.



Abbildung 4: WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Ground Pad



2.3 WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Wall Box

Die WiTricity Wall Box ist in zwei Ausführungsvarianten erhältlich: mit einphasigem oder mit dreiphasigem Netzanschluss. Für den Pilotversuch in der Schweiz wurde sinnigerweise die dreiphasige Variante verwendet. Diese ist mit einer dreiphasigen Leistungsfaktorkorrektureinheit (PFC), einem Zwischenkreis-DC-DC-Wandler, einem Wechselrichter und einer Steuerelektronik ausgestattet. Die PFC und der folgende DC-DC-Wandler dienen der Umwandlung der Wechselspannung am Eingang in eine variable Gleichspannung zur Speisung des hochfrequenten Wechselrichters. Die Steuerelektronik erzeugt die Schalt- und Steuersignale für die Energiewandler. Sie verfügt auch über einen Anwendungsprozessor sowie ein WiFi/LTE-Modul, welche die Steuerung des Ladevorgangs (Leistungsregelung) beziehungsweise die Kommunikation zwischen Wall Box und der Fahrzeugeinheit (Vehicle Assembly) sowie die Anbindung an ein 4G-Mobilfunknetzwerk gewährleisten. Die in der Wallbox generierte hochfrequente Energie (85,5 kHz) wird über ein vorkonfektioniertes geschirmtes Kabel zum Ground Pad übertragen. Dieses mehradrige Kabel dient auch der Stromversorgung und der Kommunikation mit den Hilfssystemen (FOD, LOD, PD).



Abbildung 5: WiTricity Halo Wireless Charger 11 kW Wall Box

2.4 WiTricity-Fahrzeugempfänger (VA)

Entsprechend dem Sender, enthält auch der Empfänger (Vehicle Assembly) eine integrierte Spule mit dem dazugehörigen Impedanz Anpass Netzwerk (IMN), welche den empfangsseitigen Resonanzkreis bilden. Leistungs- und Steuerelektronik sind ebenfalls Teil des Fahrzeugempfängers. Die Leistungselektronik besteht im Wesentlichen aus einem Gleichrichter, der die in die Empfängerspule induzierte hochfrequente Wechselspannung (85,5 kHz) in eine Gleichspannung umwandelt. Ein nachfolgender DC-DC-Wandler dient der Anpassung an den aktuellen DC-Lastwiderstand, welcher bekanntlich stark mit der DC-Ausgangsleistung und der Spannung der Fahrzeugbatterie variieren kann (z.B. 300 – 420 VDC je nach Ladezustand). Er ist damit Bestandteil des Laderegelkreises. Den WiTricity-Fahrzeugempfänger gibt es in zwei Ausführungsvarianten: eine Variante für nominal 400 VDC und eine für nominal 800 VDC-Batterien. Die Fahrzeuge des Pilotversuches (ID5) wurden mit der 400 VDC-Variante ausgestattet. Die Steuerelektronik generiert die Schalt- und Steuersignale der Leistungselektronik und regelt diese im Verbund mit der sendeseitigen Wall Box mittels Kommunikation über ein integriertes WiFi-Modul. Weiter verfügt der Fahrzeugempfänger über eine in die Empfängerspule integrierte Passive Beacon-Schaltung, welche die Bestimmung der relativen Fahrzeugposition mittels des im Ground Pad integrierten FOD-Systems ermöglicht. Der Empfänger ist für eine Bodenfreiheit von 14 cm bis 18 cm



(innerhalb des z2-Bereiches gemäss SAE-Norm) optimiert und benötigt einen Anschluss an den bestehenden Flüssigkühlkreislauf des Fahrzeugs.

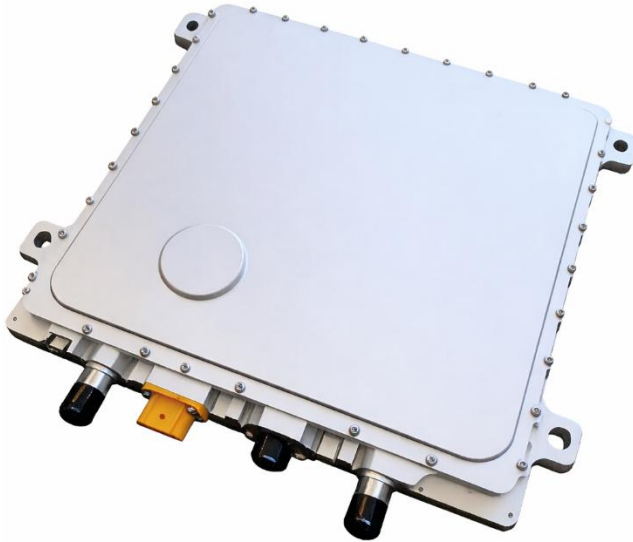


Abbildung 6: WiTricity-Fahrzeugempfänger (VA)

2.5 Spezifikationen gemäss Lieferantenangabe

Tabelle 1: Spezifikationen gemäss Lieferantenangabe

| | |
|--|---|
| Betriebsfrequenz | 85,5 kHz |
| Wirkungsgrad der Energieübertragung (AC-Eingang zu DC-Ausgang) | 88 % bis 92 % in den Betriebspunkten mit voller Leistung. |
| Positionstoleranz | ± 10 cm (lateral) ± 7,5 cm (longitudinal, in Fahrrichtung) |
| z-Höhentoleranz | 14 – 18 cm (innerhalb SAE z2-Bereich) |
| Nominale Eingangsleistung | 11 kW |
| Ausgangsleistung | DC: 10,1 kW |
| Ausgangsspannung | DC: VA funktioniert über einen Batteriespannungsbereich von 220-450 V DC, teilweise mit Power Derating. Die spezifizierte Leistung kann im Spannungsbereich zwischen 320-450 V geliefert werden. Reduzierte Leistung bei 220–320 V DC |
| Physikalische Abmessungen | |
| Wall Box | 250 mm x 592 mm x 228 mm |
| Ground Pad | 840 mm x 794 mm x 61 mm |
| Fahrzeugempfänger (Vehicle Assembly) | 80 mm x 380 mm x 55mm |
| Gewicht Fahrzeugempfänger | 13 kg |



3 Vorgehen und Methode

3.1 Genehmigungsverfahren für induktive Ladesysteme

Die Zulassungs- respektive Genehmigungsverfahren unterscheiden sich, je nachdem, ob das System als Serienprodukt im Rahmen einer Erstausrüstung homologiert werden soll, oder - wie im Fall der Prototypen in diesem Projekt - an einem Einzelfahrzeug. Zudem unterscheiden sich die Zulassungsverfahren der Fahrzeuge (inklusive verbautem Ladesystem) von der Zulassung der netzseitigen Ladestation (Wall Box & Bodenplatte). Die drei unterschiedlichen Verfahren werden nachfolgend in den Abschnitten «Erlangung der Markttauglichkeit der Ladestation» (3.1.1), «Zulassungsverfahren für Fahrzeuge» (3.1.2) sowie «Homologation des Serienproduktes» (3.1.3) beschrieben.

3.1.1 Erlangung der Markttauglichkeit der Ladestation

Die Marktzulassung von elektrischen Betriebsmitteln in der EU und in der Schweiz unterscheidet sich grundlegend vom Zulassungsverfahren im Automobilbereich. Während Kraftfahrzeuge ein aufwändiges Genehmigungsverfahren durchlaufen müssen, welches die abschliessende Prüfung durch eine Behörde beinhaltet, basiert die Erlangung der Markttauglichkeit von elektrischen Betriebsmitteln auf dem Prinzip der Eigendeklaration des Herstellers. Es gibt also - im Gegensatz zum (Typ-)Genehmigungsverfahren im Automobilbereich - für elektrische Erzeugnisse, wozu auch die induktiven Ladestationen zählen, kein eigentliches Zulassungsverfahren. Das heisst: die Erfüllung aller regulatorischen Anforderungen und die Einhaltung der anwendbaren Normen wird vor Markeintritt nicht behördlich validiert: die Verantwortung für die Konformität des Produktes obliegt allein dem Hersteller. Aus diesem Grund werden hier auch nicht die Begriffe «Genehmigung» und «Zulassung» verwendet, man spricht von der «Erlangung der Markttauglichkeit».

3.1.1.1 Eigendeklaration

Der Hersteller oder Bevollmächtigte erklärt demzufolge selbst, dass sein Produkt den geltenden EU-Richtlinien und -Verordnungen sowie den entsprechenden schweizerischen Vorschriften entspricht. Dies geschieht einerseits durch die Anbringung der CE-Kennzeichnung auf dem Produkt und andererseits dem Ausstellen einer Konformitätserklärung («declaration of conformity» oder kurz DoC). Die CE-Kennzeichnung ist somit ein vom Hersteller selbstverantwortetes Zeichen der Konformität mit den europäischen resp. Schweizer Vorschriften.

In der Schweiz ist die Anbringung des CE-Kennzeichens auf dem Produkt zwar nicht verpflichtend, die technischen Anforderungen an das Produkt, das Konformitätsbewertungsverfahren und die Konformitätserklärung unterscheiden sich jedoch ansonsten kaum von jenen innerhalb der EU.

Je nach Erzeugnis und dessen Anwendung müssen unterschiedliche Anforderungen erfüllt werden. Welche Anforderungen auf ein spezifisches Erzeugnis anwendbar sind, ist Sache des Herstellers und muss anhand einer Risikoanalyse definiert und festgehalten werden.

Elektrische Betriebsmittel, wozu auch die induktive Ladestation zählt, müssen im Rahmen der Markteinführung eine Vielzahl von gesetzlichen und normativen Anforderungen erfüllen. Zu den wichtigsten Vorschriften gehören:

3.1.1.2 Elektrische Sicherheit

In der Schweiz definiert die «Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse» (NEV - 734.26) die grundlegenden Sicherheitsanforderungen an elektrische Erzeugnisse. Sie stützt sich dabei auf die Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU der europäischen Gemeinschaft. Zudem regelt die «Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen» (NIV - 734.27) die Installation und die Anbindung an das Stromnetz.



3.1.1.3 Elektromagnetische Verträglichkeit

Die «Verordnung über die elektromagnetische Verträglichkeit» (VEMV - 734.5) regelt in der Schweiz das Anbieten (Bereitstellung auf dem Markt) sowie die Inbetriebnahme und die Nutzung von Betriebsmitteln, welche elektromagnetische Störungen verursachen (oder deren Betrieb durch solche Störungen beeinträchtigt werden kann). In Europa sind die Anforderungen in der EMV-Richtlinie (2014/30/EU) definiert.

In der Schweiz, genau wie in der EU, wird für die technischen Details - wie Prüfumfang und -methodik, Anforderungen an Labors und Messgeräte sowie die einzuhaltenden Grenzwerte - auf international harmonisierte Normen verwiesen.

3.1.1.4 Stoffbeschränkungen in Elektro- und Elektronikgeräten

Die Stoffbeschränkungen in Elektro- und Elektronikgeräten in der Schweiz sind mit denjenigen der EU nach Richtlinie 2011/65/EU (RoHS2) weitestgehend identisch bezüglich Art der geregelten Schwermetalle und Flammschutzmittel sowie den betroffenen Gerätekategorien. Das heisst: Elektro- und Elektronikgeräte sowie deren Kabel und Ersatzteile dürfen nicht in Verkehr gebracht werden, wenn beispielsweise Quecksilber, Blei, Cadmium oder Chrom (VI), polybromierte Biphenyle (PBB) oder polybromierte Diphenylether (PBDE) sowie bestimmte Phthalate enthalten sind. Höchstkonzentrationswerte bis zu maximal 0,1 % werden toleriert, für Cadmium maximal 0,01 %.

3.1.1.5 Recyclingfähigkeit

Auch die Recyclingfähigkeit von elektrischen Betriebsmitteln ist ein wichtiges Thema im Hinblick auf die Produkte-Konformität. Die EU-Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (WEEE) legt Anforderungen an die Sammlung, Verwertung und Entsorgung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten fest. Diese Richtlinie soll die Recyclingquote von Altgeräten erhöhen und die Umweltbelastung durch diese Geräte reduzieren. In der Schweiz werden ähnliche Anforderungen durch die «Verordnung über die Rückgabe, die Rücknahme und die Entsorgung elektrischer und elektronischer Geräte» (VREG - 814.620) gestellt.

3.1.1.6 Besonderheiten bezüglich Zulassung von Prototypen

Gemäss Artikel 8 der «Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse» (NEV) muss der Hersteller respektive Importeur eine Konformitätserklärung vorlegen, um ein Produkt auf dem Markt bereitzustellen. Als «Marktbereitstellung» gilt dabei gemäss Artikel 2 der NEV respektive der Richtlinie 2014/35/EU «jede entgeltliche oder unentgeltliche Abgabe eines elektrischen Betriebsmittels». Die Richtlinie 2014/35/EU definiert in Anhang II Ausnahmen für Betriebsmittel, die nicht unter die Richtlinie fallen. Darunter ist auch:

«Kunden- und anwendungsspezifisch angefertigte Erprobungsmodule, die von Fachleuten ausschliesslich in Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen für ebensolche Zwecke verwendet werden».

Art. 13 der NEV schreibt für Erprobungsmodule vor, dass diese den anerkannten Regeln der Technik entsprechen müssen, wie sie in den international harmonisierten Normen der Internationalen elektrotechnischen Kommission (IEC), des Europäischen Komitees für elektrotechnische Normung (CENELEC) und - wo solche fehlen - schweizerische Normen festgelegt sind. Bestehen keine spezifischen technischen Normen, so sind sinngemäss anwendbare Normen oder allfällige technische Weisungen zu berücksichtigen.

Ob diese Ausnahme in Anhang II der 2014/35/EU bzw. Art. 13 der NEV auch für induktive Ladestationen gelten, wie sie im Rahmen dieses Projektes betrieben werden, ist eine komplexe Frage. Einerseits werden diese nicht ausschliesslich von Fachleuten bedient, andererseits sollen sie zugänglich und somit ausserhalb von Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen installiert und betrieben werden.

Für Prototypen im Rahmen von Forschungs- sowie Pilot- und Demonstrations-Projekten ist es jedoch gängige Praxis, Anlagen oder Geräte auch ohne Konformitätsnachweis bzw. CE-Kennzeichnung in Betrieb zu nehmen. Hierzu wird vom Hersteller des Systems sowie der Betreiberin eine ausführliche



Risikoanalyse erstellt, aus welcher die evaluierten Sicherheitsrisiken sowie die dagegen getroffenen Massnahmen hervorgehen. Auf Grundlage dieser Risikoanalyse kann die, für den Anschluss ans Netz zuständige Fachkraft, entscheiden, ob eine Installation und Inbetriebnahme des Systems oder der Komponenten verantwortbar ist oder nicht. Im Rahmen des vorliegenden Projektes erfolgt dies bei der Ladestation der Eniwa durch eigene Installationsfachleute und bei der Ladestation an der Empa durch den technischen Dienst der Empa. Die beiden Stellen kennen die anerkannten Regeln der Technik sehr gut und verfügen über die nötigen Qualifikationen und Fachausweise.

3.1.1.7 Fazit

Auch wenn die genannten Richtlinien eine Konformitätserklärung für die Bereitstellung auf dem Markt fordern, scheint der Betrieb des Prototypensystems im Rahmen dieses Projektes möglich zu sein. Die durchgeführten Risikoanalysen für die Standorte Eniwa und Empa (10.1 & 10.2) weisen darauf hin, dass das Risiko als gering eingestuft werden kann. Zudem wird das Personal entsprechend geschult und instruiert, wodurch die Anforderungen der Verordnung grundsätzlich erfüllt sein dürften. Damit wird gewährleistet, dass der Betrieb des Prototyps sicher und im Einklang mit den geltenden Vorgaben erfolgen kann. Es ist davon auszugehen, dass alle wesentlichen Voraussetzungen für einen ordnungsgemässen Betrieb erfüllt sind.

3.1.2 Zulassungsverfahren für Fahrzeuge

In der Schweiz und der europäischen Gemeinschaft unterliegen Fahrzeuge einem Genehmigungsverfahren. Dieses unterscheidet sich grundlegend von der Erlangung der Marktauglichkeit nicht automobilspezifischer Geräte: Während die meisten anderen Geräte der Hersteller-Eigendeklarationen unterstehen, müssen Fahrzeuge für den Strassenverkehr einem (Typ-)Genehmigungsverfahren unterzogen werden. Anschliessend können genehmigte Fahrzeuge für die Teilnahme am öffentlichen Strassenverkehr zugelassen werden. In diesem Zusammenhang ist es wichtig zu verstehen, dass es sich bei der Fahrzeuggenehmigung um das behördliche Validieren eines Prüfberichtes / Gutachtens einer anerkannten Prüfstelle (APS) respektive eines technischen Dienstes (TD) hinsichtlich der Konformität mit den gesetzlichen Anforderungen handelt. Die Zulassung hingegen bezeichnet einen Verwaltungsakt, bei dem einem vorgängig genehmigten Fahrzeug ein Halter, ein Kennzeichen sowie eine Versicherung zugeordnet wird: Die Zulassung bezeichnet demzufolge die amtliche Erlaubnis zur Teilnahme am öffentlichen Strassenverkehr.

Die Fahrzeuggenehmigung ist innerhalb der EU wie auch in der Schweiz weitestgehend harmonisiert, die Fahrzeugzulassung ist hingegen länderspezifisch respektive kantonal geregelt.

In der Schweiz liegt die Zulassungshoheit für Fahrzeuge bei den Kantonen, vertreten durch die Strassenverkehrsämter. Diese Ämter führen die Prüf- und Zulassungsverfahren für Fahrzeuge durch und stellen sicher, dass sie den geltenden Sicherheits- und Qualitätsstandards entsprechen.

Für die Zulassung eines Einzelfahrzeugs mit induktivem Ladesystem sind folgende Schritte nötig:

3.1.2.1 Befreiung/Änderung der Typgenehmigung

Fahrzeuge ohne Typgenehmigung, sowie typgeprüfte Fahrzeuge, welche umgebaut wurden, unterstehen der Einzelprüfung (Befreiung respektive Änderung der Typgenehmigung) beim zuständigen kantonalen Strassenverkehrsamt.

Dabei soll sichergestellt werden, dass auch nachträglich abgeänderte Fahrzeuge den Anforderungen der europäischen Typgenehmigungsverordnung (VO (EU) 2018/858) respektive der schweizerischen Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge (VTS – 741.41) entsprechen. Die umgebauten Fahrzeuge müssen grundsätzlich jenen Bestimmungen entsprechen, welche zur Zeit der Erstinverkehrsetzung gültig waren.

Als Nachweis für die Konformität der umgebauten Fahrzeuge, Baugruppen oder Systeme sind zur Prüfung beim Strassenverkehrsamt Prüfberichte anerkannter Prüfstellen beizulegen.



Für die Zulassung eines mit induktivem Ladesystems umgerüsteten Fahrzeugs sind demzufolge die nachfolgend aufgeführten Schritte notwendig:

3.1.2.2 Durchführung von EMV-Messungen

Gemäss den Vorschriften der Verordnung über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (VEMV) sind EMV-Messungen an einer anerkannten Prüfstelle durchzuführen. Diese Messungen dienen dem Nachweis, dass das induktive Ladesystem weder elektromagnetische Störungen verursacht noch selbst durch solche Störungen beeinflusst werden kann.

3.1.2.3 Prüfung der elektrischen Sicherheit

Die elektrische Sicherheit des Fahrzeugs muss gemäss «Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse» (NEV) überprüft werden. Die NEV legt die Anforderungen an die elektrische Sicherheit von Fahrzeugen fest. Die Einhaltung dieser Anforderungen muss von einer anerkannten Prüfstelle geprüft und mittels Konformitätsbewertung oder einem Prüfbericht bestätigt werden.

Für detaillierte Informationen zu den Anforderungen an die elektrische Sicherheit und der elektromagnetischen Verträglichkeit von Strassenfahrzeugen verweisen wir auf das Fact-Sheet «Erläuterungen zum Nachweis der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischen Verträglichkeit von Strassenfahrzeugen und deren Komponenten», bereitgestellt vom Bundesamt für Strassen (ASTRA), dem Bundesamt für Energie (BFE) sowie dem Bundesamt für Kommunikation (BAKOM).

3.1.2.4 Vorlage der Unterlagen beim Strassenverkehrsamt

Nach erfolgreicher Durchführung der EMV-Messungen und der Überprüfung der elektrischen Sicherheit müssen die Prüfberichte der anerkannten Prüfstellen beim Strassenverkehrsamt vorgelegt werden.

3.1.2.5 Abschliessende Inspektion und Zulassung

Das Strassenverkehrsamt wird die eingereichten Unterlagen prüfen und das Fahrzeug einer abschliessenden Inspektion unterziehen, um sicherzustellen, dass es den geltenden Vorschriften und Sicherheitsstandards entspricht. Da es sich bei der Installation des Fahrzeugempfängers (Vehicle Assembly) um eine mechanisch triviale Modifikation handelt, kann die Überprüfung der mechanischen Befestigung, der Fussgängerschutzvorrichtung und der minimalen Bodenfreiheit direkt bei dem Strassenverkehrsamt erfolgen.

Nach erfolgreicher Prüfung wird dem Fahrzeug die Zulassung erteilt und somit befähigt, am Strassenverkehr teilzunehmen.

3.1.2.6 Probleme des Genehmigungsverfahrens betreffend kabelloses Laden

Für die Einzelzulassung des umgerüsteten Fahrzeuges in der Schweiz sind also vor allem die Nachweise der elektrischen Sicherheit nach NEV sowie der elektromagnetischen Verträglichkeit nach VEMV von grosser Bedeutung. Der EMV-Nachweis stellt eine besondere Herausforderung dar, da die bestehenden Vorschriften, namentlich die UN-Regelung Nr. 10, das induktive Laden (noch) nicht abdecken. Auch die seit 12. Juni 2025 geltende Änderungsserie 07 definiert für kabelloses Laden keinen Betriebsmodus. Da aber das relevante EMV/EMF-Verhalten erst im gekoppelten System aus Fahrzeug und Infrastruktur entsteht, wäre es essenziell, dies am Fahrzeug zu prüfen. Dies führt zu einer regulatorischen Lücke, die es erschwert, die elektromagnetische Verträglichkeit für Fahrzeuge, die nachträglich mit einem induktiven Ladesystem ausgestattet wurden, zu homologieren. Die Prüfstelle hat zwar die Möglichkeit, alternative Normen heranzuziehen, hier sei vor allem die IEC 61980 erwähnt, welche sich explizit mit EMV und EMF von kabellosen Ladern befasst. Auf Seite der Ladeinfrastruktur (Produktrecht) ist die Nachweisführung damit grundsätzlich über etablierte Industrienormen weitgehend abgedeckt. Allerdings sind in dieser Normenreihe keine spezifischen EMF-Messungen am vervollständigten Fahrzeug vorgesehen. Zudem sind einige Messungen nach IEC 61980 am Fahrzeug aus praktischen Gründen nicht durchführbar, da beispielsweise die Zugänglichkeit zu Messstellen nicht gegeben ist.



Dies bedeutet, dass für eine solche Nachrüstung ein individueller Ansatz erforderlich ist, der sowohl die Sicherheit des Fahrzeugs als auch die Einhaltung der elektromagnetischen Vorschriften gewährleistet, darüber hinaus aber auch die spezifischen Herausforderungen für Messungen am vervollständigten Fahrzeug berücksichtigt. Welche Messungen nach welchen Standards für den konkreten Fall zusammen mit der Prüfstelle definiert wurden, zeigt der Absatz 4.2.

3.1.3 Homologation des Serienproduktes

Die Genehmigungsverfahren für Fahrzeuge mit kabellosen Ladesystemen als Serienprodukt weichen in einigen Punkten von den Verfahren für Prototypen ab, die in den vorherigen Abschnitten beschrieben wurden. Die Anforderungen an die Markttauglichkeit der Ladestationen bleiben jedoch unverändert (gem. Absatz 3.1.1), da für Prototypen ohnehin nur geringfügige Ausnahmen gemacht werden können. Diese Anforderungen sind aus Sicht der Ladeinfrastruktur als Produkt grundsätzlich durch Industrienormen abbildbar; die offene Frage betrifft primär die Fahrzeuggenehmigung des gekoppelten Systems.

Bei der Fahrzeuggenehmigung ist zwischen zwei Szenarien zu unterscheiden: Einerseits die Nachrüstung (Retrofit) von bereits typengenehmigten Fahrzeugen mit einem kabellosen Ladesystem und andererseits die Integration des Systems durch den Fahrzeughersteller (OEM).

3.1.3.1 OEM-Integration

Werden Fahrzeuge bereits am Werk vom Fahrzeughersteller mit induktiven Ladesystemen versehen, scheinen die Genehmigungsfragen klar definiert zu sein. Sämtliche technischen Anforderungen an die jeweilige Fahrzeugkategorie sind unabhängig vom Ladesystem einzuhalten. Aber auch hier macht es Sinn, die Anforderungen an die elektromagnetische Verträglichkeit und Felder etwas detaillierter auszuleuchten:

Die Verordnung (EU) 2018/858, auch bekannt als Rahmenverordnung, verweist für den Genehmigungsgegenstand D2, «Funkentstörung & elektromagnetische Verträglichkeit», auf die Verordnung (EU) 2019/2144, auch bekannt als «General Safety Regulation 2» respektive «GSR2». Die GSR2 wiederum verweist in Artikel 4, Ziffer 2 unter Bezug auf den einschlägigen Anhang auf die UN-Regelung Nr. 10. Allerdings wird in der UN-R10 induktives Laden nicht behandelt. Auch die seit 12. Juni 2025 geltende Änderungsserie 07 adressiert induktives Laden nicht explizit; entsprechende Themen werden vielmehr als Gegenstand künftiger Revisionen diskutiert (z.B. auf der Roadmap zur Revision 08 der UN-R10 (Prigent, 2024)).

Es ist zu erwarten, dass die UNECE und/oder die EU-Kommission mittelfristig Klarheit schaffen und entsprechende Anforderungen veröffentlichen werden. Solange bleibt aber unklar, ob eine Prüfung nach IEC 61980 für die Ladeinfrastruktur sowie nach UN-R10 ohne Aktivierung des kabellosen Ladens als Nachweis genügen, oder ob auch am Fahrzeug die für den Personenschutz relevante Messung zur Exposition von elektromagnetischen Wellen im relevanten Frequenzbereich eingefordert wird.

Die Autoren gehen nach aktuellem Wissensstand davon aus, dass der EMV- und EMF-Nachweis gemäss IEC 61980 zu erfolgen hat und demzufolge in der Regel an einem repräsentativen Systemaufbau (Mock-Up) mit gekoppeltem Betrieb von Ground- und Vehicle-Assembly und nicht zwingend am vollständig integrierten Fahrzeug gemessen wird. Zudem dürfte das Fahrzeug nach UN-R10 geprüft werden, dabei aber dürfte (der Regelung entsprechend) das induktive Laden im gekoppelten Betrieb mangels expliziter Adressierung in UN-R10 unberücksichtigt bleiben.

Gleichzeitig umfasst die IEC-61980-Normenreihe auch Mess- und Bewertungsansätze, die fahrzeugbezogene Randbedingungen und ggf. Messungen am vollständig integrierten Fahrzeug erfordern können. Damit stellt sich im Spannungsfeld zwischen Fahrzeuggenehmigung und Produkterecht die Abgrenzungsfrage, wer die Verantwortung für solche Nachweise trägt und wie sie im Einzelfall gegenüber Prüfstelle und Behörde zu verorten sind.

Unabhängig von der aktuell nicht in allen Punkten eindeutig geregelten Nachweisführung ist davon auszugehen, dass Technische Dienste in der Praxis entsprechende Prüfungen einfordern werden. Zudem liegt es im Interesse der Hersteller, nur konforme und sichere Produkte in Verkehr zu bringen und die



erforderlichen Nachweise deshalb auch dann zu erbringen, wenn diese regulatorisch nicht explizit verlangt werden.

3.1.3.2 Retro-Fit

Die Genehmigung der fahrzeugseitigen Installation als Retro-Fit unterscheidet sich nur unwesentlich von jener der Zulassung der Prototypen. Das heisst: für die Zulassung der Fahrzeuge ist der Nachweis der elektrischen Sicherheit und elektromagnetischen Verträglichkeit zu erbringen.

Die Prüfstellen müssen dabei jedoch nicht zwingend jedes einzelne Fahrzeug separat messen und bewerten. Stattdessen können sie für identische Fahrzeugtypen eine Erklärung ausstellen, indem sie sich auf den Prüfbericht eines bereits geprüften Fahrzeugs beziehen. Eine alternative Möglichkeit besteht darin, eine Konformitätsbewertung für einen bestimmten Fahrzeugtyp oder sogar für eine gesamte Modellreihe zu erstellen. Voraussetzung dafür ist, dass der Hersteller respektive Umrüster des Ladesystems einen Nachweis über die Übereinstimmung der Produktion erbringen und der Prüfstelle anhand von Fahrzeug-Typgenehmigungsdokumenten glaubhaft machen kann, dass die Fahrzeuge in allen relevanten Punkten baugleich sind.

3.1.4 Normative und gesetzliche Anforderungen im Überblick

Die in den vorherigen Abschnitten aufgeführten Schweizer Verordnungen verweisen zum Teil auf im Bundesblatt veröffentlichte Normen, in anderen Fällen auf sogenannte «anerkannte Regeln der Technik». Als anerkannte Regeln der Technik werden wiederum international harmonisierte Normen angesehen. Im EU-Produktrecht ist dies, mit Ausnahme des Typgenehmigungsverfahrens für Kraftfahrzeuge, ähnlich gelöst. Im Rechtsrahmen für die Fahrzeuggenehmigung sind die anzuwendenden Normen in den meisten Fällen direkt benannt. Dies kann zur Folge haben, dass eine ältere Normfassung weiter Gültigkeit behält, namentlich dann, wenn in den jeweiligen Artikeln eine Normfassung samt Ausgabedatum aufgeführt ist (statische Rechtsübernahme). Fehlt das Datum, wird auch hier eine neue Fassung einer Norm automatisch übernommen (dynamische Rechtsübernahme).

Neben den in den folgenden Abschnitten beschriebenen Kernnormen können – insbesondere für EMV-Emissionen und EMF-Exposition – weitere Normen und Referenzdokumente relevant werden, namentlich CISPR-11, CISPR-25, IEC 62311 sowie die ICNIRP-Leitlinien.

Welche davon im konkreten Fall einzuhalten sind, hängt unter anderem von der konkreten Systemauslegung und Ausstattung (z.B. LOD, FOD, Kommunikationsschnittstellen wie WLAN/Bluetooth, zusätzliche Steuer- und Leistungselektronik) ab und ist durch den Hersteller im Rahmen der Konformitäts- und Sicherheitsbewertung festzulegen.

3.1.4.1 IEC-, SAE- und ISO-Normen

Im Bereich der kabellosen Energieübertragung für Elektrofahrzeuge sind die wichtigsten und weltweit anerkannten Normen SAE J2954 (SAE = Society of Automotive Engineers), IEC-61980 (IEC = International Electrotechnical Commission) sowie die ISO 19363 (ISO = International Organization for Standardization). Diese Organisationen haben zudem untereinander Vereinbarungen getroffen, um die Standardisierung von Fahrzeuganwendungen zu harmonisieren. Während die SAE J2954 einen systemweiten Standard für das kabellose Laden von Elektrofahrzeugen bereitstellt, befasst sich IEC 61980 mit der netzseitigen Ausrüstung, die ISO 19363 wiederum behandelt die fahrzeugseitigen Anforderungen. So arbeiten diese Normen zusammen, um eine globale Interoperabilität von induktiven Ladesystemen zu ermöglichen.

Ergänzend können für Störaussendungen u.a. CISPR-11 (ISM-/Leistungselektronik-Emissionen) und CISPR-25 (Fahrzeug-/Komponenten-Emissionen) sowie für die Bewertung der EMF-Personenexposition IEC 62311 in Verbindung mit den ICNIRP-Leitlinien relevant werden.

CISPR-25 enthält dabei auch Anforderungen und Prüfmethoden auf Gesamtfahrzeugebene, zielt jedoch primär auf die Sicherstellung einer störungsfreien Funktion von Empfängern bzw. Fahrzeugkomponenten (EMV) ab und nicht auf den Personenschutz.

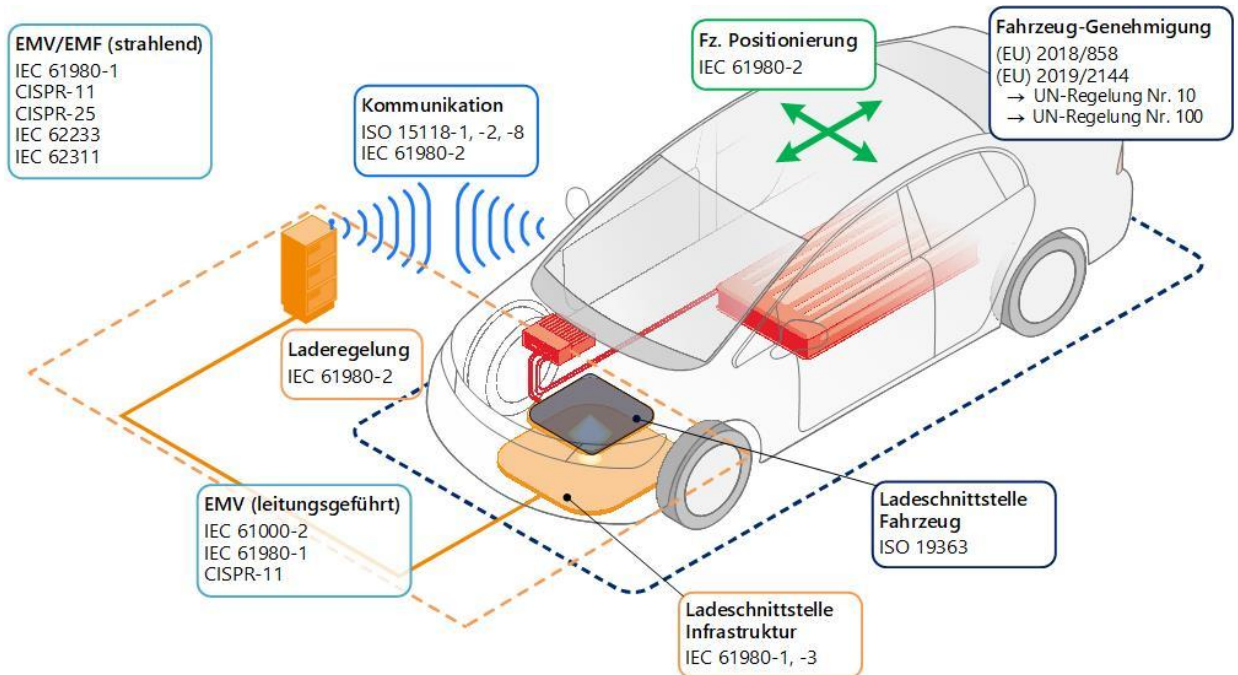


Abbildung 7: Wichtige Anforderungen im Bezug zu kabellosem Laden (Quelle: eigene Grafik)

3.1.4.2 Geräteklassen

Die IEC 61980 unterscheidet bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit zwei Klassen an Geräten:

1. Klasse A

Für den Gebrauch an allen Standorten ausser denen, die sich im Wohnumfeld befinden oder an ein Niederspannungsnetz angeschlossen werden, welches für Wohnzwecke genutzte Gebäude versorgt.

2. Klasse B

Anwendung in Wohnumgebungen.

Das heisst: Geräte, die in industriellen Umgebungen mit höherer elektromagnetischer Strahlung eingesetzt werden, müssen toleranter sein, dürfen aber auch selbst mehr Strahlung abgeben. Diese Geräte werden als Klasse-A-Geräte bezeichnet. Im Gegensatz dazu sind Geräte der Klasse B für den Einsatz in Wohnräumen und -quartieren mit geringerer Strahlung ausgelegt. Sind am gleichen Transformator beide Nutzungsarten betroffen, so gilt die jeweils strengere Vorgabe.

Für die Markteinführung eines induktiven Ladesystems müssen demzufolge mindestens die Grenzwerte der Klasse A für die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) eingehalten werden. Um es jedoch auch in Wohnquartieren installieren zu dürfen, müssen die strengeren Grenzwerte der Klasse B erfüllt werden.

Unabhängig von dieser Einteilung kann es – je nach Funktionsumfang des Systems (z.B. zusätzliche Funkmodule, Sensorik für LOD/FOD, Steuer- und Leistungselektronik) – erforderlich sein, weitere einschlägige EMV- bzw. EMF-Nachweise nach den jeweils anwendbaren Normen (u.a. EN 300330, CISPR-11, CISPR-25, IEC 62311/ICNIRP) zu erbringen.



3.1.4.3 UN-Regelungen

UN-Regelungen werden von der «Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen» (UNECE) respektive deren Arbeitsgruppe «Weltforum für die Harmonisierung der Regelungen für Fahrzeuge» (WP.29) erarbeitet. Sie regeln technische Anforderungen an die Sicherheit und Umweltverträglichkeit von Fahrzeugen und Fahrzeugteilen. Die UNECE verfügt jedoch nicht über eine Rechtsetzungskompetenz. Das bedeutet, dass die Vertragsparteien - wozu auch die EU und die Schweiz zählen - die UN-Regelungen in nationales Recht überführen müssen, bevor sie in den jeweiligen Ländern verbindlich werden.

Im Gegensatz zu den Typpergenehmigungsvorschriften der EU (Whole Vehicle Type-Approval - WVTA) sind UN-Regelungen aber international (quasi weltweit) anerkannt. Zudem verweist in vielen Fällen das EU-Recht direkt auf UN-Regelungen oder sie definiert identische Anforderungen in eigenen Rechtsakten. Der Einfachheit halber werden im Rahmen dieses Berichtes deshalb jeweils die UN-Regelungen erwähnt.

Für Fragestellungen der elektromagnetischen Verträglichkeit im Fahrzeugumfeld können dabei ergänzend zu UN-Regelungen weiterhin Normen wie CISPR-25 relevant sein, sofern sie im jeweiligen Konformitäts- und Nachweiskonzept herangezogen werden. Solche ergänzende Nachweise werden jedoch – insbesondere in Bezug auf induktives Laden im gekoppelten Betrieb – durch die UN-Regelung Nr. 10 nicht eindeutig und explizit eingefordert, da kabelloses Laden dort (bislang) nicht spezifisch adressiert wird.

3.1.4.4 Fazit Genehmigungsverfahren

Induktives Laden durchbricht die bisher klare Aufgabenteilung zwischen Fahrzeuggenehmigung (Fahrzeugrecht/WVTA) und Produkterecht (Ladeinfrastruktur): Relevante EMV/EMF-Eigenschaften entstehen erst im gekoppelten Zustand des Gesamtsystems, bestehend aus Fahrzeug und Ladeinfrastruktur. Genau diese systembezogenen Effekte im kHz-Bereich sind für den Personenschutz zentral und werden gleichzeitig massgeblich durch fahrzeugseitige Randbedingungen (z.B. Abschirmung, Geometrie, Karosseriematerial, Ausrichtung/Abstand) beeinflusst. Während auf Infrastrukturseite mit IEC 61980 und verwandten Normen grundsätzlich geeignete Nachweiswege existieren, bleibt auf Ebene der Fahrzeuggenehmigung unklar, welche Systemprüfungen verbindlich gefordert sind und wie sie dem Fahrzeug bzw. der Infrastruktur rechtlich zugeordnet werden. Damit stellt sich die Kernfrage, ob das System als Einheit oder entlang einzelner Komponenten beurteilt wird – diese Unschärfe bildet eine regulatorische Lücke.

Abbildung 8 stellt diese regulatorische Einordnung entlang der Trennlinie Fahrzeugrecht (WVTA) vs. Produkterecht/CE schematisch dar. Die Zuordnung von AC- und DC-Laden ist ausschliesslich beispielhaft und dient der Illustration der klassischen Trennlinie; sie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit und ist nicht als rechtliche Auslegung zu verstehen. Sie veranschaulicht aber: Bei WPT entsteht das relevante EMV/EMF-Verhalten im gekoppelten Gesamtsystem aus Fahrzeug und Infrastruktur, wodurch eine unklare Abgrenzung zwischen den Regulierungsbereichen sichtbar wird.

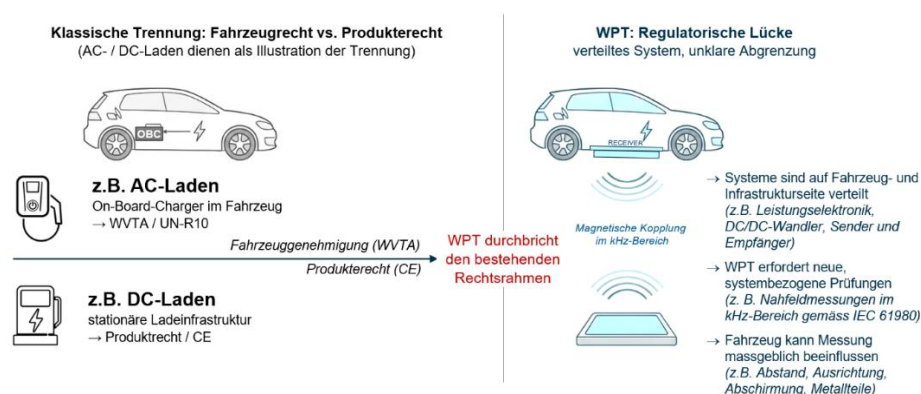


Abbildung 8: Schematische Darstellung der regulatorischen Einordnung von Ladesystemen



3.2 User-Experience

3.2.1 Literaturanalyse und Forschungsfragen

Die existierende Forschungsliteratur zu induktivem Laden von Personenwagen fokussiert sich hauptsächlich auf hypothetische Optimierungsstudien, wie optimale Anordnung von Parkplätzen (Dandl, Niels, & Bogenberger, 2020), Ableitung des Standorts induktiver Ladeeinrichtungen (Kumar, Ngô, & Mishra, 2020), optimales Design der Induktionsplatte (Ahmad, Alam, & Mohamed, 2019), oder technische Reviews (Mohammed & Jung, 2021). Studien zur Nutzerakzeptanz sind hingegen rar und meistens nicht mehr aktuell (Fett, Ensslen, Jochem, & Fichtner, 2018); (Frenzel, Jarass, Trommer, & Lenz, 2015). Während Pilotprojekte für E-Taxis umgesetzt und getestet wurden (Waluga, 2023), gibt es, gemäss momentanem Kenntnisstand, keine aktuelle Forschung zur Nutzerakzeptanz von induktivem Laden für E-Carsharing.

Gerade in Hinsicht auf den wachsenden E-Carsharing Markt und den Vorteilen von induktivem Laden, wie beispielsweise eine einfachere Handhabung für die Kunden, ist es wichtig zu verstehen, inwiefern induktives Laden die Akzeptanz und Nutzung von E-Carsharing erhöhen kann. Da E-Carsharing-Nutzern, die selbst keine E-Autos besitzen, die Möglichkeit gegeben wird, erste Erfahrungen mit der Elektromobilität zu sammeln, kann eine positive Erfahrung mit E-Carsharing grundsätzlich dazu beitragen, den Wandel zur Elektrifizierung der Personenwagenflotte voranzutreiben (Schlüter & Weyer, 2019).

Die Akzeptanz von neuen Technologien wird häufig anhand dem Technology Acceptance Model (TAM) oder der Theorie des geplanten Verhaltens (TPB) untersucht. Dabei werden spezifische Faktoren untersucht, die die Einstellung und Bereitschaft der Nutzenden zur Technologieakzeptanz beeinflussen. Beide Modelle gehören zu den etablierten theoretischen Rahmenwerken der Sozial- und Verhaltenswissenschaften und werden häufig in der Forschung zu technologischem Wandel und Innovation eingesetzt.

Beim TAM, das von (Davis, 1989) entwickelt wurde, ist der Kerngedanke, dass die Akzeptanz einer neuen Technologie vor allem durch zwei Hauptfaktoren bestimmt wird, dem wahrgenommenen Nutzen und der wahrgenommenen Nutzerfreundlichkeit: (i) Perceived Usefulness: Der wahrgenommene Nutzen bezieht sich darauf, inwieweit eine Person glaubt, dass die Nutzung der neuen Technologie die Effizienz oder Erreichung von persönlichen Zielen verbessert oder erleichtert. Je nützlicher die Technologie wahrgenommen wird, desto höher ist die Wahrscheinlichkeit, dass sie akzeptiert wird. (ii) Perceived Ease of Use: Die wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit beschreibt, wie einfach oder mühelos die Technologie zu nutzen ist. Wenn die Technologie als benutzerfreundlich wahrgenommen wird, steigt die Bereitschaft zur Nutzung.

Die Theorie des geplanten Verhaltens (TPB) wurde von (Ajzen, 1991) entwickelt und zielt darauf ab, die Verhaltensintention von Personen basierend auf drei Faktoren vorherzusagen: (i) Attitude toward the Behavior: Die Einstellung gegenüber der Nutzung der Technologie basiert darauf, ob die Person die Nutzung der Technologie als positiv oder negativ für sich wahrnimmt. (ii) Subjective Norm: Die subjektive Norm bezieht sich auf den sozialen Druck oder die sozialen Erwartungen im Umfeld der Person. Wenn das Umfeld die Technologie unterstützt und zur Nutzung ermutigt, steigt die Wahrscheinlichkeit, dass die Person die Technologie akzeptiert. (iii) Perceived Behavioral Control: Die wahrgenommene Verhaltenskontrolle beschreibt das Ausmass, in dem die Person das Gefühl hat, die Technologie effektiv nutzen zu können, was unter anderem durch Zugang, Wissen und Fähigkeiten beeinflusst wird.

Auf Grundlage des Technology Acceptance Models (TAM) und der Theorie des geplanten Verhaltens (TPB) wurde eine systematische Literaturanalyse zum Thema Nutzererfahrung beim induktiven Laden durchgeführt. Basierend auf der Arbeit von Majhi (2024) wurden dabei folgende fünf zentrale Einflussfaktoren berücksichtigt: (i) wahrgenommene Bedenken (perceived concerns), (ii) wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit (perceived ease of use), (iii) wahrgenommener Nutzen (perceived usefulness), (iv) Umweltbewusstsein (environmental awareness) sowie (v) technologische Aufgeschlossenheit (technological openness).



Die identifizierten Arbeiten wurden anschliessend bezüglich verwendeter Modelle und Theorien, angewandter Methodik, Kernergebnisse bezüglich den Einflussfaktoren, sowie weiteren Untersuchungscharakteristika (z.B. verwendete Item/Konstrukte) durchsucht. Die Informationen sind in Tabelle 2 festgehalten.

Tabelle 2: Literaturübersicht zu User-Experience

| Referenzen | Modellierungsansätze | Datentyp und Häufigkeit | Regionen | Ladetechnologie | Wahrgenommene Bedenken | Umweltbewusstsein | Benutzerfreundlichkeit | Wahrgenommener Nutzen | Technologische Offenheit |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-------------|---------------------|------------------------|-------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|
| Fett et al. (2018) | SEM | Umfrage, n=266 | Deutschland | Kabelloses Laden | (-) | (-) | (+) | (+) | (x) |
| Konstantinou & Gkritza (2021) | Bivariate Ordnungsmodell | Strukturiertes Interview, n=4 | USA | Kabelloses Laden | (-) | (+) | | | (+) |
| Will & Schuller (2016) | SEM | Umfrage, n=214 | Deutschland | Intelligentes Laden | (0) | (0) | (0) | (0) | (0) |
| Schmalfluss et al. (2015) | Deskriptive Analyse | Interview, n=10 | Deutschland | Intelligentes Laden | (0) | | (+) | (+) | |
| Axsen et al. (2015) | Latentes Modell | Umfrage, n=1754 | Kanada | Plug-in-Laden | (x) | (x) | (x) | (x) | |
| Bailey and Axsen (2015) | MNL- und LC-Modell | Umfrage n=1470 | Kanada | Intelligentes Laden | (x) | (+) | (x) | (+) | (x) |
| Nienhueser and Qiu (2016) | Mixed Logit Modell | Umfrage, n=181 | USA | Plug-in-Laden | (+) | (+) | | | |
| Wang et al. (2022) | SEM | Umfrage, n=426 | China | Plug-in-Laden | (-) | (+) | (x) | (+) | (x) |
| Deumlich et al. (2022) | TAM | Umfrage, n=488 | Deutschland | Plug-in-Laden | (+) | (+) | (+) | (+) | (+) |
| Majhi (2024) | SEM | Umfrage, n=1150 | Neuseeland | Kabelloses Laden | (-) | (+) | (+) | (+) | (+) |
| Delmonte et al. (2020) | Qualitative Studie | Interview, n=60 | UK | Intelligentes Laden | (-) | (+) | (+) | (x) | (x) |
| Gutjar et al (2023) | Discrete choice experimente | Experiment, n=450 | Deutschland | Intelligentes Laden | (x) | (+) | (x) | (x) | (x) |

Hinweis: Bedeutung der Symbole (+) = Positive Auswirkung; (0) = Keine Auswirkung; (-) = Negative Auswirkung; (x) = Untersuchte Faktoren unzureichend; Zielvariable: Akzeptanz



In Kombination liefern TAM und TPB einen umfassenden Einblick in die psychologischen, sozialen und technischen Faktoren, die zur Akzeptanz oder Ablehnung neuer Technologien führen. Trotz einzelner ambivalenter Befunde zeigt sich insgesamt ein konsistentes Muster in der bisherigen Forschungsliteratur. Wahrgenommene Bedenken wirken sich häufig negativ auf die Akzeptanz aus, während Umweltbewusstsein, Benutzerfreundlichkeit, wahrgenommener Nutzen und technologische Aufgeschlossenheit tendenziell positive Effekte auf die Akzeptanz ausüben. Die meisten der bisherigen Studien beruhen jedoch auf Erhebungen von berichteten Präferenzen meist ohne Nutzungserfahrung mit E-Carsharing und/oder induktiven Laden.

Das Arbeitspaket User Experience setzte sich daher das Ziel, die Akzeptanz von induktivem Laden anhand heutigen Nutzenden von E-Carsharing und ihre effektive Erfahrung mit induktivem Laden zu erheben. Basierend auf den Erkenntnissen des Literaturreviews und den entscheidungstheoretischen Grundlagen wurden folgende Forschungsfragen adressiert:

1. Welche Faktoren beeinflussen die Akzeptanz von induktivem Laden bei E-Carsharing Nutzenden?
2. Wie beeinflusst die Erfahrung mit induktivem Laden die Einstellung gegenüber der Technologie?
3. Erhöht eine positive Akzeptanz von und Erfahrung mit induktivem Laden die Offenheit induktives Laden bei E-Carsharing zu nutzen?

3.2.2 Methodik

Die User Experience des induktiven Ladens im Kontext von E-Carsharing wurde in Zusammenarbeit mit Swiss E-Car untersucht, welche an einem ihrer Standorte ein Fahrzeug mit dazugehöriger induktiver Ladestation ausstattete, das exklusiv einer Testgruppe im Einzugsgebiet der Ladestation zur Verfügung gestellt wurde. Zur Beantwortung der Forschungsfragen wurden zwei komplementäre Online-Befragungen durchgeführt: eine Baseline-Erhebung vor der Einführung der induktiven Ladeinfrastruktur und eine Endline-Erhebung nach deren Nutzung. Beide Erhebungen richteten sich an Nutzende des Swiss E-Car-Sharing-Angebots.

Die Baseline-Umfrage umfasste sowohl die Test- als auch die Kontrollgruppe. Die Kontrollgruppe bestand aus Personen, die den E-Carsharing-Service nutzen, jedoch keinen Zugang zur induktiven Ladetechnologie hatten. Die Endline-Erhebung schloss ausschliesslich Personen ein, die während der Testphase Fahrzeuge und Ladestationen mit induktiver Ladefunktion genutzt hatten.

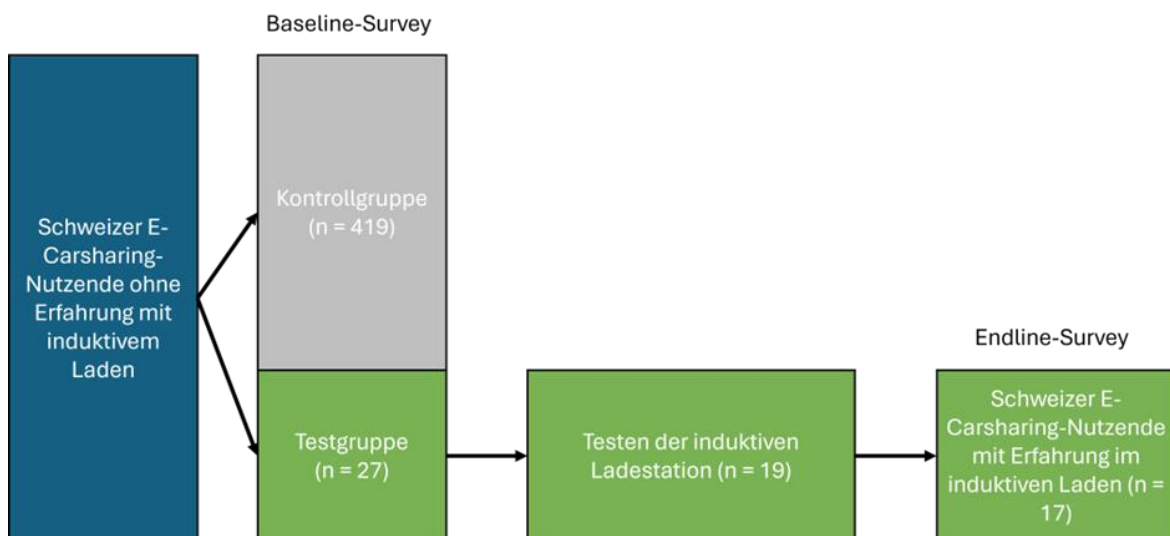


Abbildung 9: Übersicht zum Forschungsdesign der User-Experience



3.2.2.1 Baseline- und Endline-Umfrage

Die Baseline-Erhebung diente der Erfassung des Ausgangszustands vor Einführung der induktiven Ladetechnologie und wurde sowohl mit der Kontroll- wie auch der Testgruppe durchgeführt. Diese Erhebung bildete die Grundlage für spätere Vorher-Nachher-Vergleiche. Die Endline-Erhebung wurde nach der Testphase des induktiven Ladesystems durchgeführt und umfasste alle Personen, welche induktives Laden testen konnten. Um individuelle Vorher-Nachher-Vergleiche zu ermöglichen, wurde mit einer persönlichen anonymisierten ID im Fragebogen gearbeitet.

Der Endline-Fragebogen enthielt dieselben Konstrukte wie die Baseline-Erhebung, mit einigen Ausnahmen. Tabelle 3 zeigt die folgenden thematischen Module und Fragen der beiden Umfragen.

Tabelle 3: Baseline- und Endline-Umfrage

| Modul | Fragen | Baseline-Umfrage | Endline-Umfrage |
|--|--|------------------|-----------------|
| Einführung | Einführung in Ziel und Ablauf der Studie | x | x |
| | Nutzungszwecke und Nutzungshäufigkeit des E-Car-sharing-Angebots | x | |
| TAM & TPB | Wahrgenommene soziale Normen in Bezug auf kabelloses Laden | x | x |
| | Wahrgenommener Nutzen induktiver Ladesysteme | x | x |
| | Wahrgenommene Bedenken gegenüber induktivem Laden | x | x |
| | Wahrgenommene Benutzerfreundlichkeit von induktivem Laden | x | x |
| | Einstellungen zu Elektromobilität und verschiedenen Ladeformen (kabelgebunden und induktiv) | x | x |
| Kauf,- Nutzungs- und Zahlungsintentionen | Nutzungsintention für induktives Laden | x | x |
| | Nutzungsintention für E-Carsharing | x | x |
| | Kaufintention für ein Elektroauto | x | x |
| | Zahlungsbereitschaft für eigene Ladestation | x | x |
| | Zahlungsbereitschaft induktives E-Carsharing | x | x |
| | Zahlungsbereitschaft induktives E-Carsharing | x | x |
| Testerfahrungen | Zufriedenheit mit dem induktiven Laden | | x |
| | Wahrgenommene Einfachheit der Nutzung | | x |
| | Gefühl von Sicherheit beim induktiven Laden | | x |
| | Vergleich zum kabelgebundenen Laden | | x |
| | Veränderung der Einstellung gegenüber induktivem Laden nach der Testphase | | x |
| Werte, Soziodemographie und Mobilitätsfragen | Persönliche Werte bzw. technologische Aufgeschlossenheit | x | |
| | Soziodemographische Merkmale (Geschlecht, Alter, Bildungsniveau, Haushaltgrösse, Haushaltseinkommen) | x | |
| | Fahrzeugbesitz | x | |
| | Besitz von ÖV-Abonnements (GA, Halbtax, Verbundabo oder kein ÖV Abo) | x | |



3.2.2.2 Statistisch Analysen

Für die Auswertung der erhobenen Daten wurden folgende statistische Verfahren eingesetzt. Für die Kontrollgruppe erfolgten zunächst deskriptive Analysen zur Charakterisierung der Stichprobe und zur Beschreibung zentraler Variablen. Anschliessend wurde mithilfe eines Strukturgleichungsmodells (SEM) geprüft, wie die theoretischen Konstrukte miteinander zusammenhängen.

Für die Testgruppe wurde zusätzlich ein Vorher-Nachher-Vergleich durchgeführt, um Veränderungen in Einstellungen, wahrgenommenem Nutzen, Bedenken und Nutzungsintentionen im Zusammenhang mit dem induktiven Laden zu untersuchen. Aufgrund der geringen Fallzahl in der Testgruppe ($n = 17$) beschränkten sich die Auswertungen jedoch auf deskriptive Darstellungen, da für inferenzstatistische Tests die Anzahl Rückmeldungen nicht ausreichend war.

Die Testgruppe umfasste ursprünglich 19 Personen, die das induktive Laden mit dem E-Carsharing-Fahrzeug ausprobierten. 17 von ihnen füllten anschliessend die Umfrage aus. Alle Teilnehmenden nutzten das Fahrzeug mindestens zweimal. Die geringe Gruppengrösse lässt sich durch mehrere Faktoren erklären. Zum einen stand für den Test lediglich ein einziger Swiss-E-Car-Standort mit entsprechender Ladestation zur Verfügung, wodurch nur wenige Kundinnen und Kunden im relevanten Radius für die Teilnahme infrage kamen. Zudem zeigt Abbildung 70, dass ein grosser Teil der Carsharing-Mitglieder das Angebot generell nur selten nutzt, sodass insgesamt nur wenige Personen Interesse hatten, die induktive Ladestation tatsächlich zu testen.



4 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

4.1 Fahrzeugumbau am Beispiel des ersten Fahrzeug-Prototyps (Eniwa)

Das umzurüstende Fahrzeug, ein VW ID.5, wurde bereits im Vorfeld für das Projekt erworben, neugestaltet und in Buchs stationiert. Neben den Logos der Projektpartner wurde der Slogan «Induktives Laden – kabellos voller Energie» angebracht, um auf die innovative Technologie aufmerksam zu machen.

Für die technische Umrüstung arbeitete die ABT e-Line GmbH eng mit WiTricity zusammen. Ein Mitarbeiter von WiTricity reiste nach Deutschland, um den Prozess vor Ort zu unterstützen und um das enge Zeitfenster einzuhalten. Gleichzeitig stellte WiTricity ein eigenes, baugleiches Fahrzeug für den Umbau bei ABT bereit. Dieses Fahrzeug dient dazu, in ihrem eigenen Labor parallel Analysen durchzuführen und die Funktion des Ladesystems zu prüfen. Der Transport beider Fahrzeuge zwischen Mägenwil in der Schweiz und Kempten in Deutschland organisierte ABT. Dabei wurde ein Zollverfahren der aktiven Veredelung angewendet. Eniwa wurde bei der Abwicklung der Zollformalitäten von der TISA Expeditions AG unterstützt.

Die Umrüstung der beiden VW ID.5 (Eniwa & WiTricity) umfasst die Integration des induktiven Ladesystems, einschliesslich notwendiger Anpassungen der elektrischen Systeme. Nach Abschluss der Arbeiten wurden die Fahrzeuge nach Mägenwil zurücktransportiert und weiteren Tests unterzogen, bevor sie in den Pilotbetrieb überführt wurden.

4.1.1 Bericht Umbauarbeiten ABT eLine GmbH

Die Firma ABT eLine GmbH wurde beauftragt, ein induktives Ladesystem des Herstellers WiTricity in ein bestehendes batterieelektrisches Fahrzeug vom Typ VW ID. 5 zu integrieren. Im Folgenden sind neben der Beschreibung des Systems die einzelnen Schritte des Umbaus dargestellt und beschrieben.

4.1.1.1 Anlagenbeschrieb

Das induktive Ladesystem besteht einerseits aus einer Wallbox mit einer Bodeneinheit (Ground Assembly) und andererseits aus einer Fahrzeugeinheit (Vehicle Assembly - VA), die im Unterboden des Fahrzeugs montiert wird.

Darüber hinaus sind weitere Komponenten wie Relais, Sicherungen, Steuergeräte, ein Display sowie die entsprechenden Kabelbäume Bestandteil des Integrationskits, das von der Firma ABT e-Line GmbH entwickelt und im VW ID. 5 verbaut wurde.

Der schematische Aufbau ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Verbindungen in Orange sind Hochvoltverbindungen des batterieelektrischen Fahrzeugs (Spannung ca. 400V DC). Die lilafarbenen Verbindungen zeigen schematisch Steuer- und Versorgungsleitungen innerhalb des Fahrzeugs.

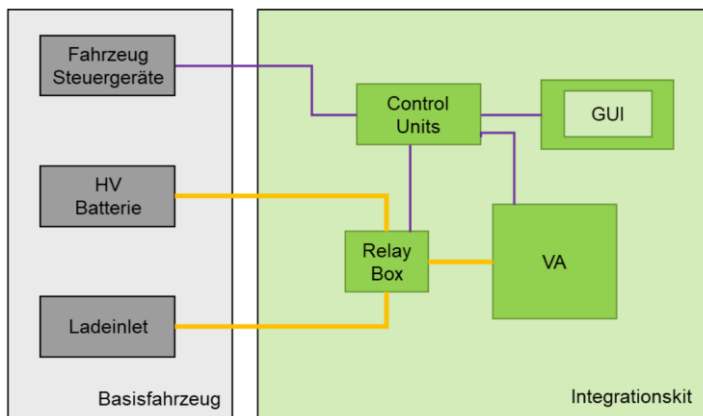


Abbildung 10: Schematischer Aufbau Fahrzeugintegration

Im Fahrzeug sind die Komponenten des Integrationskits auf verschiedene Stellen verteilt. So sind die Fahrzeugeinheit und die Relais im Unterboden im Bereich hinter der Vorderachse installiert; weiterhin wurden die Steuergeräte hinter der Seitenverkleidung im Kofferraum platziert. Sicherungsabgänge zur Spannungsversorgung (12V) der elektronischen Komponenten befinden sich im Motorraum, wohingegen das Display im Innenraum des Fahrzeugs im Bereich der Mittelkonsole angebracht ist.

Da die Fahrzeugeinheit im Ladebetrieb aktiv gekühlt werden muss, wird sie in Kühlkreislauf des Fahrzeuges integriert.

4.1.1.2 Dokumentation der Fahrzeugintegration

Um das Integrationskit zu installieren, müssen diverse Verkleidungen und Abdeckungen demontiert werden. So ist in Abbildung 11 beispielhaft die Demontage der Unterbodenabdeckung an der Fahrzeugfront im Installationsbereich der Fahrzeugeinheit dargestellt.

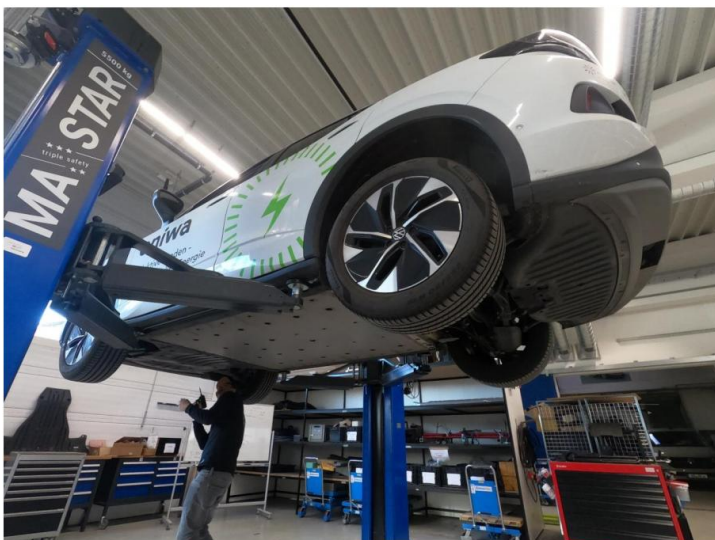


Abbildung 11: Demontage Unterbodenabdeckung vorne

4.1.1.3 Mechanische Arbeiten

Vor Montage im Fahrzeug werden verschiedene Baugruppen bereits vormontiert. Dazu wird die Relaisbox, die die Hochvoltanbindung der Fahrzeugeinheit an das Basisfahrzeug übernimmt, entsprechend verdrahtet. Neben Hochvoltverbindungen sind ebenfalls Steuerleitungen innerhalb der Relaisbox vorhanden, die über einen abgedichteten Automotive-Stecker nach aussen geführt werden. Die gesamte



Relaisbox wird entsprechend abgedichtet, da sich diese im Nassbereich des Fahrzeugs befindet. Der Innenaufbau der vormontierten Relaisbox ist in Abbildung 12 dargestellt.

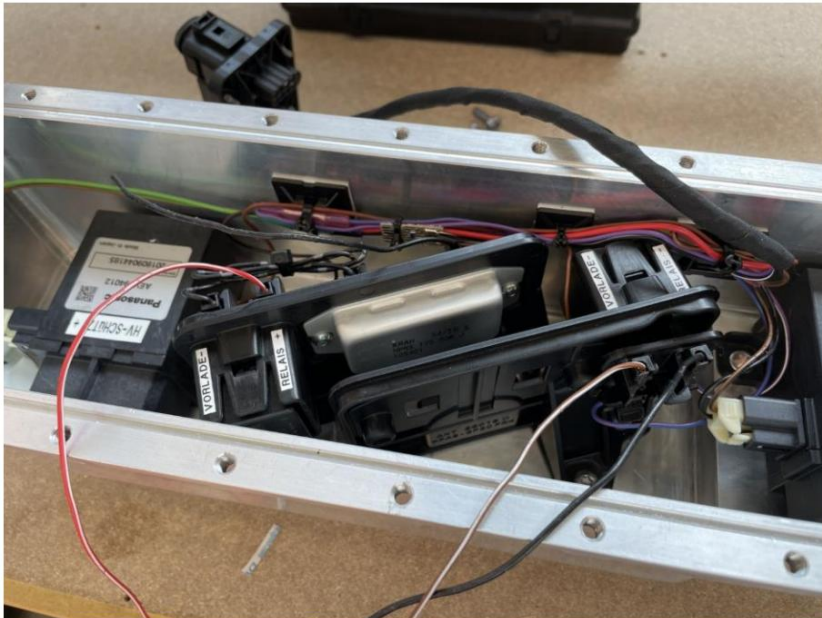


Abbildung 12: Innenaufbau der vormontierten Relaisbox

Im nächsten Schritt wird der Montagerahmen für den Einbau der Fahrzeugeinheit sowie der Relaisbox vorbereitet. Der vormontierte Aufbau ist in Abbildung 13 dargestellt.

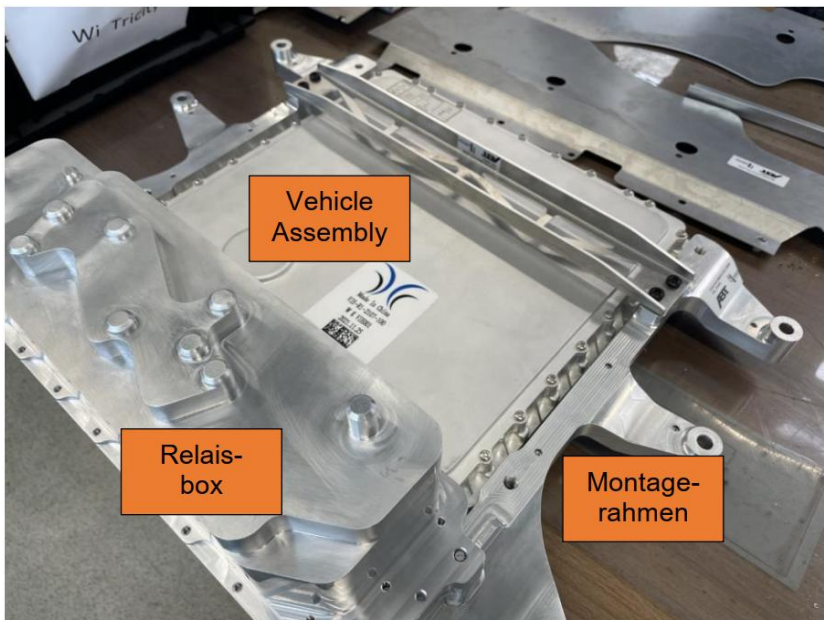


Abbildung 13: Vehicle Assembly inkl. Montagerahmen und Relaisbox

Der vorbereitete Fahrzeugunterboden ist in Abbildung 14 zu sehen. In Abbildung 15 sieht man den bereits installierten Montagerahmen sowie die Relaisbox und die vorbereiteten Kühlschläuche für die Integration der Fahrzeugeinheit in das bestehende Fahrzeugkühlsystem. Das final montierte Unterbodensystem mit Relaisbox, Fahrzeugeinheit (Vehicle Assembly) ist in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 14: vorbereiteter Unterboden vor der Montage der Fahrzeugeinheit (Vehicle Assembly)



Abbildung 15: Unterboden mit installiertem Montagerahmen und vorbereiteten Kühlschläuchen



Abbildung 16: Fertig installierter Unterboden inkl. Schirmbleche

4.1.1.4 Elektrische Arbeiten

Zur Regelung des Gesamtsystems werden mehrere Steuergeräte eingesetzt. Diese dienen u.a. zur Initialisierung, Überwachung sowie Beendigung des Ladevorgangs und darüber hinaus zur Visualisierung des Systemzustands.

Abbildung 17 zeigt die Steuereinheit «Ladekommunikation», deren Mainboard mit verschiedenen Steuer- und Umschaltrelais bei der Firma ABT e-Line GmbH entwickelt wurde. Dieses sowie weitere Steuergeräte sind im rechten Bereich des Kofferraums hinter der Innenraumverkleidung installiert.



Abbildung 17: Steuereinheit «Ladekommunikation»

Um die Komponenten, die wie oben beschrieben an verschiedenen Orten in das Fahrzeug integriert wurden, elektrisch mit Spannung zu versorgen sowie untereinander zu vernetzen und zu verbinden,



sind sowohl Hochvolt- als auch Niedervoltleitungen notwendig. Als ein Beispiel ist der Kabelbaum des Niedervoltsystems (12V) in Abbildung 18 vor Installation in das Fahrzeug zu sehen.



Abbildung 18: Kabelbaum Niedervoltsystem (12 V) vor Fahrzeuginstallation

Dieser wird vom Motorraum an der Fahrzeugfront sowohl zum Fahrzeugunterboden als auch einmal komplett durch das Fahrzeug zu den Steuergeräten im Bereich des Kofferraums verlegt. Die Abbildung 19 und Abbildung 20 dokumentieren die Einbringung des Kabelbaums in das Fahrzeug.



Abbildung 19: Installation Kabelbaum im Fahrzeuginneren



Abbildung 20: Installation Kabelbaum im hinteren Fahrzeugbereich

Um den Systemzustand des Ladesystems zu visualisieren, sowie den Nutzer bei der Positionierung über dem Ground Pad anzuleiten, ist im Bereich der Mittelkonsole ein Display angebracht. Abbildung 21 zeigt beispielsweise die Bildschirmausgabe während des Verbindungsaufbaus mit der Wallbox.



Abbildung 21: Zusätzliches Display zur Visualisierung des Systemzustands

4.1.1.5 Inbetriebnahme und Test

Nach dem Einbau des induktiven Ladesystems in das Fahrzeug wurden die elektrische Inbetriebnahme des Gesamtsystems sowie verschiedene Tests durchgeführt. Bei den Tests wird zwischen sicherheitsrelevanten (beispielsweise Isolations- und Potentialausgleichsmessungen) und funktionalen Tests unterschieden. Es wurden Tests beider Kategorien durchgeführt.

Nach den beschriebenen umfangreichen Tätigkeiten wurde das Fahrzeug wieder dem Kunden Eniwa übergeben.



4.1.2 Ausgeführte Arbeiten WiTricity und Mess- und Prüfinstitute

Im Rahmen der Vormessungen bei WiTricity in Mägenwil wurden das System und seine Integration in das Eniwa-Fahrzeug erneut getestet. Da das Eniwa-Fahrzeug eine andere VW Softwareversion (3.0 bzw. 3.2) verwendet als das zum Zeitpunkt der Entwicklung des Integrationskit verwendete WiTricity-Testfahrzeug, traten bei den Tests mehrere kleine Software-Bugs in der ABT-Software auf, die jedoch rasch von ABT behoben wurden. Längere Ladezyklen sowie wiederholte Start- und Stoppvorgänge bestätigten die Funktionsfähigkeit des Systems.

Um die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) des umgerüsteten Fahrzeugs zu überprüfen, wurde dieses ins EMC-Testcenter AG in Regensdorf transportiert. Die Messungen zur EMV wurden am 15. Februar 2024 durchgeführt.

Während weiterer Tests bei WiTricity wurde ein Hardwarefehler im Ground Pad der Ladestation entdeckt. Ein defekter Chip führte dazu, dass Fehldetektionen beim FOD-System auftraten, was die Benutzerfreundlichkeit des Systems erheblich beeinträchtigte. Der fehlerhafte Chip wurde in Zusammenarbeit mit der Empa sowohl im Eniwa- als auch im WiTricity-Fahrzeug ersetzt. Auch kleinere Softwareprobleme im Zusammenhang mit der Freigabe des FOD-Systems wurden identifiziert und behoben. Weitere Abklärungen und Anpassungen am System durch ABT sowie die Implementierung der überarbeiteten Hardware verbesserten die Leistung des Ladesystems.



Abbildung 22: Modifikation am WiTricity-Fahrzeugempfänger im Eniwa Fahrzeug bei der Empa

Im Falle einer Detektion eines Metallobjektes auf der Ladefläche ist eine Interaktion durch die benützende Person erforderlich, welche das Objekt entfernt und das System wieder freischalten muss. Eine weitere Modifikation zum Standard WiTricity Ladesystem war das Ersetzen des Tasters für die Freigabe durch einen Schlüsselschalter. Dadurch wird verhindert, dass unautorisierte Personen die Ladestation im Fehlerfall freischalten.

Bei den EMV-Messungen im Testcenter in Regensdorf wurden am Fahrzeug Störquellen gefunden, deren Emissionen die EMV-Grenzwerte überschritten haben. Folgemessungen bei WiTricity haben gezeigt, dass eine der Ursachen ein 16 MHz Clock im von ABT entwickelten Integrationskit war. Diese Emission konnte durch eine verbesserte Abschirmung gedämpft werden.



Abbildung 23: Folgemessungen der abgestrahlten Emissionen bei WiTricity

Zusätzlich wurde das WiTricity-System mit einem Firmware-Update versehen, das die Synchronisation zwischen Fahrzeug und Ladestation optimiert und die Systemstabilität erhöht. Ein noch sporadisch am Auto auftretender Fehler (intern als "Schützkleber" bezeichnet) tritt selten beim Starten oder während des kabellosen Ladevorgangs auf. Dabei detektiert das Auto einen unzulässigen Zustand im Hochvolt-Kreis, verhindert die Weiterfahrt und meldet dabei die in Abbildung 24 angezeigte Fehlermeldung. Das Auto kann mit einem Wartungsgerät über den OBD-Anschluss entsperrt werden.



Abbildung 24: Autodisplay mit Fehlermeldung

4.1.3 Integration in Swiss E-Car

4.1.3.1 Technische Integration der Keyless-Steuerung

Für die Einbindung des Eniwa VW ID.5 in das Carsharing-System von Swiss E-Car war eine hardwareseitige Integration der sogenannten Keyless-Steuerung erforderlich. Diese ermöglicht den digitalen Fahrzeugzugang und die Steuerung über das Swiss E-Car-Backend.

Hierzu wurde ein zusätzlicher Geotab-Keyless-Controller (IOX-KEYLESS-NK) installiert und mit der Fahrzeugschlüsselplatine verbunden. Der Fahrzeugschlüssel wurde dazu geöffnet, die Platine entnommen und mit einem neuen Kabelsatz direkt in die Keyless-Box integriert. Dabei wurden vier Leitungen auf die Platine gelötet - grün (Öffnen), blau (Schliessen), rot (Strom +) und schwarz (Masse).

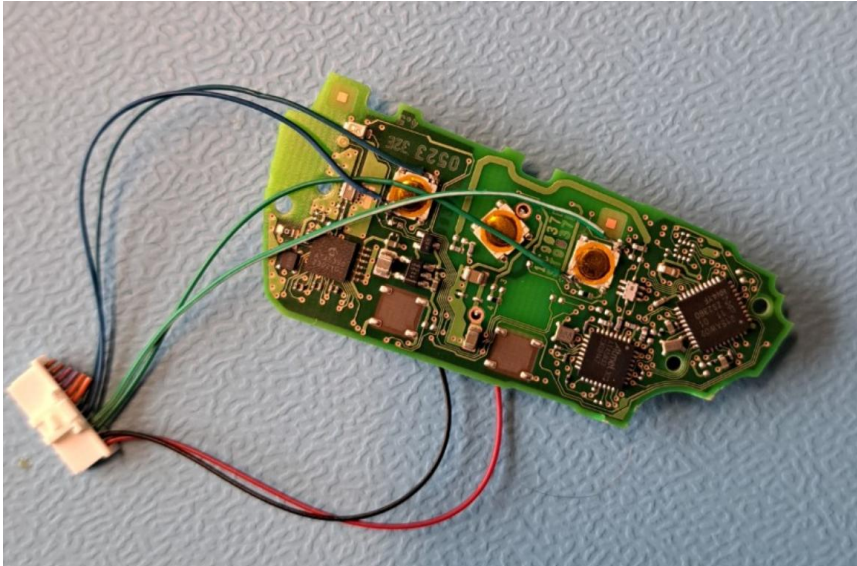


Abbildung 25: Verkabelung der Platine für die Keyless-Box

Die Lötverbindungen wurden gemäss den Herstellervorgaben geprüft und in der Keyless-Box gegen Zugbelastung gesichert. Anschliessend wurde die Platine in der IOX-KEYLESS-Einheit fixiert, über eine 12-polige Schnittstelle mit der Steuerplatine verbunden und mit Schaumstoffelementen vibrationsgedämpft im Gehäuse verschlossen.



Abbildung 26: Fertige Keyless-Box

Die fertige Baugruppe wurde im Fahrzeug verbaut und beim violetten OBD-Steckplatz mit der Elektronik verbunden. Nach der Montage erfolgte die elektrische Funktionsprüfung – hierbei wurden die Befehle «Verriegeln» und «Entriegeln» über den Controller ausgelöst und auf korrekte Reaktion der Fahrzeugverriegelung geprüft.



Abbildung 27: OBD-Steckplatz im Fahrzeug

4.1.3.2 Systemanbindung und Software-Konfiguration

Nach der physischen Integration des Keyless-Systems wurde das Fahrzeug im Swiss E-Car-Backend registriert und konfiguriert.

Im Admin-Portal von Swiss E-Car wurde das Fahrzeugprofil angelegt und mit der zugehörigen Station sowie den Nutzergruppen des Pilotbetriebs verknüpft. Dabei wurden Fahrzeug-ID, Standort, Berechtigungen und Verfügbarkeitszeiten definiert. Durch diese Konfiguration wurde die Verbindung zwischen der Fahrzeughardware (IOX-KEYLESS-Controller) und der Buchungsplattform hergestellt.

| Status | Stationname | Adresse | Mandant | Geschäftliche Öffnungszeiten | Private Öffnungszeiten | Labels |
|--------|---------------------|---------------------------------|-------------|------------------------------|------------------------|--------------------------|
| Aktiv | Buchs, Eniwa INLADE | Industriestrasse 25, 5033 Buchs | SWISS E-CAR | Offen | Ganztägig geöffnet | Offen Ganztägig geöffnet |

| Status | Nutzungsart | Kennzeichen | Hersteller | Modell | Kilometerstand | Aktuelle Station | Fahrzeugklasse | Mehr Informationen |
|----------------------------------|---|-------------|------------|--------|----------------|---------------------|----------------|--------------------|
| <input type="checkbox"/> Inaktiv | <input checked="" type="radio"/> Poolfahrzeug | AG 142 061 | Volkswagen | ID.5 | 33.039 KM | Buchs, Eniwa INLADE | VW ID.5 | |

| Nutzergruppe | Mandant | Nutzer | Administratoren | Kostenstellen | Standardstation | Art der Miete | Zugangspunkt |
|----------------|-------------|--------|-----------------|---------------|---------------------|---------------|--------------|
| INLADE Projekt | SWISS E-CAR | 3 | 5 | 1 | Buchs, Eniwa INLADE | Privat | Smartphone |

Abbildung 28: Admin-Portal Swiss E-Car

Das System ermöglicht es, das Fahrzeug über die Swiss E-Car-App zu reservieren, zu öffnen und zu schliessen, ohne einen physischen Schlüssel zu verwenden. Die Zugriffsberechtigungen werden zentral über das Portal gesteuert. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme konnte das Eniwa-Fahrzeug für Testzwecke in den regulären Sharing-Betrieb überführt werden.

4.2 Fahrzeugumbau am Beispiel des dritten Fahrzeug Prototyps (Empa)

4.2.1 Reverse-Engineering Fahrzeug Eniwa

Da die Firma ABT e-Line GmbH nach Abschluss des ersten Fahrzeugumbaus nicht mehr als Auftragnehmer zur Verfügung stand, musste für das dritte Fahrzeug der Empa ein Reverse-Engineering des durch ABT realisierten Einbaus vorgenommen werden.

Zu diesem Zweck wurde das von Eniwa umgerüstete Referenzfahrzeug durch die AMAG Autowelt Zürich in Dübendorf teilweise zerlegt. Dabei wurden sämtliche Einbaupositionen, Kabelführungen, 44/117



Steckverbindungen und Befestigungspunkte der Komponenten des Fahrzeugeinheit (Vehicle Assembly) dokumentiert und auf Optimierungspotential überprüft.

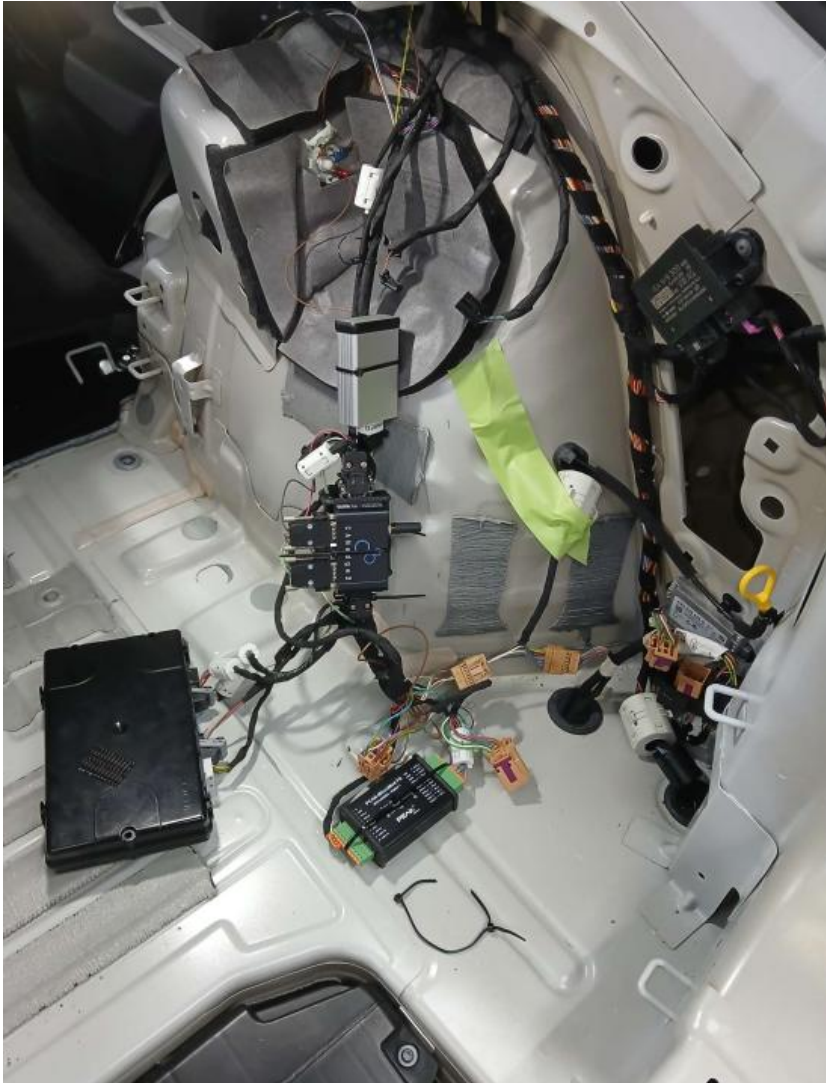


Abbildung 29: Beispiel Anbindung an Fahrzeug-Kabelstrang

Durch die genaue Analyse der bestehenden Integration konnten die Funktionsweise und die elektrische Verschaltung des Systems nachvollzogen werden. Diese Erkenntnisse bildeten die Grundlage für den Neuaufbau des Systems im Empa-Fahrzeug, um eine funktional identische Ausführung zu gewährleisten.

4.2.2 Umbauarbeiten AMAG

Auf Basis der Ergebnisse des Reverse-Engineerings übernahm die AMAG Autowelt Zürich den mechanischen und elektrischen Umbau des Empa-Fahrzeugs und optimierte beispielsweise die Kabelführungen und Abschirmungen der Leitungen.

Zunächst wurden sämtliche Unterbodenverkleidungen, Innenraumabdeckungen und Komponenten im Bereich der Mittelkonsole demontiert, um die für den Einbau der Fahrzeugeinheit erforderlichen Bereiche freizulegen. Anschliessend erfolgte die Anpassung der Befestigungspunkte am Unterboden sowie die Montage der Fahrzeugeinheit und der zugehörigen von der Empa produzierten Schirmbleche.



Abbildung 30: Installierte Fahrzeugeinheit (VA) am Unterboden

Im Vorderachsträgerbereich wurden neue Halterungen für die Kühlmittelpumpe und das Magnetventil gefertigt und installiert. Diese Komponenten wurden über eigens zugeschnittene Schläuche in den bestehenden Fahrzeugkühlkreislauf integriert. Die Schläuche wurden mit Schutzgewebe ummantelt und mit Federbandschellen fixiert, um Vibrationen zu reduzieren und die Dauerhaftigkeit der Installation zu erhöhen.



Abbildung 31: Neue Halterung der Kühlmittelpumpe und des Magnetventils

Im Innenraum wurde das Display zur Visualisierung der Einparkhilfe auf der Mittelkonsole montiert. Hierzu wurde ein passender Ausschnitt gefräst und das Display von unten befestigt. Das Kabel zur



Verbindung mit der Steuereinheit wurde durch die Mittelkonsole und entlang der A-Säule in den Motorraum geführt.



Abbildung 32: Display zur Visualisierung der Einparkhilfe auf Mittelkonsole

Im weiteren Verlauf wurden die elektrischen Leitungen zur Spannungsversorgung, Kommunikation und Steuerung verlegt und an die vorhandene Fahrzeugelektrik angebunden. Hierzu wurde ein Kabelstrang auf einem eigens dafür gefertigten Musterrahmen vorgefertigt, um diesen anschliessend passgenau ins Fahrzeug zu integrieren.



Abbildung 33: neue elektrische Leitungen in orange

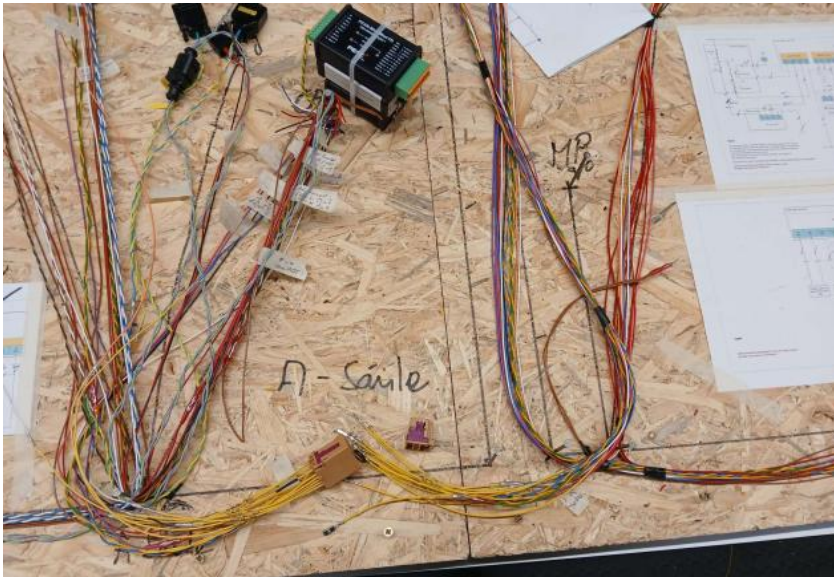


Abbildung 34: Musterrahmen mit Kabelstrang

Die Absicherung der Komponenten erfolgte über die Integration zusätzlicher Sicherungshalter im vorderen Sicherungskasten.



Abbildung 35: Zusätzliche Sicherungshalter im vorderen Sicherungskasten

Nach Abschluss der Arbeiten wurden alle elektrischen Verbindungen überprüft, die mechanischen Befestigungen kontrolliert, der Kühlkreislauf entlüftet und auf Dichtheit getestet.

4.2.3 Umbauarbeiten Durot Electric

Da die AMAG Autowelt Zürich als offizieller VW-Partner keine Arbeiten an Hochvoltssystemen durchführen darf, wurde die Firma Durot Electric GmbH mit den Hochvolt-spezifischen Arbeiten beauftragt.

Durot Electric übernahm die Vormontage und Integration der Hochvoltkomponenten des WiTricity-Systems. Hierzu gehörte der Aufbau der Connection Box, der Hochvolt-Schütze, der Vorladeschaltung sowie die Fertigung der notwendigen Hochvolt-Leitungen und deren Anschlüsse.

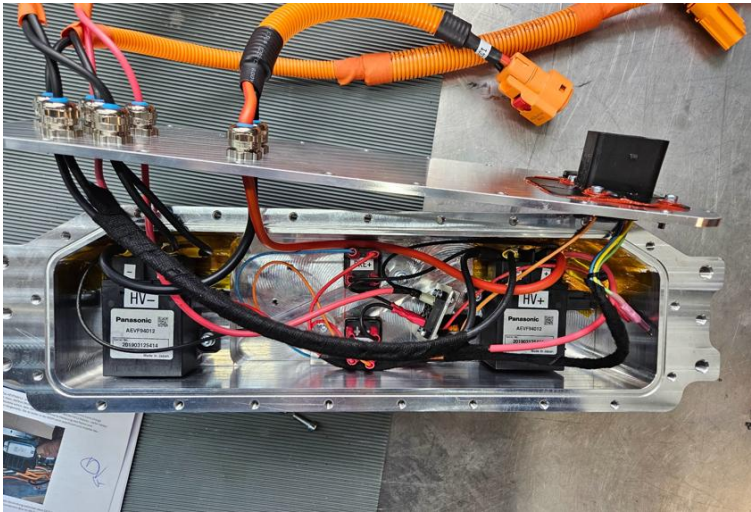


Abbildung 36: Vormontage der Hochvoltkomponenten des WiTricity-Systems

Im Zuge der Integration wurden die CCS-Leitungen aufgetrennt, neu gecrimpt und an die Connection Box angeschlossen. Zudem erfolgte die Anbindung der Fahrzeugeinheit und des PTC-Heaters an das Hochvoltssystem. Alle Leitungen wurden gemäss den Vorgaben der Fahrzeughersteller und konform mit den relevanten Industrienormen verlegt, fixiert und auf Isolationswiderstand geprüft.



Abbildung 37: Neue Abzweigdose des Hochvoltsystems

Nach Abschluss der Arbeiten erfolgte die elektrische Inbetriebnahme des Gesamtsystems in enger Abstimmung mit der AMAG Autowelt Zürich. Dabei wurden die Hochvolt-Verbindungen geprüft, die Steuergeräte konfiguriert und erste Funktionsläufe durchgeführt.

Durch das Zusammenspiel beider Partner konnte die Integration der Fahrzeugeinheit erfolgreich abgeschlossen werden. Das Empa-Fahrzeug entspricht in Aufbau, Funktion und Systemkonfiguration dem zuvor umgerüsteten Eniwa-Fahrzeug. Die Kabelwege und die Verkabelungsart wurde dabei aufgrund der Erkenntnisse der EMV-Messungen am ersten Fahrzeug neu ausgelegt und verbessert. Die Kommunikationsleitungen zum Display wurden beispielsweise neu verdreht und abgeschirmt ausgeführt. Anschliessend wurde das Fahrzeug für die weiteren Test- und Validierungsarbeiten vorbereitet.



4.3 Die Zulassung am Beispiel des ersten Fahrzeug-Prototyps

4.3.1 Vorabklärungen mit involvierten Parteien

Absatz 3.1 erläuterte das Genehmigungsverfahren für Prototypen von induktiven Ladesystemen. Dieses Verfahren ist einerseits zwar rechtlich eindeutig festgelegt. Andererseits gibt es aber einige Unklarheiten, da eine Definition der EMV-Prüfung für induktive Systeme innerhalb der UN-Regelung Nr. 10 fehlt. Dies führte zu mehreren Fragen. Aus diesem Grund wurde innerhalb dieses Projektes von Anfang an den Kontakt zu allen involvierten Parteien gesucht und Gespräche mit dem ASTRA, den Strassenverkehrsämtern der Kantone Zürich und Aargau sowie mit zwei anerkannten Prüfstellen für EMV-Prüfungen und dem BAKOM geführt. Diese Vorabklärungen haben folgendes ergeben:

ASTRA

Die Zuständigkeit für die Zulassung liegt bei den Kantonen, namentlich bei den Strassenverkehrsämtern. Im Kontext von Pilot- und Demonstrationsprojekten wäre es zwar denkbar, Ausnahmen zu gewähren und auf der Verordnungsebene umzusetzen. Dies müsste jedoch auf Departements-Stufe erfolgen und erfordert ebenfalls den Nachweis der Konformität mit den grundlegenden Anforderungen und schweizerischen Bestimmungen, um die Ausnahmen präzise zu definieren. Das Projektteam und das ASTRA sind übereingekommen, dass eine reguläre Zulassung das Ziel sein soll und nur falls sich dieser Ansatz als nicht durchführbar herausstellen sollte, ein Antrag auf eine Ausnahmegenehmigung in Betracht gezogen wird.

Strassenverkehrsämter Zürich & Aargau

Die beteiligten Strassenverkehrsämter sind der Meinung, dass eine Begutachtung der Fahrzeuge direkt bei den Ämtern erfolgen kann, vorausgesetzt, die NEV- und VEMV-Nachweise liegen vor. Dies impliziert, dass die Kriterien bezüglich Bodenfreiheit, Fussgängerschutz und mechanischer Befestigung im Zuge einer technischen Inspektion durch das STVA überprüft werden können, ohne dass es einer Bestätigung durch eine anerkannte Prüfstelle bedarf.

Anerkannte Prüfstellen (EMV / NEV)

Gemäss der «Verordnung über die Typengenehmigung von Strassenfahrzeugen» (TGV) in der Schweiz gibt es nur zwei anerkannte Prüfstellen, die über eine Absorber-Halle mit den erforderlichen Abmessungen für EMV-Messungen an Fahrzeugen verfügen. Beide Prüfstellen sind befugt, sowohl elektromagnetische Verträglichkeits- als auch elektrische Sicherheitsprüfungen durchzuführen.

Das Projektteam hat mit beiden Prüfstellen Vorabklärungen getroffen und die Zulassung nach VEMV und NEV diskutiert. In Bezug auf die elektrische Sicherheit (NEV) waren sich alle Beteiligten einig, dass die Fahrzeuge uneingeschränkt alle Anforderungen der UN-Regelung Nr. 100 erfüllen müssen.

Bei der Prüfung der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) gab es jedoch Unterschiede in der Interpretation der geltenden Anforderungen sowie der Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten zwischen Prüfstelle und Hersteller. Eine Prüfstelle schlug einen sehr umfangreichen und kostenintensiven Katalog von Messungen vor. Dabei sollte vom Hersteller respektive vom Projektteam, für jede Messung, welche nicht durchgeführt wird, eine schriftliche Begründung beigebracht werden, weshalb diese nicht als nötig erachtet wird. Zudem sollten auf dem finalen Prüfbericht auch alle nicht durchgeführten Messungen aufgeführt werden, was eine finale Beurteilung der Unterlagen beim Strassenverkehrsamt unnötig kompliziert hätte.

Die zweite Prüfstelle schlug nach Rücksprache mit den zuständigen Bundesämtern ASTRA und BAKOM ein pragmatisches Paket von Prüfungen nach UN-R10, IEC 61980 und ISO 19363 vor, das anschliessend umgesetzt wurde. Dieser Ansatz entbindet den Hersteller zwar nicht von seiner Pflicht, eine gründliche Risikoanalyse durchzuführen, und entspricht daher grundsätzlich dem Vorgehen der ersten Prüfstelle. In der praktischen Umsetzung erschien es jedoch sinnvoller und übersichtlicher, einen Prüfbericht auszustellen, in dem nur die tatsächlich durchgeführten Prüfungen aufgeführt sind.



4.3.2 EMV-Messungen für Fahrzeugzulassung

Wie bereits dargelegt, stellt die EMV-Prüfung eines vollständig ausgerüsteten Einzelfahrzeugs mit induktivem Ladesystem eine besondere Herausforderung dar.

Im Rahmen der Fahrzeuggenehmigung wird in der Regel eine Prüfung nach UN-Regelung Nr. 10 (UN-R10) herangezogen. UN-R10 definiert jedoch bislang keinen spezifischen Betriebszustand für induktives Laden, sodass der aktive WPT-Betrieb nicht explizit Bestandteil des normativ vorgegebenen Prüfprogramms ist. Gleichzeitig entsteht das für WPT relevante elektromagnetische Verhalten (Emissionen und feldbezogene Effekte) erst im gekoppelten Betrieb von Fahrzeug und Ladeinfrastruktur.

Für die projektbezogene Zulassungspraxis wurde deshalb – ergänzend zu UN-R10 – ein fallbezogenes Nachweis- und Prüfkonzept unter Einbezug international anerkannter Industrienormen herangezogen. Als zentrale Referenzen dienten dabei die für WPT-Systeme einschlägige IEC-61980-Normenreihe (insbesondere Messungen zu Emissionen und feldbezogenen Grössen) sowie für die Bewertung der Exposition von Personen die Norm IEC 62233 als anerkannte Messmethodik zur Gegenüberstellung mit ICNIRP-Referenzwerten. Soweit verfügbar, wurden die zum damaligen Zeitpunkt vorliegenden Entwurfss Fassungen der IEC-61980-Normenreihe berücksichtigt, ohne daraus eine normative Verbindlichkeit abzuleiten.

Aufgrund der Komplexität und der nicht durchgängig eindeutig regulatorisch festgelegten Vorgehensweise wurde in Zusammenarbeit mit der zuständigen anerkannten Prüfstelle (APS) ein Prüfprogramm definiert, das die Einhaltung der einschlägigen Anforderungen abdeckt und zugleich in Umfang und Durchführung als technisch sinnvoll und zumutbar beurteilt wurde.

Es wurden folgende sechs Prüfungen definiert und durchgeführt:

Tabelle 4: Definierte Prüfungen im Rahmen des erstellten Testprogramms

| Test-Nr. | Standard | Testbeschreibung | Prüfmodus |
|----------|-------------|--|----------------|
| 1 | UN R10 | Breitbandige elektromagnetische Störstrahlungen von Fahrzeugen im Bereich 30 MHz bis 1 GHz | Laden |
| 2 | IEC 61980-1 | Magnetische Feldstärke im Bereich 9 kHz bis 150 kHz | Laden |
| 3 | IEC 61980-1 | Gestahlte Störungen im Bereich 150 kHz bis 30 MHz | Laden |
| 4 | IEC 61980-1 | Gestahlte Störungen im Bereich 30 MHz bis 1 GHz | Laden |
| 5 | IEC 62233 | Elektromagnetische Emissionen im Hinblick auf Personensicherheit | Laden |
| 6 | UN R10 | Immunität von Fahrzeugen gegen elektromagnetische Strahlung | Fahren & Laden |

Der vollständige Prüfbericht ist in Anhang 10.10 zu finden.

Die Tests 1 – 4 adressieren Emissionen (Abstrahlung elektromagnetischer Störungen) und dienen dem Nachweis, dass Fahrzeug und Ladeeinrichtung im Betrieb keine unzulässigen Störungen für Funkdienste bzw. andere elektrische Geräte verursachen. Test 5 dient der Bewertung der Exposition von Personen gegenüber niederfrequenten magnetischen Feldern im Umfeld des induktiven Ladesystems anhand einer etablierten Messmethodik (IEC 62233) und der Einordnung gegenüber ICNIRP-Referenzwerten. Test 6 überprüft die Immunität des Fahrzeugs gegenüber externen



elektromagnetischen Feldern; im Rahmen dieser Prüfung wurden beim Fahren und beim Laden keine sicherheitsrelevanten Fehlfunktionen beobachtet.

Zu beachten ist, dass einzelne der ergänzenden Messungen (insbesondere im Zusammenhang mit dem aktiven WPT-Betrieb) nach strikter Auslegung der fahrzeuggenehmigungsrechtlichen Vorgaben nicht eindeutig vorgeschrieben sind. Sie wurden im vorliegenden Projekt jedoch als zweckmässige Ergänzung festgelegt, um den Betrieb des induktiven Ladesystems im gekoppelten Gesamtsystem nachvollziehbar zu beurteilen und die Nachweisführung gegenüber Prüfstelle und Behörden zu konsolidieren.

Eine Anwendung der IEC 62233 erfolgte somit im Rahmen des Pilotversuches als Sicherheitsnachweis hinsichtlich der am Versuch beteiligten Personen. Diese Prüfung wurde gemäss dem APS-Bericht erfolgreich bestanden. Die mit einer Feldprobe entlang des Fahrzeugperimeters gemessenen magnetischen Flussdichten lagen deutlich unter den relevanten ICNIRP-Leitlinien.

Test 6 ist eine Prüfung der Immunität respektive der Fähigkeit des Prüflings, in einer elektromagnetisch belasteten Umgebung ordnungsgemäss zu funktionieren. Bei diesem Test wird das Fahrzeug von aussen aktiv mit elektromagnetischen Störfeldern bestrahlt. Dabei dürfen weder beim Fahren noch beim Laden (sicherheitsrelevante) Fehlfunktionen auftreten. Für den Test beim Fahren wurde das Fahrzeug angehoben, so dass die Antriebsräder frei drehen konnten. In beiden Fällen haben sämtliche Systeme einwandfrei funktioniert. Das umgebaute Fahrzeug kann somit, im Rahmen der durchgeführten Prüfungen, bezüglich Immunität als sicher betrachtet werden.



Abbildung 38: Fahrzeug Nr. 1 im EMV-Labor mit Feldgenerator zur Prüfung der Immunität

Test 1 und 4 decken den gleichen Frequenzbereich ab. Test 1 umfasst vier unterschiedliche Setups (je zwei Antennenausrichtungen bei zwei Fahrzeugausrichtungen). Bei Test 4 hingegen wird in einer Prüfung das Fahrzeug zweimal um volle 360° gedreht und dabei je eine Umdrehung pro Antennenposition ein Frequenzspektrum aufgezeichnet. Als Resultat fliessen die jeweils höchsten gemessenen Werte (max hold) je Frequenzspektrum ein.

Zudem sind die Grenzwerte der beiden Tests (Abbildung 39) leicht unterschiedlich: Test 1 hat ein Limit von 32 dB im Bereich von 30-75 MHz, welcher im Bereich von 75-400 MHz kontinuierlich auf 43 dB ansteigt und dann bis 1 GHz bei diesem Wert verbleibt. Test 4 hingegen hat einen Grenzwert von 40 dB bis 230 MHz, welcher dann sprunghaft auf 47 dB ansteigt, für Geräte der Klasse A. Für Geräte der Klasse B sind die Grenzwerte 30 dB respektive 37 dB bei gleichem Kurvenverlauf.

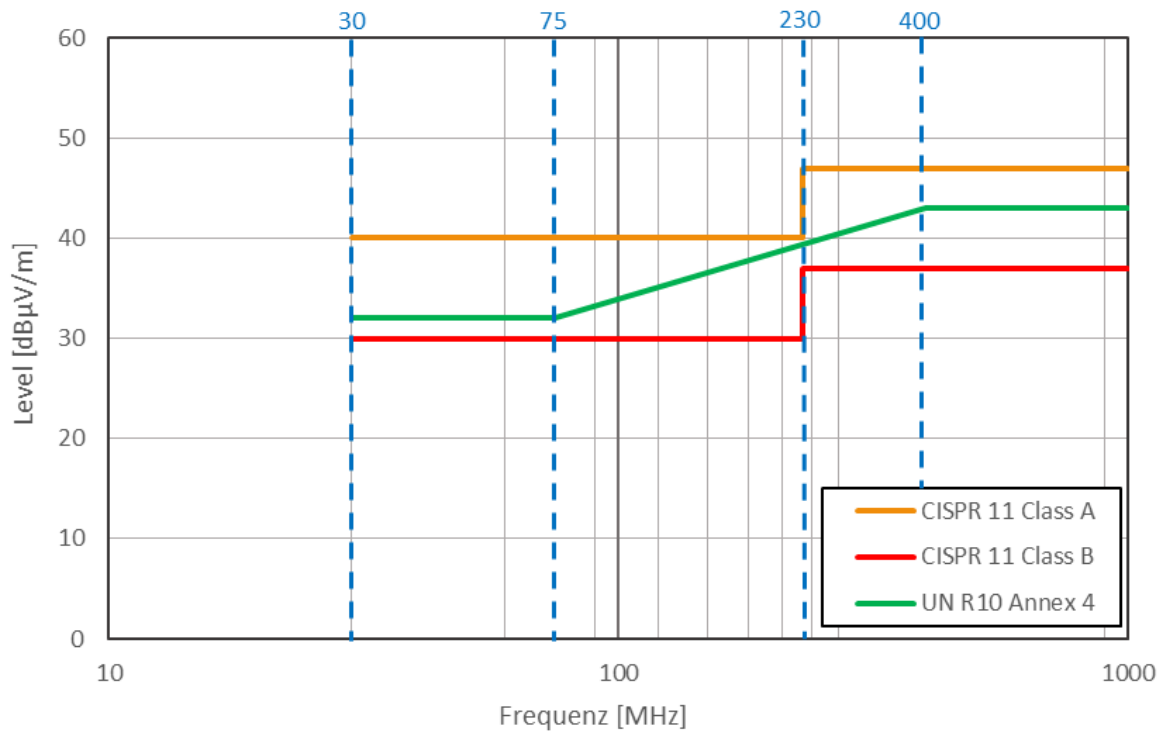


Abbildung 39: Grenzwerte gestrahlter Störaussendungen im Bereich von 30 MHz bis 1 GHz

Bei Test 1 (der Messung von breitbandigen elektromagnetischen Störstrahlungen im Bereich 30 MHz bis 1 GHz nach UN-Regelung R10) zeigte sich bei einer der vier Prüfungen eine leichte Überschreitung des Grenzwertes von 0,21 dBµV/m bei 64 MHz. Abbildung 40 zeigt die problematische Messung nach UN-R10. Die orange Kurve zeigt die Spitzenwerte. Die für die Einhaltung der Grenzwerte relevanten Quasi-Peak-Messungen sind in Grün dargestellt, der Grenzwert nach UN-R10 in Rot. Die Grenzwertverletzung bei 64 MHz ist knapp zu erkennen (pinker Pfeil).

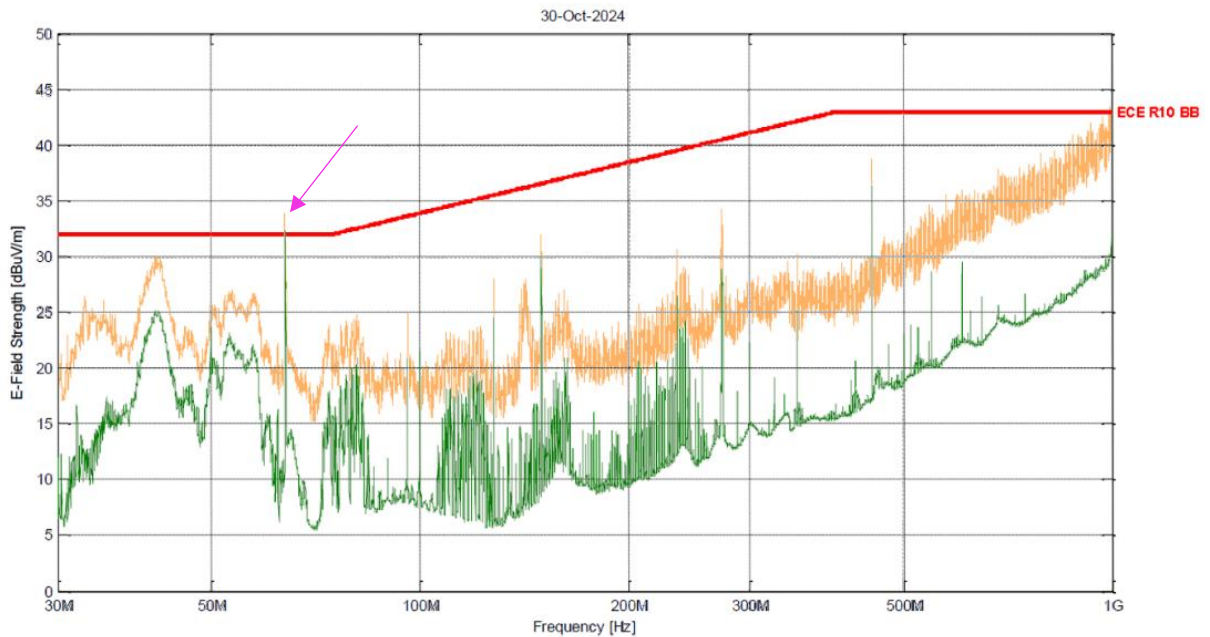


Abbildung 40: Messung nach UN-R10 - Test 1, rechte Fahrzeugseite & vertikale Ausrichtung

Die Überschreitung des Grenzwertes von rund 0,2 dB wurde lediglich bei einer der vier Prüfungen nach R10 festgestellt. Es ist wichtig, sich daran zu erinnern, dass die Prüfung nach R10 nicht für das induktive Laden vorgesehen ist. Dennoch wird sie, wie bereits oben diskutiert, zur Zulassung von Einzelfahrzeugen verlangt.

Ausserdem kann festgehalten werden, dass die Messunsicherheit bei dieser Messung gemäss Prüf-
stelle 4,57 dB beträgt. Eine Überschreitung des Grenzwertes von lediglich 0,21 dB kann somit nicht als statistisch gesichert angesehen werden. EMV-Prüfungen basieren heute aber alle auf dem Prinzip des «shared risk», d.h. Messunsicherheiten dürfen weder zum Grenzwert zugeschlagen noch abgezogen werden.

Auf dem Prüfbericht wurde die Überschreitung des Grenzwertes zwar korrekt ausgewiesen, jedoch zusätzlich (nach Rücksprache mit dem BAKOM) durch die Prüf-
stelle mit einem sogenannten «Engineering Judgement» versehen. Dieses verweist auf die Unbedenklichkeit der gemessenen Werte aufgrund der oben genannten Kriterien.

Sehr wohl für induktives Laden vorgesehen ist die vergleichbare Messung nach IEC 61980 (Test 4). Abbildung 41 zeigt die Ergebnisse dieser Messung. Auch hier sind die Spitzenwerte in Orange, die relevanten Quasi-Spitzen in Grün und der Grenzwert (Geräteklasse A) in Rot dargestellt. Diese Grenzwerte wurden problemlos eingehalten, zumindest jene der Geräteklasse A (siehe Absatz 3.1.4.2), obwohl diese Prüfung aufgrund der Fahrzeugdrehung als wesentlich gründlicher zu betrachten ist.

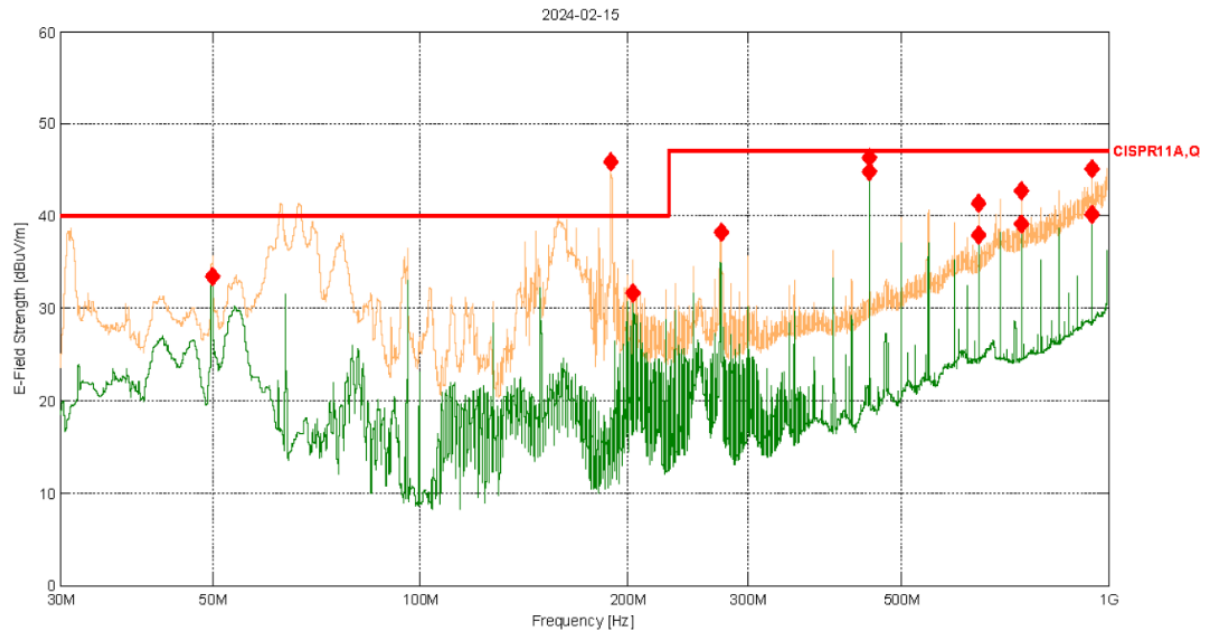


Abbildung 41: Messung nach IEC 61980 (Test 4, 360°)

Zur Erfüllung des Standards IEC 61980 mit der Geräteklasse B - was für eine Überführung in die Serie sicher angestrebt werden sollte - sind noch einige technische Nachbesserungen am Produktdesign und/oder der Fahrzeugintegration notwendig. Die meisten dieser Punkte sind jedoch ausserhalb der kabellosen Energieübertragung zu suchen. Beispielsweise konnte die Überhöhung bei 64 MHz dem verbauten Fahrerinformationsdisplay zugeordnet werden. Für die Zulassung der Prototypen mit Geräteklasse A können die Messungen der elektromagnetischen Verträglichkeit jedoch als konform bewertet werden. Abgesehen von der eigentlichen WPT-Betriebsfrequenz (85,5 kHz), bewegen sich die Störstrahlungen auf ähnlichem Niveau wie jene von kabelgebundenen Ladesystemen.

4.3.3 NEV-Prüfung am Fahrzeug Nr. 1

Die Prüfung der elektrischen Sicherheit verlangt nach elektrotechnischen Messungen am Hochvoltssystem des Fahrzeuges sowie am Hochspannungsteil der fahrzeugseitigen Empfängerspule. Diese Systeme sind sehr schwer zugänglich. Einerseits müssen die spannungsführenden Teile vor Berührung und Manipulation gut geschützt sein, andererseits erlaubt es auch die kompakte Einbausituation im Fahrzeug nicht, diese Teile zu öffnen. Aus diesem Grund wurde der Termin zur Prüfung in zwei Teile aufgeteilt. Zuerst wurden bei WiTricity in Mägenwil an einem baugleichen Modell des Ladesystems, aufgebaut auf einem Teststand im Labor, die Messungen am offenen Empfängermodul durchgeführt. Anschliessend wurde das Fahrzeug zur Empa nach Dübendorf transportiert, um dort die Messungen am offenen Hochvoltkreis des Fahrzeuges durchzuführen.

4.3.3.1 Prüfung bei WiTricity in Mägenwil

Auf dem Teststand von WiTricity ist das Empfängermodul - entgegen jenem im Fahrzeug - von oben zugänglich. So war es möglich, am offenen System Messungen durchzuführen, währenddessen es in Betrieb ist. So konnte die Hochspannung am Resonator unter Vollast gemessen werden. Diese ist wichtig da sie - als höchste Systemspannung - weitere Anforderungen an die Isolation und Sicherheit des Systems definiert.

Zudem wurde die Isolation der Hochspannungskomponenten gegenüber dem Chassis geprüft. Der Berührungsschutz und die allgemeine Anmutung und Qualität der Verkabelung waren ebenfalls Teil der Inspektion.



4.3.3.2 Prüfung bei der Empa in Dübendorf

Für die Prüfung bei der Empa wurde das Fahrzeug so vorbereitet, dass ein einfacher Zugang zum Hochvoltssystem möglich war. Hierzu wurde ein Adapterkabel gefertigt, das in eine fahrzeugeitige Hochvoltverbindung gesteckt werden konnte. Dadurch war es möglich, unter Einhaltung der Sicherheitsvorschriften (Berührungsschutz), am aktiven Hochvoltssystem die Spannung zu messen. Bei fahrzeugeitig deaktiviertem System konnte derselbe Adapter genutzt werden, um den Isolationswiderstand des Hochvoltkreises gegenüber dem Fahrzeug-Chassis zu messen. Beide Werte entsprachen den Vorschriften.

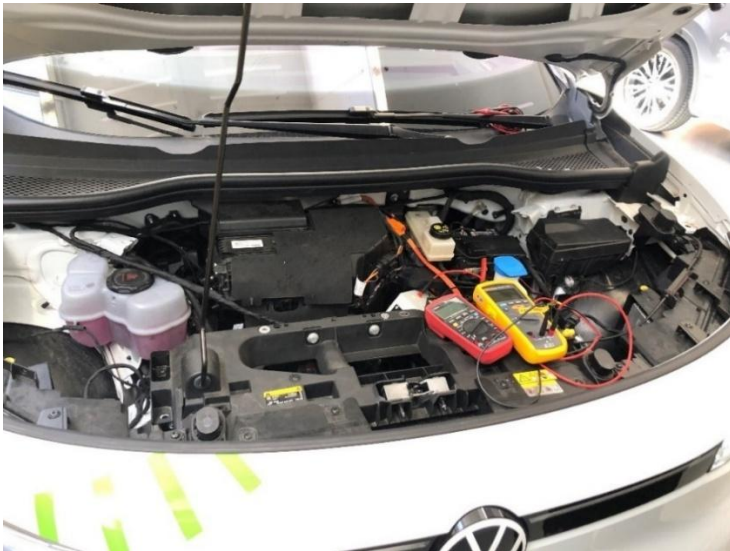


Abbildung 42: Prüfung des Isolationswiderstandes an der Empa

4.3.3.3 Zulassung beim Strassenverkehrsamt Aargau

Mit den beiden Prüfberichten zu EMV und NEV konnte das Fahrzeug beim Strassenverkehrsamt Aargau zur Prüfung der technischen Änderung bei der Prüfstelle Frick angemeldet werden. Die Fahrzeugexperten des Strassenverkehrsamtes prüften vor Ort anhand einer Sichtprüfung die folgenden Punkte:

- mechanische Befestigung der Bauteile
- allfällige Verletzungsgefahren durch scharfkantige oder hervorstehende Bauteile
- Unversehrtheit des vorderen Unterfahrschutzes
- Bodenfreiheit
- Unversehrtheit des Fussgängerschutzes (Freiraum unter der Motorhaube)
- Allgemeine Qualitätsanmutung der Installation und der Verkabelung

Ebenfalls wurden die Seriennummern der Bauteile notiert, um diese anschliessend im Fahrzeugausweis zu dokumentieren.

Die Prüfung konnte ohne Beanstandungen absolviert werden. Auch der EMV-Prüfbericht mit dem enthaltenen Engineering Judgement wurde akzeptiert, die Prüfung gilt somit als bestanden und die technische Änderung wurde in den Fahrzeugausweis eingetragen. Das Fahrzeug ist mitsamt der Fahrzeugeinheit des induktiven Ladesystems für die Teilnahme im öffentlichen Strassenverkehr zugelassen.

Aufgrund des nicht vollständig erfüllten EMV-Nachweises hat man sich mit dem Strassenverkehrsamt jedoch geeinigt, die Zulassung vorerst auf zwei Jahre zu beschränken. Sobald ein vollständig gültiges Testergebnis vorliegt, kann dies jederzeit administrativ (also ohne technische Abnahme) in eine unbefristete Zulassung umgewandelt werden. Dies wurde im späteren Verlauf des Projekts umgesetzt.



4.4 Zulassung der weiteren Fahrzeug-Prototypen

Für die Zulassung des zweiten und dritten Prototyps – die Fahrzeuge der WiTricity GmbH und der Empa - konnte auf den EMV-Prüfbericht des ersten Prototyps verwiesen werden. Grundsätzlich verlangt die technische Änderung zwar für jedes Fahrzeug nach einer Prüfung respektive nach einem Prüfbericht. Es liegt jedoch im Ermessensspielraum der Prüfstelle, ob sie für weitere baugleiche Fahrzeuge weitere Messungen verlangt, oder ob sie auf bereits absolvierte Prüfungen verweist und den Prüfbericht auf administrativem Wege ausstellt. Da im Rahmen dieses Projektes der Prüfstelle glaubhaft gemacht werden konnte, dass es sich um identische Fahrzeuge (gleiche EU-Gesamtgenehmigungsnummer) mit dem gleichen Umbau handelt, konnte für das zweite und dritte Fahrzeug der EMV-Prüfbericht ohne erneute Labormessungen erstellt werden. Somit musste lediglich die Prüfung der elektrischen Sicherheit (Prüfung des Isolationswiderstandes) gemacht werden.

Wiederum erfolgte die technische Abnahme und die beanstandungslose Eintragung in den Fahrzeugausweis beim Strassenverkehrsamt Aargau (WiTricity) respektive beim Strassenverkehrsamt Zürich (Empa). Und wiederum wurde die Zulassung vorerst auf zwei Jahre befristet ausgestellt. Somit verfügten ab dem 2. April 2025 alle drei Prototypenfahrzeuge über eine Strassenzulassung.

4.5 Nachmessung und unbefristete Zulassung

Wie in Absatz 4.2 erläutert, wurden für die drei Fahrzeuge vorerst lediglich befristete Zulassungen ausgestellt. Dies erfolgte aufgrund einer minimalen Grenzwertüberschreitung einer EMV-Messung in Absprache mit den zuständigen Behörden. Als Ursache der Grenzwertüberschreitung wurde das im Fahrzeug nachgerüstete Display (zur Darstellung der Parkposition auf dem Ground Pad), respektive die Verbindungsleitungen des Displays zur Kommunikation mit der Steuereinheit, evaluiert. Am dritten umgerüsteten Fahrzeug - dasjenige der Empa - wurde die Verkabelung entsprechend angepasst und die entsprechende Prüfung mit jenem Fahrzeug wiederholt.

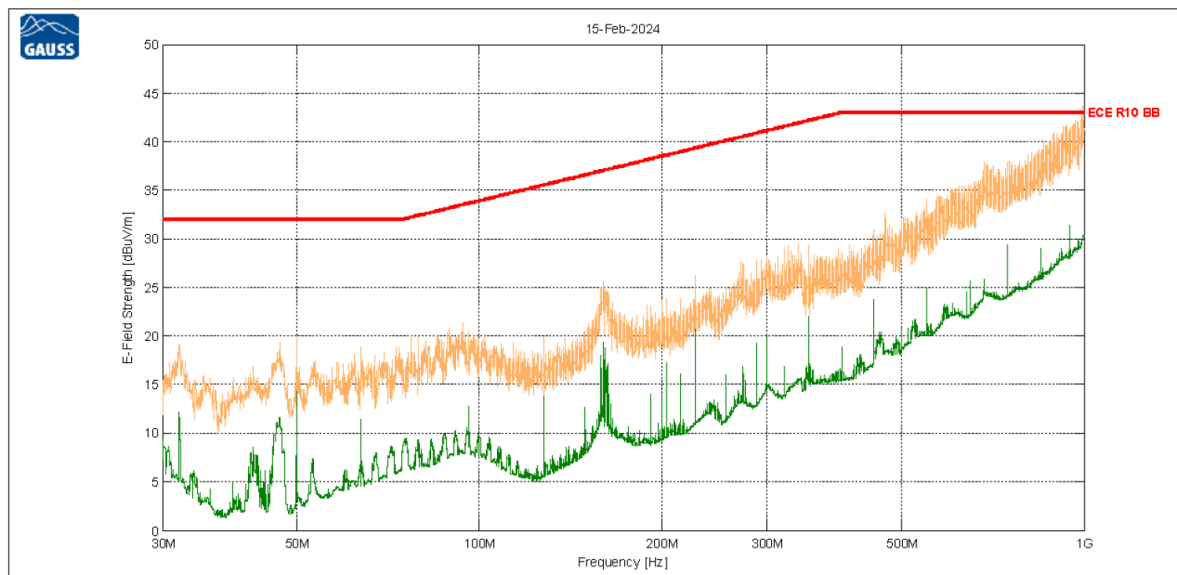


Abbildung 43: Nachmessung der Breitbandemissionen nach UN-R10

Wie in Abbildung 43 zu sehen, war die Messung an diesem Fahrzeug absolut einwandfrei und weit unterhalb der Grenzwerte. Somit konnten die Fahrzeuge anschliessend mit einem überarbeiteten Prüfbericht bei den jeweiligen Strassenverkehrsämtern regulär und unbefristet zugelassen werden.



4.6 Installation der Ladestationen

4.6.1 Standort Eniwa

4.6.1.1 Einführung und Risikoanalyse

Da die Ladestation zum Zeitpunkt der Installation noch nicht über eine Konformitätserklärung des Herstellers verfügte, wurde eine ausführliche Risikoanalyse des Betreibers (Eniwa AG) durchgeführt, auf dessen Grundlage die Installation erfolgen konnte. Die durchgeführte Risikoanalyse ist im Anhang beigefügt.

Auf Grundlage der Erkenntnisse und der in 3.1.1 beschriebenen Anforderungen wurde eine Risikoanalyse hinsichtlich des geeigneten Standorts durchgeführt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Risiko am Standort Buchs als gering eingestuft werden kann. Es wurden sämtliche sicherheitsrelevanten Vorgaben gemäss der Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse (NEV), der Starkstromverordnung (StV) sowie der Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV) berücksichtigt.

4.6.1.2 Tiefbau- und Erschliessungsarbeiten

In einem zweiten Schritt wurde der ausgewählte Standort auf dem Aussenparkplatz vorbereitet. Die erforderlichen Erdarbeiten umfassten das Ausheben eines Grabens für die Verlegung der Versorgungsleitungen sowie die Installation eines Leerrohrs. Dieses dient dazu, die Versorgungs- und Datenleitungen normgerecht und geschützt zur Ladestation zu führen. Parallel dazu wurden vier Gartenplatten (1 m x 1 m) in den Boden eingelassen, um eine möglichst ebene Installationsfläche für das Ground Pad zu schaffen. Für die stabile Befestigung der Wallbox der Ladestation wurde ein Betonfundament gegossen, das als Montagesockel für die Station dient. Um die Ladestation zusätzlich mechanisch vor Schäden durch Fahrzeuge zu schützen, wurde der bestehende Aufprallschutz wiederverwendet.



Abbildung 44: Installation des Leerrohrs beim ersten Ladestationsstandort



4.6.1.3 Installation Ladestation und Monitoringsysteme

Die Ladestation selbst wurde freistehend montiert. Für den sicheren Betrieb wurden eine Kombination aus einem Leitungsschutzschalter und Fehlerstromschutzschalter verwendet (FILSC20 / 30mA). Darüber hinaus erfolgten eine ordnungsgemässe Erdung und Isolierungsprüfung der Anlage, um die elektrische Sicherheit zu gewährleisten.

Ein weiterer Bestandteil der Installation war die Inbetriebnahme einer zusätzlichen Box, die einen Einplatinencomputer (Datenlogger) und einen Stromzähler für das Monitoring und die Abrechnung enthält. Diese Box wurde in der Mitarbeitergarage der Eniwa AG angebracht. Der Datenlogger ist mit der Ladestation und einer am Sockel der Ladesäule (Wallbox) verbauten Kamera verbunden, um bei Auslösung einer der Schutzmechanismen wie FOD der LOD nachvollziehen zu können, was genau der Auslöser war.



Abbildung 45: Box mit Monitoring- und Abrechnungssystem

Für die Kontrolle wurde eine Kamera installiert, die eine Überwachung des Standorts ermöglicht. Diese Kamera verfügt über eine SIM-Karte für die Übertragung der Videodaten.

Zusätzlich wurden alle elektrischen Verbindungen nach den geltenden Vorschriften installiert und auf Funktionalität geprüft. Dies umfasste die Verbindungen zwischen der Ladestation, der Überwachungskamera an der Ladesäule (Wallbox) und der Box mit dem Datenlogger. Alle Systeme wurden in Betrieb genommen und einer umfassenden Testreihe unterzogen, um die korrekte Funktion der gesamten Infrastruktur sicherzustellen.

Abschliessend wurde die Ladestation für den Pilotbetrieb freigegeben. Die erste Testladung verlief erfolgreich und alle Systeme funktionierten wie geplant. Zur Sicherstellung eines reibungslosen Betriebs wurden regelmässige Kontrollintervalle für die Überprüfung der elektrischen Komponenten festgelegt.



Die laufende Überwachung und der Fernzugriff ermöglichen zudem eine schnelle Reaktion auf potenzielle Störungen.



Abbildung 46: Fertigestellte induktive Ladestation bei Eniwa in Buchs

4.6.2 Standort Empa

Nach Abschluss der Messungen konnte auch die Ladestation der Empa auf dem Campus in Dübendorf fix installiert und in Betrieb genommen werden.

Zur sicheren Verankerung der Ladesäule (Wallbox), des Ground Pads sowie der Rammschutzbügel wurde der bestehende Asphalt aufgefräst und Fundamente aus Beton erstellt. Zum Schutz vor Schneepflugfahrzeugen, welche die schneebedeckte Ladeplatte leicht übersehen könnten, wurde ein seitlicher Rammschutzbügel ergänzt. Zudem wurde die Ladestation mit einem Fehlerstromschutzschalter des Typs F-EV abgesichert. Die Autoren halten dies bei kabellosen Ladestationen nicht für notwendig, da beim kabellosen Laden keine DC-Fehlerströme am Fahrzeug abfliessen können. Die gültigen Installationsvorschriften sehen diese jedoch für Ladestationen zwingend vor – eine Ausnahme für induktive Lader ist (noch) nicht vorgesehen.



Abbildung 47: Kabellose Ladestation auf dem Campus der Empa Dübendorf

Da zum Zeitpunkt der Installation noch immer keine vollständige Konformitätserklärung des Herstellers vorlag (und diese bis zum Abschluss des Projektes auch nicht mehr erwartet werden konnte), wurde die



Installation auch am Standort Dübendorf aufgrund einer Risikoanalyse seitens der Betreiberin (Empa) vorgenommen. Die Risikobeurteilung ist im Anhang dieses Berichtes angefügt.

4.7 Einfluss auf die Neuwagengarantie resp. Gewährleistung

Die Begriffe «Gewährleistung» und «Garantie» werden in der Schweiz im allgemeinen Sprachgebrauch oft gleichbedeutend verwendet. Es besteht jedoch ein rechtlicher Unterschied: Im Obligationenrecht (OR) wird bei Kaufverträgen von «Gewährleistung» gesprochen. Dies bedeutet, dass der Verkäufer für zwei Jahre die einwandfreie Qualität und Funktion des Produkts sicherstellen muss. Im Gegensatz dazu bezieht sich «Garantie» auf eine vertraglich zugesicherte Leistung und nicht auf die gesetzlich geregelte Gewährleistung. Im Rahmen einer vertraglichen Garantie kann ein Verkäufer die gesetzlichen Ansprüche erweitern oder einschränken. Beispielsweise kann er besondere Eigenschaften eines Produkts garantieren oder bei einem Defekt nur Reparaturen statt eines Austauschs anbieten. Zudem besteht die Möglichkeit, die gesetzliche Gewährleistung auszuschliessen.

Und letzteres dürfte auf die meisten in der Schweiz verkauften Neuwagen zutreffen, weshalb der Gewährleistungsfall für diesen Bericht nicht weiter von Bedeutung ist.

Der exakte Wortlaut der Garantiebestimmungen und damit Umfang der Garantieleistungen variieren zwischen den einzelnen Fahrzeugherstellern zum Teil erheblich. Die grundlegenden Kriterien für Garantieausschlüsse sind jedoch vermutlich weitgehend einheitlich geregelt. Am Beispiel der im Rahmen dieses Projektes umgerüsteten Fahrzeuge 1 und 2 ist den «Allgemeinen Geschäftsbedingungen Garantie» der «AMAG Import AG» folgendes geregelt:

Ausschluss der Garantie

«Fremdaufbauten, Fremdeinbauten und Fremdausbauten sowie Mängel am Fahrzeug, die durch diese verursacht wurden, sind von dieser Garantie nicht umfasst. Das gleiche gilt für Zubehör, das nicht werkseitig eingebaut und/ oder geliefert wurde.»

Und weiter:

«Ansprüche gegenüber dem Garantiegeber aus dieser Garantie sind schliesslich ausgeschlossen, wenn der Mangel dadurch entstanden ist, dass:

in das Fahrzeug Teile an- oder eingebaut worden sind, deren Verwendung der Garantiegeber nicht genehmigt hat oder das Fahrzeug in einer vom Garantiegeber nicht genehmigten Weise verändert worden ist (z. B. Tuning)»

Der Einbau der Fahrzeugeinheit (Vehicle Assembly) des kabellosen Ladesystems stellt zweifelsfrei einen Fremdeinbau dar, der nicht vom Garantiegeber genehmigt wurde. Darüber hinaus hat das kabellose Ladesystem neben der mechanischen Installation Schnittstellen zur Fahrzeugelektronik (CAN-Bus-System), zur Fahrzeugkühlung und zum Hochvoltsystem. Sollte es in einem dieser Systeme zu einer Fehlfunktion kommen, liegt es in erster Linie am Reparaturbetrieb zu entscheiden, ob ein kausaler Zusammenhang zwischen dem aufgetretenen Fehler und der Modifikation besteht. Sollte ein solcher Zusammenhang behauptet werden, ob begründet oder nicht, obliegt es dem Kunden oder dem Umrüster, das Gegenteil nachzuweisen.

Wie bei allen Umbauten besteht somit ein nicht unerhebliches Risiko, auf den Reparaturkosten sitzen zu bleiben oder zumindest das Verfahren zur Erlangung des Garantieanspruchs unnötig kompliziert und aufwändig zu gestalten.

Noch etwas kritischer verhält es sich mit der ergänzenden Garantie der Hochvoltbatterie. Diesem Kapitel der Garantierichtlinien der AMAG Import AG ist nämlich zu entnehmen, dass:

«Eine Garantieleistung für Hochvoltbatterien ist ausgeschlossen, wenn die Fehlfunktion oder der übermässige Verlust des Netto-Batterieenergieinhaltes dadurch entstanden ist, dass die Vorschriften über den Betrieb, die Behandlung und Pflege des Fahrzeugs (insbesondere die Pflegehinweise für das Laden und den Ladezustand der Hochvoltbatterie), die sich aus der dem Fahrzeug beigelegten Betriebsanleitung ergeben, nicht befolgt worden sind»



Da kabelloses Laden nicht Teil der Ladestrategie des Fahrzeugherstellers ist und somit auch nicht den Ladeempfehlungen der Betriebsanleitung entspricht, könnte daraus nahezu zwangsläufig ein kausaler Zusammenhang konstruiert werden. Besonders, da der Austausch einer Hochvoltbatterie mit hohen Kosten verbunden ist. Auch wenn das kabellose Laden aus technischer Sicht dem konventionellen AC-Laden mit 11 kW entspricht, birgt ein Defekt am Hochvoltsystem ein nicht unerhebliches Risiko für juristische Streitigkeiten hinsichtlich der Verantwortlichkeit für eine allfällige Kostenübernahme.

Die Autoren erachten es aus diesen Gründen für wichtig, dass vor Markteinführung von Nachrüstsystemen mit den betreffenden Fahrzeugherstellern respektive Importeuren entsprechende Verträge ausgearbeitet werden, um die Kostenübernahme und die jeweiligen Garantieleistungen vorab zu klären.

4.8 Labormessungen im Realbetrieb

Im Rahmen dieses Projekts wurde die Effizienz der kabellosen Energieübertragung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen im Realbetrieb eines strassenzugelassenen Fahrzeuges untersucht und mit der Effizienz des konduktiven Ladens verglichen. Alle im Folgenden dargestellten Wirkungsgrade beziehen sich dabei – sowohl für induktives als auch für konduktives Laden – auf den Grid-to-Battery-Wirkungsgrad. Ergänzend wurden Messungen der Netzqualität durchgeführt, um die Auswirkungen des Systems auf elektrische Versorgungsparameter zu analysieren.



Abbildung 48: Effizienzmessungen im Labor der Empa

4.8.1 Messungen der Übertragungseffizienz

Die Effizienz der Energieübertragung - vom Netzanschluss zur Fahrzeugbatterie - spielt eine zentrale Rolle in der Bewertung kabelloser sowie kabelgebundener Ladesysteme für Elektrofahrzeuge, da sie einen nicht unerheblichen Anteil an der Gesamteffizienz der Fahrzeuge hat. Um ein umfassendes Verständnis der Einflussfaktoren zu gewinnen, wurde ein vollständiges Effizienzkennfeld erstellt. Dieses basiert auf Messungen des Ladewirkungsgrads in Abhängigkeit von der Positionierung des Fahrzeugs relativ zum Ground Pad. Die gemessenen Positionen umfassten Variationen in beiden Achsen (x, y) und der z-Höhe. Die Theorie besagt, dass der Wirkungsgrad massgeblich von der idealen Ausrichtung und Platzierung des Fahrzeugs auf der Ladeplatte abhängt. Ziel dieser Untersuchung war es, die praktischen Auswirkungen der Positioniergenauigkeit des Fahrzeuges zu quantifizieren und daraus abzuleiten, was dies im praktischen Betrieb bedeutet.



4.8.1.1 Theorie zum Einfluss des Positionsversatzes auf den Wirkungsgrad

Ein Versatz der Empfängerspule relativ zur Senderspule reduziert den magnetischen Kopplungsfaktor. Damit steigt die für die induktive Energieübertragung erforderliche Blindleistung in den Resonanzkreisen und damit auch die Verluste in der sende- und empfangsseitigen Spule. Für die Blindleistung und damit auch für die Spulenverluste existiert eine einfache Theorie, welche besagt, dass diese umgekehrt proportional zum Kopplungsfaktor ansteigen.

Für die Kopplung zwischen planaren Spulen, unterlegt mit einer Ferritstruktur über einer metallischen Rückplatte, gibt es leider kein allgemein anwendbares mathematisches Modell. Der Kopplungsfaktor kann daher nur mittels Messungen am realen System oder per Computer-Simulation ermittelt werden. Simulationsresultate zeigen, dass der Kopplungsfaktor bei einem maximalen Versatz von $X = 100$ mm, $Y = 75$ mm gegenüber dem Null-Null-Versatz um ca. 30 % sinkt. Gemäss Theorie erhöhen sich damit die Spulenverluste ebenfalls um ca. 30 %. Nimmt man an, dass die Spulenverluste zwei Prozentpunkte der Gesamtverluste ausmachen, würden diese auf 2,6 Prozentpunkte ansteigen und die Effizienz um 0,6 Prozentpunkte abnehmen.

Nun steigen aber bei einem Versatz nicht nur die Spulenverluste, sondern auch die Verluste in den Schirmstrukturen des Fahrzeugunterbodens, in den Impedanzanpassnetzwerken, als auch in den Leistungsumrichtern, primär als Folge des Anstiegs der zu liefernden Blindleistung. Messungen an realen Systemen zeigen schliesslich, dass beim Maximalversatz die Gesamtsystemeffizienz um über einen Prozentpunkt, z.B. von 90 % auf 88,8 % sinken kann.

4.8.1.2 Setup Effizienzmessungen

Zur Durchführung der Messungen der Ladeeffizienz in Abhängigkeit von verschiedenen Fahrzeugpositionen wurde eine spezielle Testvorrichtung angefertigt. Diese ermöglicht es, das Fahrzeug mit einer Präzision von etwa ± 5 mm zu positionieren. Die Konstruktion besteht aus fest am Boden montierten Anschlägen, in die das Fahrzeug präzise eingefahren wird. Darüber hinaus kann die Position der Ladeplatte millimetergenau in allen Achsen angepasst werden, um reproduzierbare Messungen der Wirkungsgrade unter verschiedenen räumlichen Bedingungen zu gewährleisten. Abbildung 49 zeigt eine schematische Darstellung der Testvorrichtung.

Die Definition der Achsen orientiert sich an der Ausrichtung des Fahrzeugs und ist wie Abbildung 49 zeigt definiert. Es ist wichtig zu beachten, dass Verschiebungen des Ground Pads in spiegelverkehrter Weise erfolgten. Die Nomenklatur der Fahrzeugachsen lautet wie folgt:

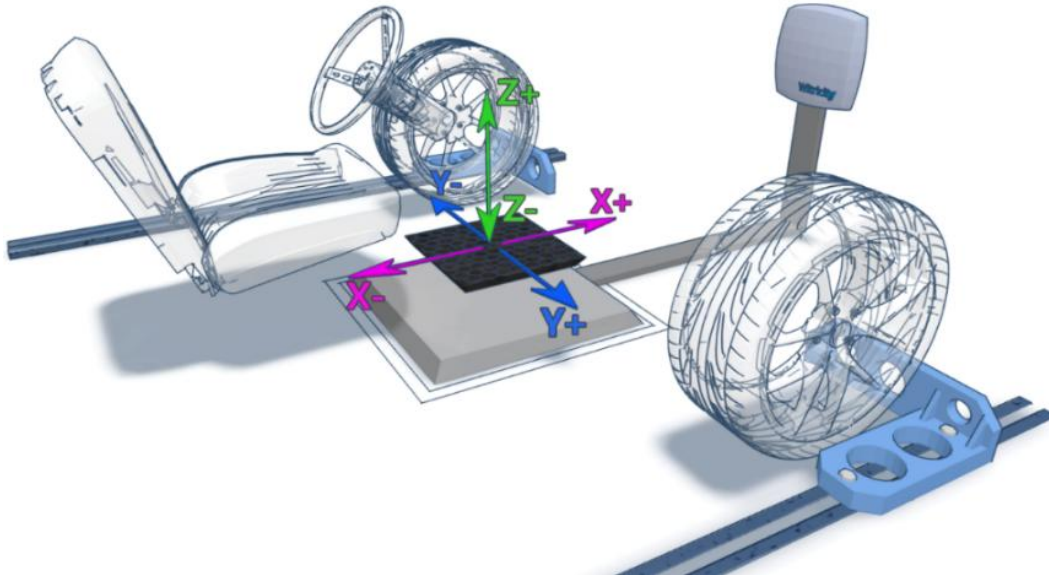


Abbildung 49: Testsetup für Effizienzmessungen

- Fahrzeuglängsachse, Verschiebung longitudinal vorwärts: X +
- Fahrzeuglängsachse, Verschiebung longitudinal rückwärts: X -
- Fahrzeugquerachse, Verschiebung lateral nach rechts: Y +
- Fahrzeugquerachse, Verschiebung lateral nach links: Y -
- Fahrzeughochachse, Verschiebung nach oben: Z +
- Fahrzeughochachse, Verschiebung nach unten: Z -

Dabei entspricht der Nullpunkt auf der Z-Achse ($Z = 0$) der Bodenfreiheit des Fahrzeugempfängers bei unbeladenem Fahrzeug. Diese sogenannte Basishöhe beträgt am untersuchten Fahrzeug ca. 160 mm und ist leicht abhängig vom Reifendruck und damit der Raum- und Reifentemperatur. Für die Messungen entlang der Längs- und Querachse wurde die Basishöhe gewählt.

4.8.1.3 Messgerät und Messstellen

Sämtliche Messungen wurden am dritten Prototypenfahrzeug dieses Projektes, dem VW ID.5 der Empa, durchgeführt. Dieses war ausgerüstet mit einer WiTricity Fahrzeugeinheit (VA) mit Seriennummer VWA11421024155000800. Werksseitig verfügte das Fahrzeug über eine 77 kWh Hochvoltbatterie vom Typ JCK-V02 mit Seriennummer 301022500 und über einen 11 kW On-Board-Charger vom Typ KL8-KLO mit der Seriennummer 93286VH4001BB.



Als Ladestation diente eine WiTricity Halo Wireless Charger WWA1103 Wall-Box (Seriennummer WWA11031023311000500) mit 11 kW Nennleistung sowie ein WiTricity Halo GWA1100 Ground Pad (Seriennummer GWA11001023279001300). Für die Effizienzmessungen des konduktiven Ladens wurde ein Juice Booster 2, mit maximal 22 kW und Seriennummer JB2292286421184 in Verbindung mit dem On-Board-Charger des Fahrzeuges genutzt. Zur Messung von Leistung respektive Energie wurde ein Power-Analyzer vom Typ Hioki PW8001-12 mit fünf Leistungsmessmodulen (Messwandler) vom Typ Hioki U7001 eingesetzt.

Zur Bestimmung des Ladewirkungsgrades wurden sowohl die Leistung des dreiphasigen Drehstromnetzes (AC) als auch die auf die Fahrzeugbatterie gespeiste Gleichstromleistung (DC) gemessen und über die Zeit integriert. Um die DC-Spannung präzise messen zu können, wurde die Hochvolt-Verkabelung des Fahrzeugs so modifiziert, dass Messungen am Heizmodul der Fahrgastzellenheizung vorgenommen werden konnten. Die fahrzeugseitige Strommessung erfolgte beim induktiven Laden zwischen der Vehicle-Assembly des kabellosen Ladesystems und der Hochvoltbatterie. Beim konduktiven Laden wurde die Messung zwischen dem On-Board-Charger und der Batterie durchgeführt. Der gemessene Ladewirkungsgrad entspricht somit in beiden Fällen dem Grid-To-Battery Wirkungsgrad und ergibt sich durch die Division der integrierten DC-Energie durch die integrierte AC-Energie ($\eta_{G2B} = \frac{E_{DC}}{E_{AC}} * 100 \%$).

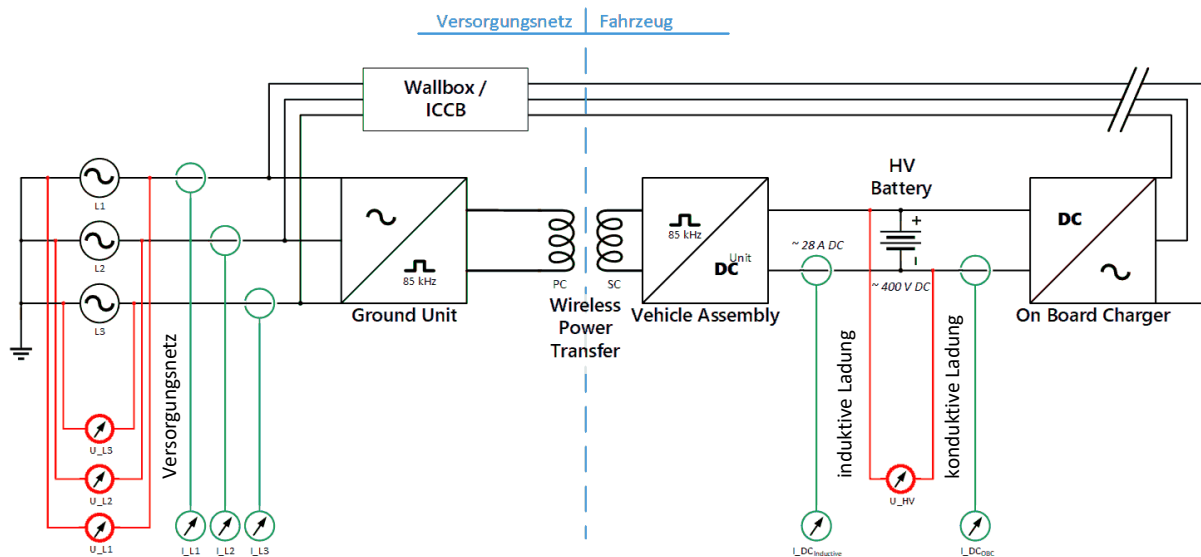


Abbildung 50: Schematische Übersicht der Messstellen zur Wirkungsgradmessung

Sämtliche Messungen erfolgten bei der vorgesehenen Nennleistung des Systems (11 kW); eine Leistungsreduktion wurde weder fahrzeug- noch netzseitig vorgenommen. Die effektive Ladeleistung ergab sich aus der Regelung durch das fahrzeugseitige Lademanagement und entsprach unter den geprüften Bedingungen bei Raumtemperatur weitgehend der Nennleistung.

Sämtliche Messpunkte basieren auf einem Ladehub von mindestens zwei Kilowattstunden, um eine aussagekräftige Mittelung zu gewährleisten. Zudem wurden, wo nicht anders erwähnt, alle Messungen mit der Basishöhe des Fahrzeuges gemessen, was einer Bodenfreiheit von 160 mm respektive einem Luftspalt von 115 mm entspricht.



4.8.1.4 Messgenauigkeit, Messunsicherheit und Reproduzierbarkeit

Prinzipien der Datenintegration

Das Hioki-Energiemessgerät erfasste Strom- und Spannungsdaten über alle Kanäle mit einer Abtastrate von 2,5 MHz. Die Energiemessung basiert auf der separaten Integration der Leistungswerte jeder Abtastung für positive und negative Polaritäten. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass auch kurzzeitige Schwankungen der Übertragungseffizienz in die Ergebnisse der Gesamtwirkungsgradberechnung einfließen.

Für die zeitaufgelösten Messungen wurde die Effizienz auf Basis eines gleitenden Durchschnitts der erfassten Messpunkte berechnet, wobei eine Datenaktualisierungsrate von 100 Hz angewendet wurde. Anschliessend wurden diese Werte erneut gleitend gemittelt und zur Optimierung des Datenvolumens mit einer reduzierten Rate von 10 Datenpunkten pro Sekunde aufgezeichnet. Diese doppelte Mittelung kann bei signifikanten und schnellen Schwankungen von Strom und Spannung zu geringfügigen Abweichungen gegenüber den vom Gerät integrierten Daten führen. Dies betrifft jedoch nur die Darstellung in zeitaufgelösten Grafiken sowie Box-Plots. Alle anderen Effizienzbetrachtungen basieren auf den integrierten Energiewerten des Leistungsanalysators.

Messunsicherheit

Das Messgerät verfügt über die gesamte Messkette über eine Grundgenauigkeit von $\pm 0,02\%$ vom Messwert plus $0,05\%$ vom Messbereich. In der Anwendung gemäss diesem Bericht ergibt sich daraus ein maximaler Fehler von 19,33 W DC respektive 32,64 W AC, was einem totalen Fehler der gesamten Messkette von maximal $0,09\%$ Wirkungsgrad entspricht.

Tabelle 5: Messgerätespezifische Messunsicherheit

| | Anzeige- wert | Mess- bereich | Max. Fehler MW | max. Feh- ler Range | max. Fehler | Sollwert Leistung | Istwert Leistung | max. Fehler Leistung | |
|----|------------------|------------------|-------------------|------------------------|----------------|----------------------|---------------------|-------------------------|---------|
| DC | Strom | 28 A | 40 A | 0,02 % | 0,05 % | 0,0256 A | 9800 W | 9819,3 W | 19,33 W |
| | Spannung | 350 V | 600 V | 0,02 % | 0,05 % | 0,370 V | | | |
| AC | Strom | 16 A | 40 A | 0,02 % | 0,05 % | 0,0232 A | 11040 W | 11072,6 W | 32,64 W |
| | Spannung | 230 V | 600 V | 0,02 % | 0,05 % | 0,346 V | | | |

Das reale Konfidenzintervall wurde auf Basis einer Messreihe von insgesamt 9 Messungen desselben Betriebspunktes (zentrale Ausrichtung) ermittelt. Die Messungen fanden an unterschiedlichen Tagen statt und umfassten verschiedene initiale SOC-Werte sowie Lade-Hübe. Für jede Messung wurde das Fahrzeug individuell auf dem Ground Pad positioniert, wodurch gewährleistet ist, dass Einflussfaktoren wie die Positionierungsgenauigkeit des Fahrzeugs im Alltagsbetrieb in die Auswertung einbezogen wurden.

Tabelle 6 bietet eine Übersicht der durchgeführten Messungen zur Bestimmung des Konfidenzintervalls. Die Spalte « η eff.» repräsentiert die gemessene Grid-To-Battery-Effizienz über die gesamte Messdauer. In den Spalten « η 10s max.» und « η 10s min.» sind die höchsten bzw. niedrigsten Effizienzdaten aufgeführt, die als gleitender Mittelwert über einen Zeitraum von 10 Sekunden kontinuierlich erfasst wurden. Diese Werte dienen zur Beurteilung der Stabilität der Energieübertragung während des Ladevorgangs, haben jedoch nur begrenzte Relevanz für die tatsächlich erreichte Ladeeffizienz. Beispielsweise fällt « η 10s min.» deutlich niedriger aus, da das System zu Beginn des Ladevorgangs während des Hochfahrens der Leistung kurzfristig einen geringeren Wirkungsgrad aufweist.



Tabelle 6: Reproduzierbarkeit der Effizienzmessungen

| Test Nummer | G2B Eff. [%] | η 10s max. [%] | η 10s min. [%] | Start SOC [%] | End SOC [%] | U DC Ø [V] | Ladehub [% SOC] | Dauer [hh:mm:ss] |
|-------------|--------------|---------------------|---------------------|---------------|-------------|------------|-----------------|------------------|
| 03 | 89,91 | 90,41 | 78,60 | 34 | 80 | 366,5 | 46 | 03:40:01 |
| 13 | 90,18 | 90,35 | 77,18 | 51 | 57 | 362,7 | 6 | 00:42:35 |
| 20 | 90,04 | 90,49 | 76,77 | 43 | 62 | 362,1 | 19 | 01:44:29 |
| 21 | 90,08 | 90,40 | 76,43 | 26 | 33 | 349,0 | 7 | 00:52:22 |
| 25 | 90,02 | 90,31 | 74,95 | 58 | 65 | 371,8 | 7 | 00:38:46 |
| 29 | 90,16 | 90,36 | 75,52 | 54 | 57 | 365,3 | 3 | 00:23:22 |
| 34 | 90,04 | 90,20 | 75,72 | 82 | 86 | 388,9 | 4 | 00:15:23 |
| 37 | 90,09 | 90,68 | 78,63 | 44 | 45 | 355,3 | 1 | 00:24:20 |
| 68 | 89,82 | 90,35 | 78,41 | 87 | 91 | 392,6 | 4 | 00:21:45 |

Aus der statistischen Analyse dieser Messreihe lassen sich folgende Parameter ableiten:

- Mittelwert: 90,04 %
- Median: 90,04 %
- Maximalwert: 90,18 %
- Minimalwert: 89,82 %
- Standardabweichung: 0,11 %
- 95 %-Vertrauensintervall: 0,07 %

Das so ermittelte Konfidenzintervall von 0,07 % Wirkungsgrad deckt sich also mit 0,09 % Messunsicherheit der Messkette und zeigt, dass die Effizienz in der praktischen Anwendung mit sehr hoher Genauigkeit gemessen werden kann.

4.8.1.5 Ergebnisse der Wirkungsgradmessungen

Zur Einordnung der nachfolgenden Wirkungsgradresultate zeigt Abbildung 51 beispielhaft den zeitaufgelösten Verlauf zweier Ladungen und stellt dabei induktives (rot) und induktives (grün) Laden direkt gegenüber. Die Darstellung ist in Leistung, Spannung und Grid-to-Battery-Effizienz gegliedert. Der Plot verdeutlicht, dass die Ladeleistung über die Messdauer weitgehend konstant bleibt und sich die netz- und fahrzeugseitigen Grössen stabil verhalten. Die Differenz zwischen netzseitiger und fahrzeugseitiger Leistung entspricht den Systemverlusten und spiegelt sich in einer über die Zeit nahezu konstanten Grid-to-Battery-Effizienz wider. Die Verlustanteile verteilen sich erfahrungsgemäss näherungsweise auf PFC (~1,5 %), GA DC/DC Konverter (~1,5 %), Inverter (~2 %), magnetischen Resonanzkreis (~2,5 %), Gleichrichter (~0,5 %), VA DC/DC Konverter (~2 %).

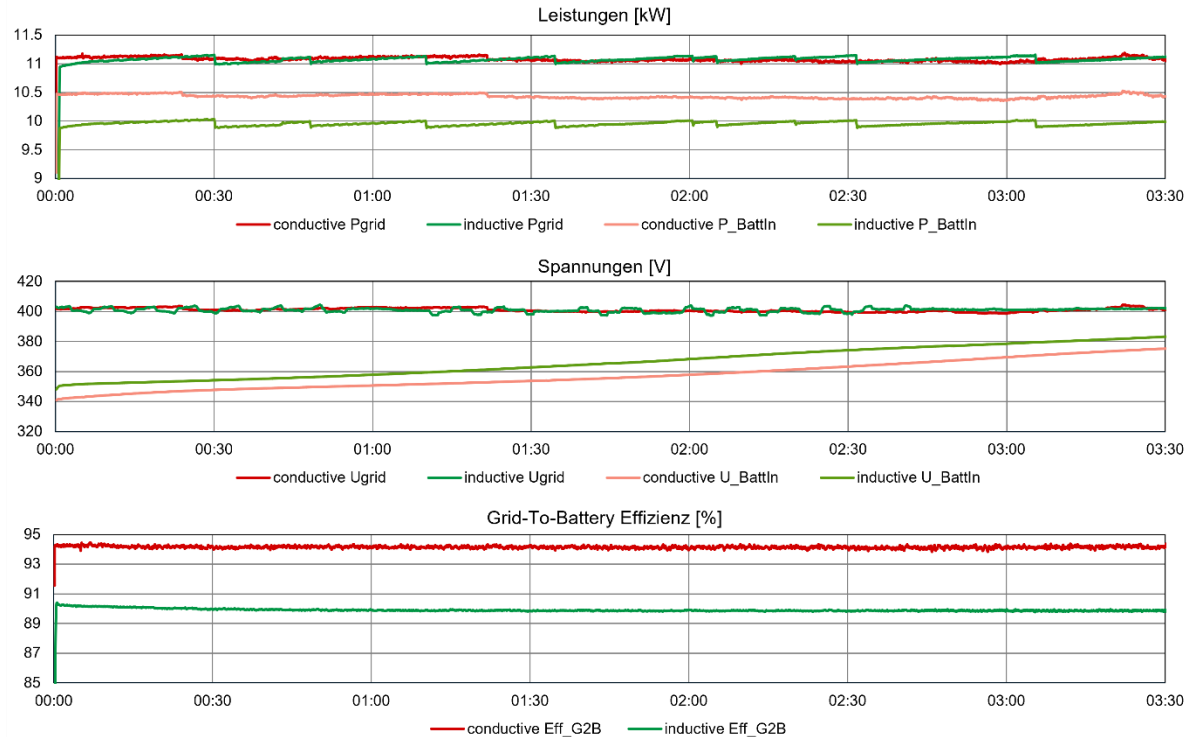


Abbildung 51: Zeitaufgelöster Verlauf einer beispielhaften Ladung

Einfluss von Längs- und Querachsenabweichungen auf den Ladewirkungsgrad

Das WiTricity System ist darauf ausgelegt, Fahrzeugpositionsabweichungen von bis zu ± 100 mm in der Querachse und ± 75 mm in der Längsachse relativ zum Nullpunkt (zentrale Platzierung) zu tolerieren. Überschreiten die Abweichungen diesen Bereich, wird der Ladevorgang nicht mehr zugelassen. Innerhalb des spezifizierten Toleranzbereichs wurde der Wirkungsgrad in einem Raster von 40 mm gemessen, wobei an den Endpunkten der Y-Achse ein feineres Raster von 20 mm verwendet wurde.

Der Einfachheit halber wurde auch auf der Längsachse (X-Achse) der Messpunkt bei 80 mm gewählt, obwohl die Energieübertragung eigentlich nur bis zu einem X-Offset von 75 mm vom Positioniersystem freigegeben wird.

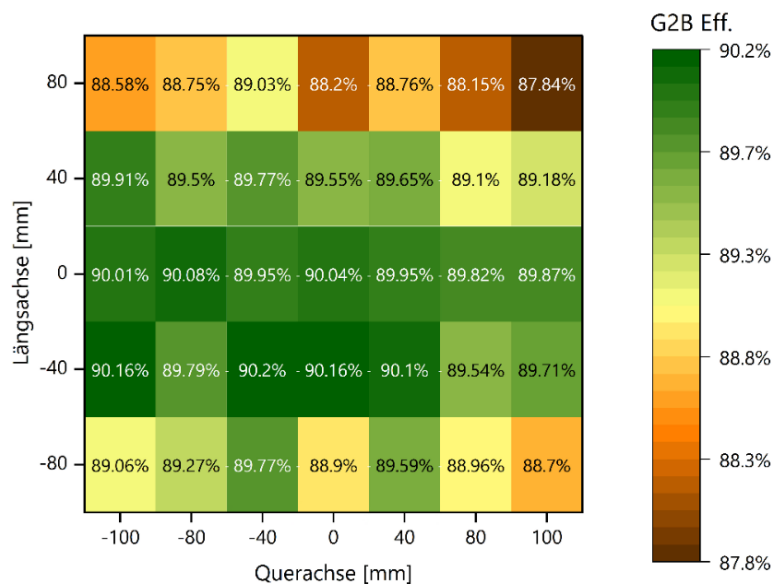


Abbildung 52: Einfluss Längs- und Querachsenabweichungen auf G2B-Wirkungsgrad

Abbildung 52 veranschaulicht die Grid-To-Battery-Wirkungsgrade (G2B-Effizienz) in Abhängigkeit von verschiedenen Fahrzeugpositionen. Das kabellose Ladesystem zeigt insgesamt eine robuste Toleranz gegenüber Abweichungen in Längs- (X) und Querachse (Y). Über einen weiten Bereich wird ein Wirkungsgrad von etwa 90 % oder geringfügig darunter erreicht. Lediglich in den Eck- und X-Randbereichen fällt die Effizienz auf Werte unter 89 %. Die Messergebnisse reflektieren die vom Hersteller und in den Normen (z.B. IEC 61980) spezifizierte Positioniertoleranz, welche in Querrichtung (Y) ± 100 mm und in Längsrichtung (X) lediglich ± 75 mm beträgt. Diese Ungleichheit begründet sich in den Abmessungen der rechteckförmigen Senderspule im Ground Pad. Mit einer quadratischen Spule wäre die Toleranz in beide Richtungen gleich. Mit Ausnahme des Messpunkts bei Y = 100 mm, X = 80 mm (vorne rechts) liegen alle ermittelten Wirkungsgrade innerhalb des vom Hersteller definierten Wirkungsgradbereichs (siehe Absatz 2.5) von 88 % bis 92 %.

Da sich das System innerhalb des vom Endnutzer definierten Bereichs äusserst stabil verhält, wurden zusätzliche Messpunkte ausserhalb des vom Hersteller spezifizierten Bereichs aufgenommen. In der Längs- und Querachse wurden hierfür jeweils zwei zusätzliche Offsets im Abstand von 20 mm gemessen. Dies wurde durch die softwareseitige Deaktivierung der vom Hersteller implementierten Positions-Detektion (PD) ermöglicht. Obwohl diese Messungen für den Normalbetrieb keine Relevanz besitzen, da der Ladevorgang gar nicht starten würde, liefern sie wertvolle Erkenntnisse über die Robustheit der Energieübertragung unter Grenzbedingungen. Dabei ist auch zu erwähnen, dass die Sicherheit, die Kompatibilität des Systems mit gewissen EMV-Normen sowie die spezifizierte Leistung bei diesen X- und Y-Offsets nicht mehr garantiert werden kann, da das induktive Ladesystem nicht für solche Betriebsbedingungen ausgelegt wird.

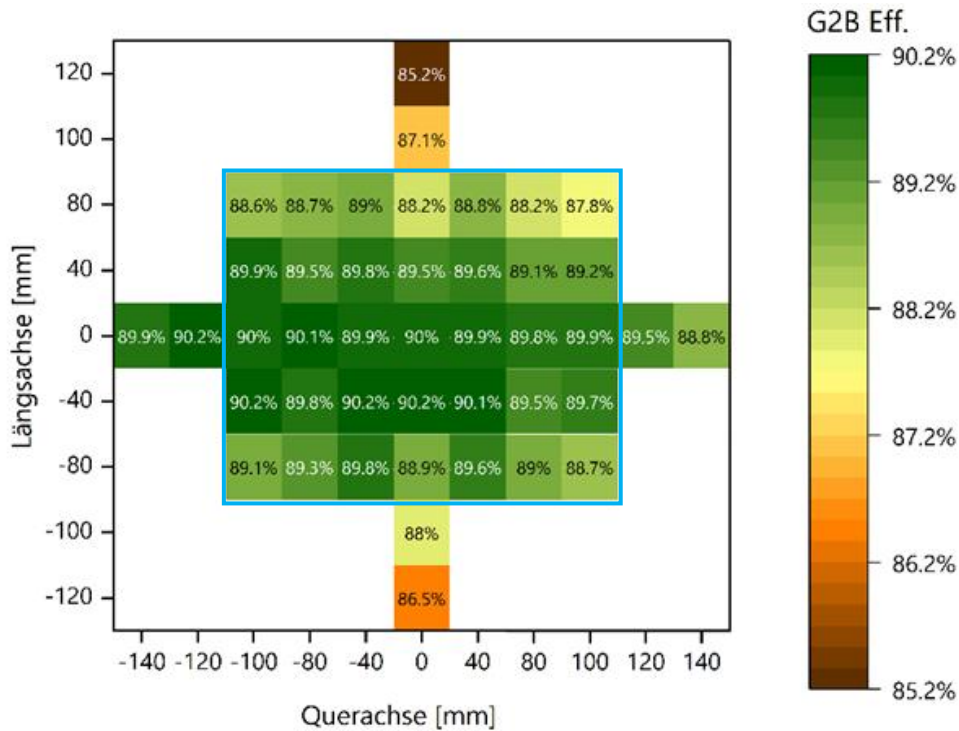


Abbildung 53: Einfluss Längs- und Querachsenabweichungen auf G2B-Wirkungsgrad (erweitert)

Abbildung 53 zeigt erneut die Grid-to-Battery-Effizienzen innerhalb des zulässigen Bereichs (blaues Rechteck), erweitert um die Messpunkte ausserhalb dieses Bereichs.

Die separate Betrachtung des Effizienzverlaufes entlang der einzelnen Fahrzeugachsen (Abbildung 54) zeigt noch deutlicher als in Abbildung 53, dass der Effizienzabfall in der Querachse wesentlich flacher verläuft als in der Längsachse. Die Boxen repräsentieren die Streuung der mittleren 50 % der Datenpunkte (Interquartilsabstand, IQR), während die Whisker den Streubereich der mittleren 75 % der Datenpunkte darstellen.

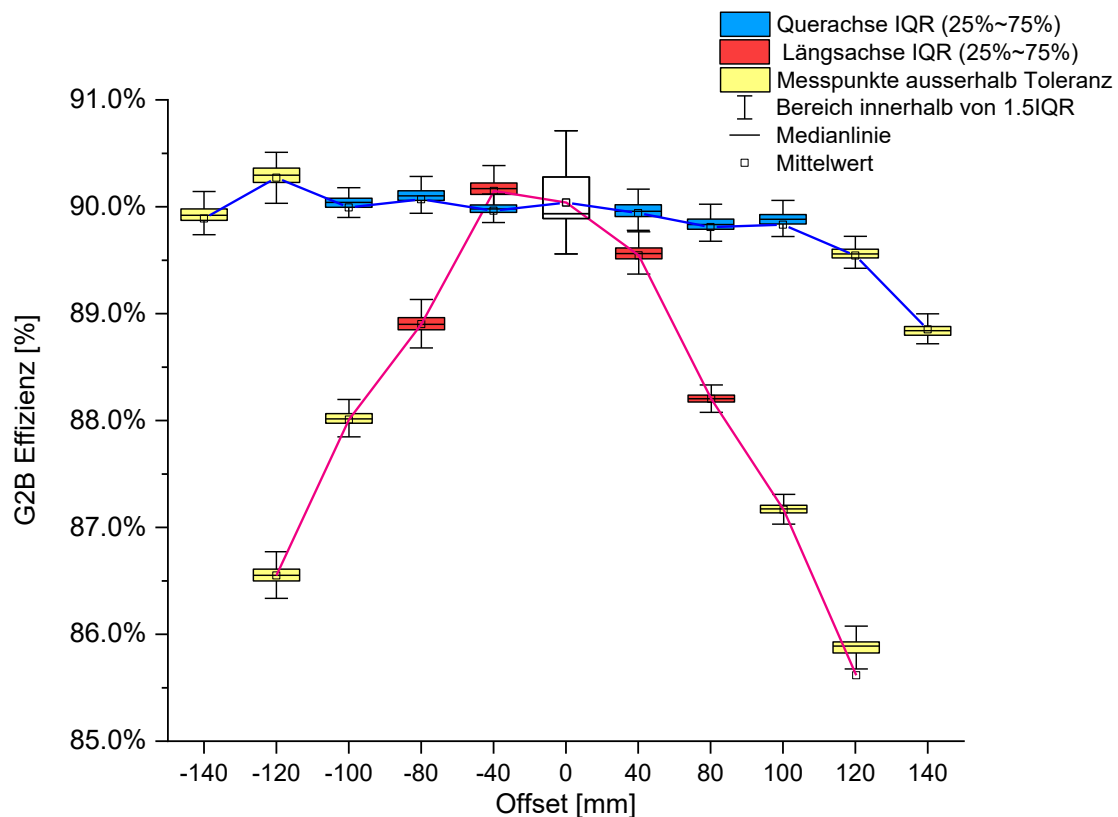


Abbildung 54: Effizienzverlauf in Längs- und Querrichtung über den erweiterten Offset-Bereich

Um das System zu schützen und eine übermässige Erwärmung des Fahrzeugunterbodens zu vermeiden, wurde von Messungen in Betriebspunkten, die noch weiter ausserhalb des zulässigen Bereichs liegen, abgesehen. Dennoch ist anzunehmen, dass die kuppelförmige Charakteristik der Effizienzkurve der Längsachse sich auch in der Querachse fortsetzen würde.

Diese Messungen zeigen, dass das getestete induktive Ladesystem auch ausserhalb des üblichen Betriebsfensters noch sehr gute Wirkungsgrade erzielt und somit für den Alltagseinsatz über genügend Reserven verfügen dürfte. Der spezifizierte Fahrzeugpositionsbereich könnte unter Umständen noch erweitert werden. Dafür wäre aber zu prüfen, ob dabei die Sicherheit, die Einhaltung relevanter EMV-Anforderungen sowie die spezifizierte Leistung weiterhin gewährleistet bleiben. Dies hätte den Vorteil, dass die Anforderungen an das genaue manuelle Parkieren abnehmen. Umgekehrt könnte ein Positionierfehler aber auch durch einen an die Positionsdetektion (PD) gekoppelten Parkassistenten deutlich reduziert werden, sodass im Normalfall mit maximaler Effizienz geladen werden kann. Da viele modernen Fahrzeuge ohnehin über Parkassistentenfunktionen verfügen, ist davon auszugehen, dass das semi-automatische Parkieren mit Markteinführung solcher Ladesysteme bereits implementiert sein wird.

Einfluss von Hochachsenabweichungen auf den Ladewirkungsgrad

Zur Variation des vertikalen Abstands zwischen der Fahrzeugeinheit und des Ground Pads wurde das Fahrzeug mithilfe der Positionierungshilfe (siehe Absatz 4.8.1.2) auf Platten gefahren (positiver Z-Offset) beziehungsweise das Ground Pad durch Unterlegen angehoben (negativer Z-Offset). Der Verlauf der gemessenen Effizienz in Funktion des Z-Offsets ist in Abbildung 55 graphisch dargestellt.

Eine Anhebung des Fahrzeuges in Z-Richtung um 20 mm, ausgehend von einer Basishöhe von ca. 160 mm, führt zu einem Wirkungsgradverlust von etwa 0,6 %, während eine Verringerung der Bodenfreiheit um 20 mm den Wirkungsgrad um etwa 0,2 % steigert.



Eine weitere Reduktion des Abstands zeigt jedoch eine gegenteilige Entwicklung, wobei der Wirkungsgrad bei einem Z-Offset von -60 mm mit rund 87,8 % einen Tiefpunkt erreicht. Dies erklärt sich damit, dass die Fahrzeugeinheit und insbesondere das empfangsseitige Impedanz-Anpass-Netzwerk (IMN) für eine Höhenvariation im Bereich von 140 mm bis 180 mm ausgelegt wurde. Da eine Fahrzeugeinheit den unterschiedlichen Fahrzeugtypen - mit mehr oder weniger Bodenfreiheit - angepasst werden kann, ist somit davon auszugehen, dass auch bei leicht höher oder leicht tiefer liegenden Fahrzeugen ähnliche Effizienzwerte erreicht werden können.

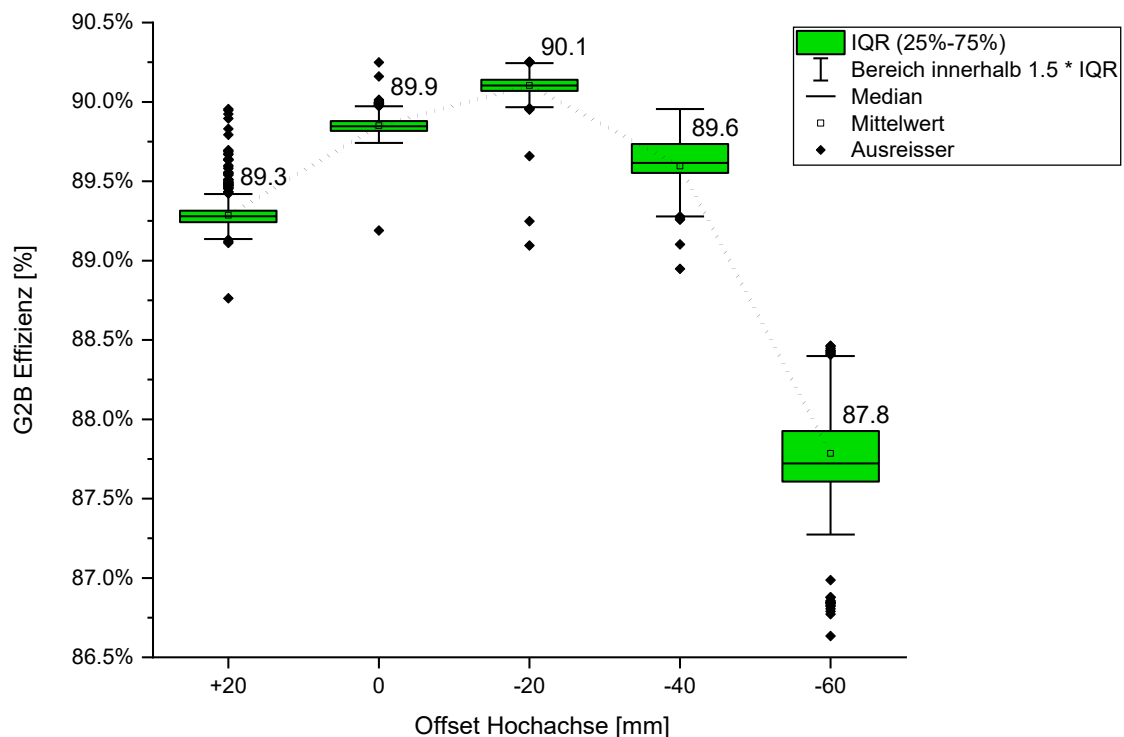


Abbildung 55: Effizienzverteilung auf der Hochachse (Z-Offset)

Vergleich mit induktivem Laden

Zur besseren Einordnung der Wirkungsgradmessungen des kabellosen Ladesystems wurden ergänzend Grid-To-Battery Referenzmessungen mit dem originalen induktiven Ladesystem des Fahrzeugs durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit der Messreihen zu gewährleisten, erfolgten diese unter identischen Umgebungsbedingungen wie die Messungen mit dem drahtlosen System. Sowohl Raumtemperatur (23°C) und Konditionierungszeit als auch die Fahrzeugvorbereitung waren dabei konsistent und vergleichbar.

Abbildung 56 zeigt in Blau die Ergebnisse der Referenzmessungen mit dem konventionellen, kabelgebundenen Ladesystem und in Pink die Messungen des kabellosen Systems in zentrierter Positionierung (Null-Offset).

Der kabelgebundene On-Board-Charger des VW ID.5 erreicht mit einem Wirkungsgrad von etwas über 94 % eine überdurchschnittliche gute Effizienz im Vergleich zur Stichprobe der Green-NCAP-Daten (siehe Abbildung 57). Auch das kabellose System erzielt im Mittel beachtliche 90 % und liegt damit klar innerhalb der Herstellerspezifikationen.

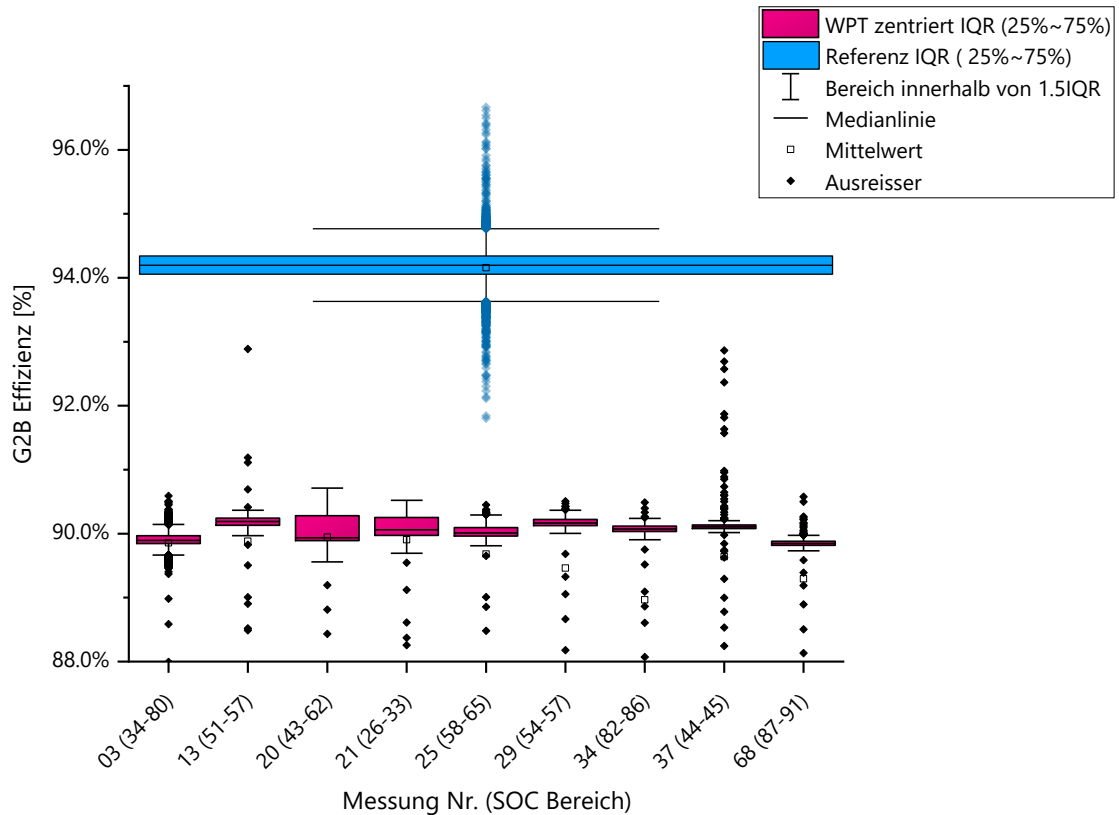


Abbildung 56: Vergleich mit konduktivem Laden

4.8.1.6 Fazit Energieeffizienz

Die Untersuchung der Energieeffizienz eines kabellosen Ladesystems liefert sehr zufriedenstellende Ergebnisse und wertvolle Erkenntnisse.

Die Grid-to-Battery-Effizienz, gemessen an einem im Realbetrieb eingesetzten Fahrzeug, zeigt bei genauer Fahrzeugpositionierung (Null-Offset) beachtliche Werte von leicht über 90 %. Sie verändert sich zudem innerhalb des spezifizierten Toleranz-Bereichs nur unwesentlich. Dabei fällt der Effizienzverlust in der Querachse schwächer aus als in der Längsachse. Selbst ausserhalb des freigegebenen Bereichs liefert das System weiterhin akzeptable Übertragungseffizienzen.

Ein genauer Blick auf den zweidimensionalen Effizienzverlauf (Abbildung 52) zeigt, dass nur in Eck- und X-Randbereichen ein Wirkungsgrad unter 89 % resultiert. Besonders hervorzuheben ist die geringe Variation in der Querachse. Zusätzliche Messungen ausserhalb der freigegebenen Bereiche konnten die Robustheit des Systems bestätigen.



Zur Einordnung der erzielten Wirkungsgrade werden diese in Abbildung 57 mit 20 Serien-Fahrzeugen verglichen. Seitens der Fahrzeughersteller werden üblicherweise keine Grid-To-Battery Wirkungsgrade veröffentlicht. Aus diesem Grund wurde auf bisher unveröffentlichte Daten des Green-NCAP¹ Konsortium zurückgegriffen.

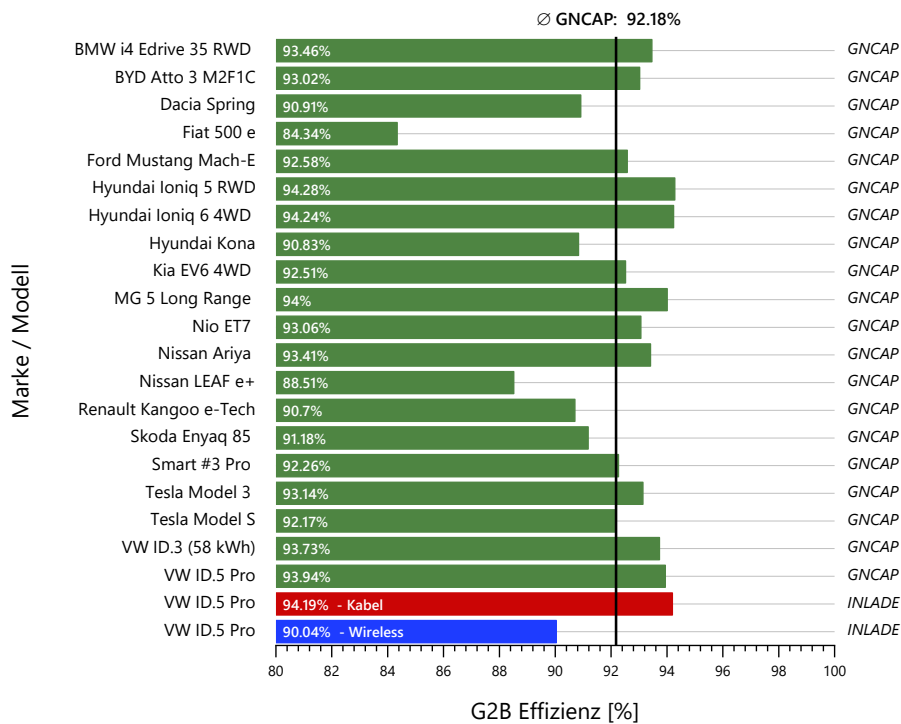


Abbildung 57: Vergleich Ladeeffizienz Serienfahrzeuge (Quellen: Green NCAP & INLADE-Projekt)

Die Analyse der im Green-NCAP-Projekt getesteten Serienfahrzeuge (in grün dargestellt) zeigt eine grosse Bandbreite an G2B-Effizienzen des konduktiven Ladens, die von etwa 84,3 % beim Fiat 500 e bis zu 94,3 % beim Hyundai Ioniq 5 reicht. Die durchschnittliche Ladeeffizienz der insgesamt 21 getesteten Fahrzeuge liegt bei etwa 92,2 %. Dabei weist der getestete VW ID.5 (in rot) mit einer Effizienz von ~ 94,2 % einen überdurchschnittlich hohen Wert auf. Zudem zeigt sich, dass das kabellose System (in blau) mit einem Wirkungsgrad von rund 90 % auf Augenhöhe zu konventionellen Ladesystemen steht.

Die Ergebnisse des VW ID.5 aus dem Green-NCAP-Datensatz (93,94 %) korrelieren zudem eng mit den im Rahmen dieses Berichts durchgeführten Messungen (94,19 %). Die geringfügig niedrigere Ladeeffizienz im Green NCAP-Datensatz lässt sich darauf zurückführen, dass dort ein vollständiger Ladehub (0 – 100 % SOC) betrachtet wird, wobei die Wirkungsgrade zu Beginn und am Ende der Ladung aufgrund der reduzierten Ladeleistung leicht abnehmen.

Insgesamt zeigt das kabellose Ladesystem eine robuste und effiziente Energieübertragung, welche den Angaben des Herstellers entspricht.

¹ Green NCAP ist ein Bewertungsprogramm, das die Umweltfreundlichkeit von Fahrzeugen untersucht. Es wird vom European New Car Assessment Programme (Euro NCAP) in Zusammenarbeit mit verschiedenen europäischen Regierungen betrieben. Die Organisation kooperiert mit Testlaboren in acht europäischen Ländern. Als Teil dieses Programms führt die Empa eigenständig Fahrzeugmessungen für das Konsortium durch. Dadurch erhält sie Zugang zu den Resultaten und ist berechtigt, diese in ihren eigenen Berichten zu verwenden.



4.8.2 Netzurückwirkungen und deren Auswirkungen auf die Netzqualität

Im Rahmen der Untersuchungen der drahtlosen Ladestation wurde auch untersucht, ob das Ladegerät potenzielle Beeinträchtigungen der Strom- und Spannungsversorgung verursacht und dadurch sensible Geräte stören könnte. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf möglichen Wechselwirkungen mit Systemen wie zum Beispiel der Powerline-Kommunikation, die auf eine stabile und störungsfreie Netzumgebung angewiesen sind. Insbesondere die Powerline-Kommunikation kann durch nicht harmonische Spannungsanteile im Verteilnetz gestört werden, was die Signalübertragung empfindlich beeinträchtigen und zu Kommunikationsproblemen führen kann.

Hierzu wurden Untersuchungen zu drei zentralen Aspekten der Netzstabilität durchgeführt: elektrische Spannungsschwankungen (Flicker), der Frequenzanalyse der Oberwellen mittels der Fourier Analyse FFT (Fast Fourier Transformation) sowie die Messung des Gesamtklirrfaktors (THD). Diese Ansätze ermöglichen es, sowohl zeitlich variierende Spannungsschwankungen als auch spektrale Verzerrungen im Netz gezielt zu analysieren und deren Einfluss zu bewerten.

Dabei zeigten Flicker, FFT und THD-Analyse keine Auffälligkeiten und bewegen sich auf üblichem Niveau von Leistungselektroniken dieser Leistungsklasse. Es sind somit keine negativen Auswirkungen des drahtlosen Ladesystems auf andere im gleichen Niederspannungsnetz angeschlossenen Gerätschaften zu erwarten. Details zu diesen Messungen sind im Anhang 10.9 dieses Berichtes zu finden.

4.8.3 Einfluss von Umwelt- und Wetterbedingungen

Die Effizienz der drahtlosen Energieübertragung kann durch verschiedene Umweltfaktoren beeinflusst werden. Besonders extreme Wetterbedingungen wie Schnee, Eis, Regen und Temperaturschwankungen im Bereich von -10°C bis 35°C , wie sie im Schweizer Klima vorkommen, können die Leistung und Stabilität des induktiven Ladens beeinträchtigen. Durch Messungen wurden die Auswirkungen dieser Faktoren untersucht. Dabei standen sowohl thermische Einflüsse als auch die elektromagnetische Absorption von Wasser und Eis im Fokus.

4.8.3.1 Einfluss der Umgebungstemperatur

Für die Umweltsimulation wurden die Ladestation und das Fahrzeug im Klimaprüfstand der Empa aufgebaut. Diese Klimakammer ermöglicht die Temperatur und Luftfeuchte in einem Bereich von -20°C bis $+40^{\circ}\text{C}$ zu regeln. Da sich in dieser Prü fzelle ein Rollenprüfstand für Emissions- und Verbrauchsmessungen befindet, war es nicht möglich, das Fahrzeug auf der Ladestation so zu platzieren, dass eine exakte Ausrichtung aller Achsen (analog Absatz 4.8.1.2) möglich war. Aus diesem Grund wurde als Referenzmessung mit diesem Setup ebenfalls eine Ladung bei 23°C durchgeführt, wobei das Fahrzeug mithilfe der Positionserkennung des kabellosen Ladesystems möglichst zentral parkiert wurde.

Der ermittelte Wirkungsgrad von 89,96 % weicht nur unwesentlich von jenem bei Raumtemperatur ab (90,04 %, vgl. Absatz 4.8.1.4).

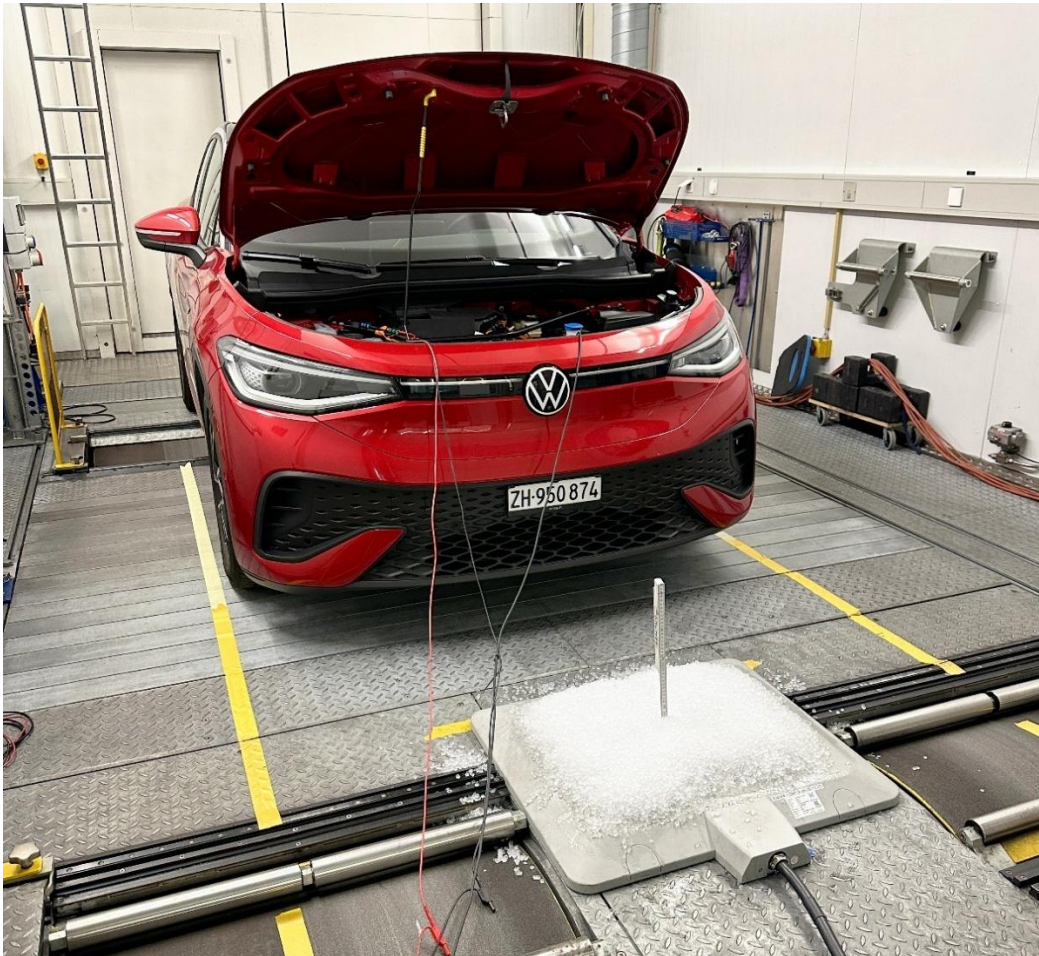


Abbildung 58: Das Ground Pad mit 6 cm dicker Eisschicht in Klimazelle

Wie Abbildung 59 zeigt, hat die Umgebungstemperatur wenig Einfluss auf die Effizienz der kabellosen Ladung. Bei kalten Temperaturen von -10°C steigt die Effizienz gar von rund 89,96 % auf 90,21 % an. Die Autoren gehen davon aus, dass dies auf die höhere Effizienz der Leistungselektronik bei kalten Temperaturen zurückzuführen ist. Dies bestätigt auch der leichte Abfall der Effizienz bei 35°C auf 89,75 %.

4.8.3.2 Einfluss von Schnee und Eis

Bei -10°C wurde zudem eine Messung unter simulierten Schnee- bzw. Eisbedingungen durchgeführt (siehe Abbildung 58). Aufgrund projektbedingter Verzögerungen konnten die Messungen erst Ende April bzw. Anfang Mai stattfinden, sodass natürlicher Schnee nicht verfügbar war. Stattdessen wurde die Ladeplatte zunächst mit einer dünnen Eisschicht von wenigen Millimetern bedeckt, die mit einer Sprühflasche aufgebracht wurde. Anschliessend wurde eine etwa 6–7 cm dicke Schicht aus Crushed-Ice darüber verteilt. Um die Stabilität der Eisschicht zu gewährleisten und ein Verrutschen zu verhindern, wurde das Eis erneut mit Wasser besprüht und dadurch verfestigt. Das Ergebnis war eine etwa 6 cm dicke, kompakte und stabile Eisschicht, deren Dichte und Konsistenz erheblich höher sind als jene von natürlichem Schnee. Daher kann dieser Test als ein Winter-Worst-Case-Szenario betrachtet werden.

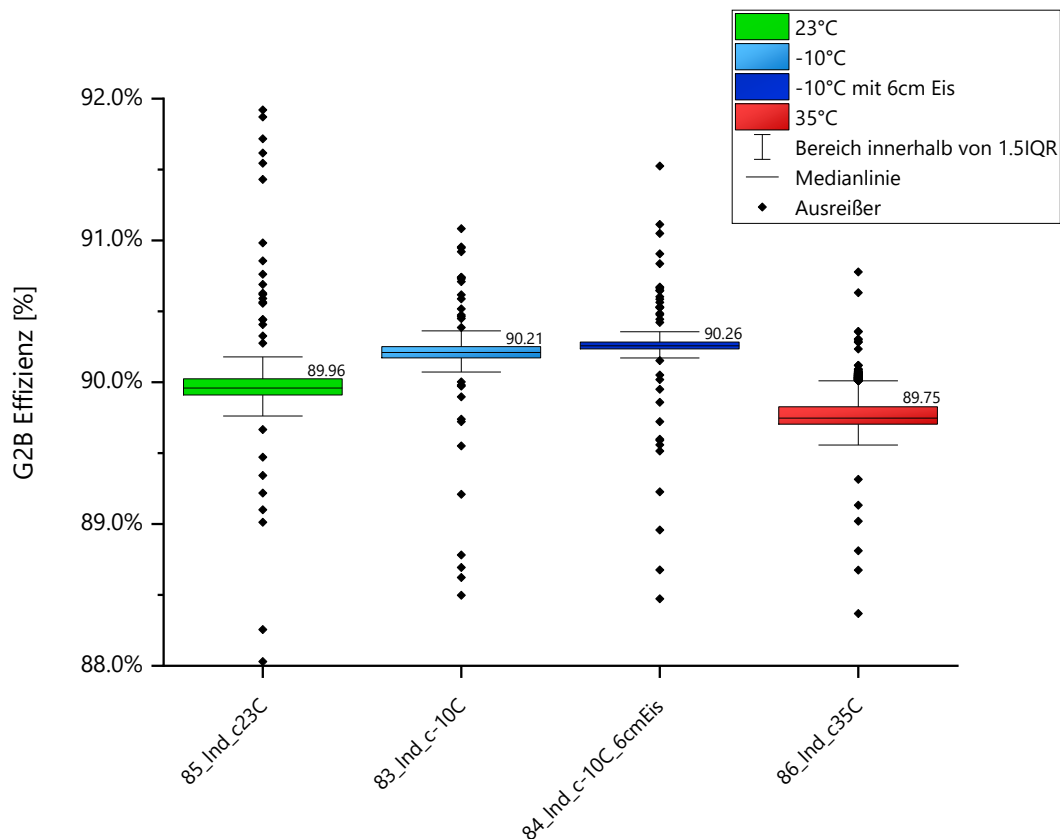


Abbildung 59: Einfluss von Wetter- und Umgebungsbedingungen auf die Übertragungseffizienz

Wie in Abbildung 59 ersichtlich, liegt der Wirkungsgrad bei vereister Ladeplatte sogar geringfügig höher als bei -10°C ohne Eis. Die Differenz von 0,05 % bleibt jedoch unterhalb des in Absatz 4.8.1.4 definierten Konfidenzintervalls von 0,07 %. Dies entspricht der theoretischen Erwartung, dass Wasser elektromagnetische Wellen mit einer Frequenz von 85.5 kHz – der Übertragungsfrequenz des drahtlosen Systems – kaum absorbiert. Die niedrigste Resonanzfrequenz eines freien Wassermoleküls liegt erst bei 22,2 GHz (Wikipedia, 2025).

4.8.3.3 Verhalten der drahtlosen Ladung bei Regen

Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, absorbiert Wasser im relevanten Frequenzbereich kaum elektromagnetische Strahlung. Dies wurde auch in einem Praxistest bestätigt, bei dem ein Ladevorgang während anhaltendem Regen durchgeführt wurde. Dabei trat jedoch ein anderes Phänomen auf: Die Sicherheitsfunktion des Ladegeräts, die sogenannte Living Object Detection (LOD), unterbricht den Ladevorgang, sobald ein Objekt sich dem Randbereich des Ground Pad nähert.

Während FOD nur metallische Objekte auf der Oberfläche des Ground Pad erkennt, spricht LOD auf Objekte aller Materialien (metallische und dielektrische) an, welche sich in der peripheren Zone des Ground Pad bewegen. Die LOD-Sensorik ist in den abgeschrägten Rändern des Kunststoffdeckels des Ground Pad integriert. Ein tropfender Fahrzeugunterboden (bei Regen oder Kondenswasseraustritt) kann daher potenziell ein LOD-Ereignis auslösen, falls Tropfen in diese sensitiven Zonen fallen, was zum Abbruch des Ladevorgangs führt. Zwar verfügt das WiTricity LOD über eine Wasser-Diskriminierungsfunktion, diese arbeitet aber nicht 100 % zuverlässig. Im Gegensatz zu FOD erfolgt nach einem LOD-Ereignis ein automatischer Neustart nach definierter Auszeit, womit die Ladung zwar verzögert, aber sicher startet. Dieses Verhalten kann aus Nutzersicht als mühsam oder kritisch wahrgenommen werden, entspricht jedoch aus Sicht der Autoren einem grundsätzlich gut funktionierenden Sicherheitskonzept, das Fehlinterpretationen in der sensiblen Randzone konservativ behandelt.



In der Praxis ist dieses Verhalten unproblematisch: Sobald LOD-Detektionen durch Tropfwasser aufhören, läuft das Laden zuverlässig weiter. Der eigentliche Ladevorgang wird also lediglich hinausgezögert. In unserem Fall konnte nach dieser Verzögerung trotz Dauerregen störungsfrei von 54 % auf 90 % SOC geladen werden. Der erzielte Wirkungsgrad entsprach dabei mit 89,92 % nahezu jenem der Messungen unter trockenen Bedingungen.



Abbildung 60: Kabellose Ladung und Messung bei Regen



4.8.4 Weitere Messungen

4.8.4.1 Karosseriespannung gegenüber Erdpotenzial

Da beim kabellosen Laden keine direkte Verbindung zwischen dem Fahrzeug und der Schutz Erde besteht, ist eine Überprüfung der Spannung zwischen Karosseriemasse und Erde erforderlich. Ist diese Spannung zu hoch, kann dies beim Anfassen von Karosserieteilen zu einem Stromschlag führen. Zu diesem Zweck wurde das Fahrzeug kabellos geladen und die Spannung zwischen Fahrzeug und Erdpotential an verschiedenen, unlackierten Punkten der Karosserie gemessen. Die ermittelten Spannungen lagen durchgängig im Bereich von rund 300 mV AC respektive 0 mV DC und somit deutlich unterhalb sicherheitsrelevanter Schwellen. Es konnten keine unzulässigen Ableit- oder Fehlerströme festgestellt werden.

4.8.4.2 Batteriezellentemperatur

Je nach Pulsprofil des Ladestromes und den Zellcharakteristika der Batterie, können sich Unterschiede in der Batteriezellentemperatur und Ladeeffizienz ergeben. Gepulstes Laden kann zu einer geringeren Wärmeerzeugung führen, da die Ladepausen eine kurzfristige Entspannung der Zellchemie ermöglichen und lokale Überhitzungen reduzieren (Amanor-Boadu, 2018). Dadurch wird die thermische Belastung der Zellen verringert, was die Lebensdauer positiv beeinflussen kann. Gleichzeitig kann sich die Ladeeffizienz verbessern, da weniger Energie in Form von Wärme verloren geht.

Die Analyse des DC-seitigen Ladestromes am drahtlosen System des VW ID.5 hat jedoch keine gegenüber dem konventionellen Laden veränderten Pulse ergeben. Beide weisen nur sehr geringe AC-Anteile im Ladestrom auf. Somit konnte davon ausgegangen werden, dass sich auch die Temperatur der Batteriezellen beim kabellosen Laden gleich verhält wie beim kabelgebundenen Laden. Zur Bestätigung wurden zwei Messungen durchgeführt, bei denen das auf 23°C konditionierte Fahrzeug jeweils von 37 % auf 80 % SOC geladen wurde. Dabei wurden die Temperaturen an 24 Messstellen, verteilt über die gesamte Traktionsbatterie, mit einem Diagnosetester aufgezeichnet. Die Messungen der Zelltemperatur zeigten jedoch ein überraschendes Bild: Die Zelltemperatur steigt beim kabellosen Laden deutlich rascher und weiter an.

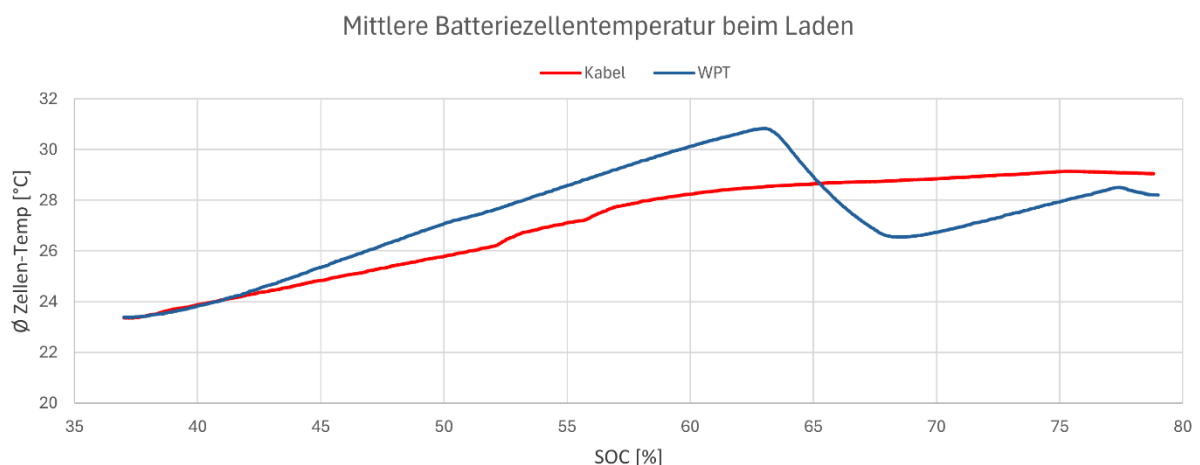


Abbildung 61: Messung der Batteriezellentemperatur (induktiv blau, konduktiv rot)

Der steilere Anstieg der Batterietemperatur beim kabellosen Laden in Blau gegenüber jenem des konventionellen Ladens in Rot (Abbildung 61) scheint aber nicht auf ein geändertes Puls-ladeverhalten zurückzuführen zu sein, da, wie erwähnt, kein Unterschied im Wechselstromanteil des Ladestromes gemessen werden konnte. Vielmehr ist die steilere Temperaturflanke auf die Integration des Systems in den Kühlkreislauf des Fahrzeuges zurückzuführen.

Abbildung 62 in Rot und Abbildung 63 in Blau zeigen die Kühlmitteltemperaturen am Ein- und Ausgang der Batterie bei den beiden Ladearten im Vergleich. Warum das so ist, zeigt ein Blick in das Schema



des Kühlkreislaufes des Basisfahrzeuges im Vergleich zum umgerüsteten Fahrzeug: die Kühlwassertemperatur beim induktiven Laden steigt nur deshalb rascher an, weil der Kühlkreislauf der Vehicle Assembly über die Traktionsbatterie kurzgeschlossen ist. Das heisst, einzig die thermische Masse der Traktionsbatterie wird zur Kühlung der Vehicle Assembly verwendet. Zumindest so lange, bis die Batterie so genügend erwärmt wurde, dass das Batteriemanagementsystem des Fahrzeuges eine Temperatur über dem Schwellwert (ca. 31°C) misst, die Kühlung aktiviert und die zusätzliche Wärme über den Kältekompressor aktiv abführt. Dies erklärt auch den Temperaturabfall bei rund 63 % SOC / 31°C in Abbildung 61.

Es ist unklar, weshalb sich der Umrüster für diese Integration des Kühlkreislaufes entschieden hat. Zwar funktioniert das Kühlsystem grundsätzlich zuverlässig, jedoch führt die gewählte Umsetzung zu gewissen Effizienzverlusten, wie im Folgenden dargestellt wird. Bei der Integration eines drahtlosen Ladesystems durch einen OEM würde sich die Frage erübrigen, da für drahtloses und kabelgebundenes Laden auf ein und denselben On-Board-Charger zurückgegriffen würde und demzufolge nur ein Kühlkreislauf benötigt wird.

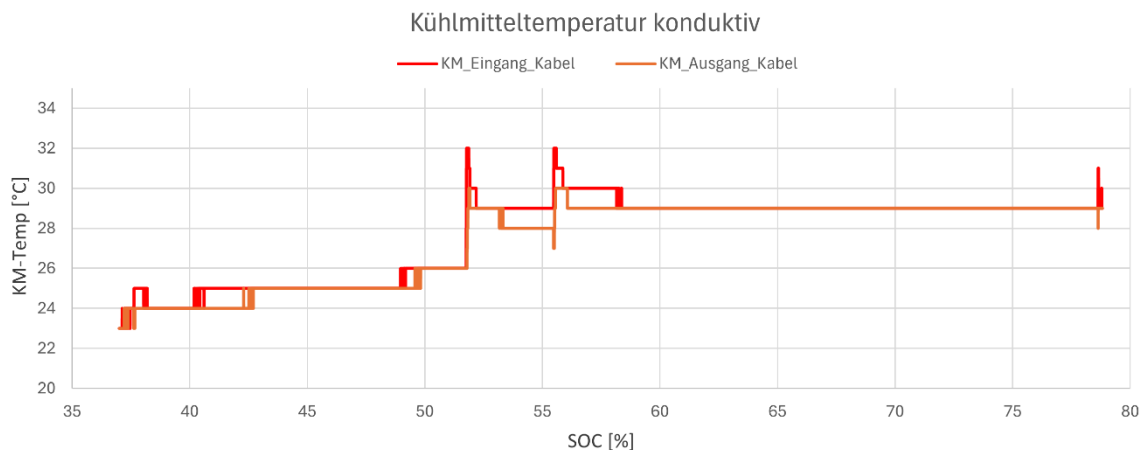


Abbildung 62: Kühlmitteltemperatur am Batterie Ein- & Ausgang beim konduktiven Laden

In Abbildung 64 ist in Lila zusätzlich die dem Kältemittelkompressor zur Verfügung gestellte elektrische Leistung dargestellt. Es lässt sich entnehmen, dass der Kompressor mit einer mittleren Leistung von rund 2,1 kW (mit Spitzen von 3,1 kW) über eine Dauer von rund 21 Minuten das System kühlt.

Es ist anzumerken, dass diese systembedingten Verlustleistungen in den Wirkungsgradbetrachtungen der vorangegangenen Kapitel nicht berücksichtigt wurden. Es wurde immer der Grid-To-Battery Wirkungsgrad betrachtet. Wann und ob die aktive Kühlung zugeschaltet wird, hängt beim induktiven sowie konduktiven Laden von Parametern wie Umgebungstemperatur, Batterietemperatur bei Ladestart, initialer Kühlmitteltemperatur und vor allem auch von der Ladedauer ab.

Für eine beispielhafte, induktive Ladung bei 23°C Umgebung und entsprechend konditioniertem Fahrzeug kann die Verlustleistung jedoch detailliert betrachtet werden. Abbildung 64 zeigt den Leistungsbedarf am Versorgungsnetz (rot), die gemessene Ladeleistung am DC-Hochvoltsystem (blau) sowie die, um den Leistungsbedarf des Kühlsystems, korrigierte Ladeleistung in grün. Die gestrichelten Linien zeigen die kumulierte Energie im gleichen Farbschema.

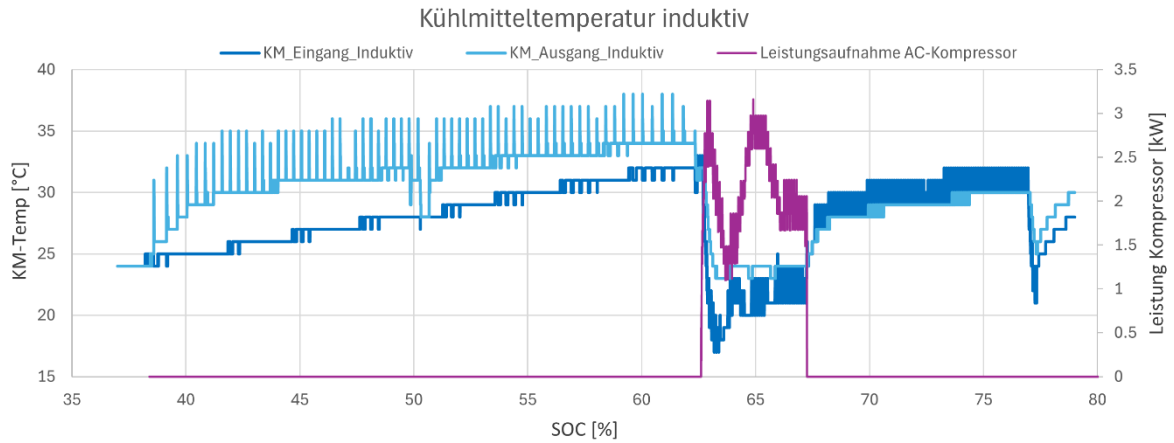


Abbildung 63: Kühlmitteltemperatur am Batterie Ein- & Ausgang beim induktiven Laden

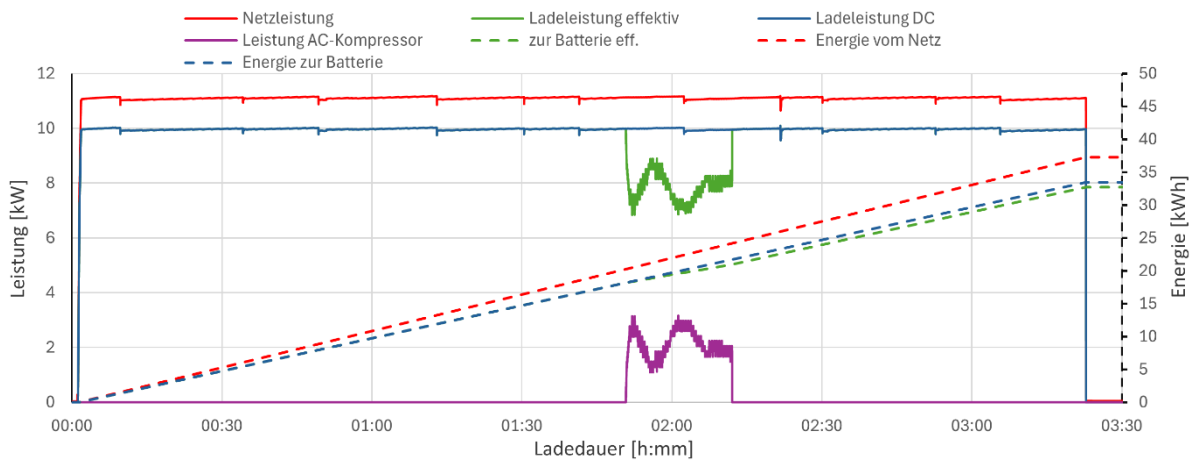


Abbildung 64: Ladeleistung und Energie um Leistungsbedarf der Kühlung korrigiert

Die effektiv in der Batterie wirksame Ladeleistung sinkt also über einige Minuten um den Leistungsbedarf des Kühlsystems, das erreichte Minimum beträgt dabei 6,84 kW. Über die gesamte Ladedauer von rund 3 h und 20 min wird der Batterie somit 0,74 kWh weniger Energie zugeführt, als der am DC-System gemessene Wert vermuten lässt. Dies hat zur Folge, dass der effektive Wirkungsgrad² der Ladung von rund 89,76 % auf 87,77 % sinkt (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: effektive Ladeeffizienz unter Berücksichtigung des Leistungsbedarfs des Kühlsystems

| | Netzanschluss (AC) | zur Batterie (DC) | effektiv in Batterie wirksam | Differenz |
|-----------------------|-----------------------|----------------------|---------------------------------|-----------|
| Ø Leistung [kW] | 11,09 | 9,95 | 9,73 | 0,22 |
| Energie [kWh] | 37,27 | 33,45 | 32,71 | 0,74 |
| Wirkungsgrad [%] | | 89,76 | 87,77 | 1,98 |
| max. Wirkungsgrad [%] | | 91,26 | 91,26 | - |
| min. Wirkungsgrad [%] | | 88,88 | 61,43 | 27,45 |

² gerechnet aus Energie, die in der Batterie verbleibt, geteilt durch die vom Versorgungsnetz bereitgestellte Energie



Die gemäss Tabelle 7 ermittelten, reduzierten Wirkungsgrade geben also lediglich, die Aufgrund des fehlerhaft oder zumindest ungünstig implementierten Kühlkreislaufes, erzielten Gesamtwirkungsgrade wieder. Dabei muss beachtet werden, dass auch beim konduktiven Laden, je nach Umgebungsbedingungen, auf das Kühlsystem des Fahrzeuges zurückgegriffen wird und somit ähnliche Einbussen im Wirkungsgrad resultieren.

Eine verbesserte Integration des kabellosen Ladesystems ins bestehende Kühlsystem würde somit diesen expliziten Nachteil voraussichtlich fast vollständig wieder aufheben (sofern passive Kühlung möglich ist), womit die Ergebnisse aller vorangegangenen Kapitel ihre Gültigkeit bezüglich Grid-To-Battery Effizienz behalten.

4.9 User Experience

Die folgenden Kapitel beschreiben die Ergebnisse der Umfragen zur User Experience. Zunächst werden die deskriptiven Ergebnisse der Baseline-Umfrage der Kontrollgruppe dargestellt (N = 419). Diese bestehen aus demographischen Daten, Informationen zu Carsharing, ÖV- und Autonutzung und Einstellungen und Zahlungsbereitschaft für E-Carsharing und kabelloses Laden. Anschliessend wird das Strukturgleichungsmodell (SEM) der Baseline-Umfrage präsentiert, welches die Zusammenhänge zwischen den Konstrukten der Theory of Planned Behavior (TPB) und des Technology Acceptance Models (TAM) mit der Nutzungs- und Kaufabsicht aufzeigt. Zuletzt werden die deskriptiven Analysen der Endline-Umfrage aufgeführt.

4.9.1 Deskriptive Resultate Baseline-Umfrage

In der Umfrage haben 347 männliche und 64 weibliche Personen teilgenommen. Die grosse Mehrheit der Befragten ist zwischen 21 und 50 Jahre alt, mit einem Altersdurchschnitt von 36,7. Die meisten Befragten haben ein Haushalts-Bruttoeinkommen über 9'000 CHF, mit sehr wenigen Befragten unter 6'000 CHF. Ausserdem hat die Mehrheit der Teilnehmenden einen Universitätsabschluss.

Im Vergleich zur Schweizer Gesamtbevölkerung zeigt sich somit eine deutliche Überrepräsentation von Männern. Die Stichprobe ist zudem jünger, klar höher gebildet und verfügt über höhere Haushaltseinkommen. Die Befragten unterscheiden sich somit klar vom Schweizer Bevölkerungsdurchschnitt und entsprechen eher einem einkommensstarken und bildungsnahen Nutzerprofil.

Tabelle 8: Demographische Daten der Befragten in der Baseline-Umfrage

| Demographische Daten | Werte |
|---------------------------|--|
| Alter | Durchschnitt: 36,7; SD 13,3; Range: 18-69 |
| Geschlecht | 84 % männlich (347); 16 % weiblich (64) |
| Höchster Bildungsgrad | 3 % Schulabschluss; 22 % Berufsschule; 19 % Technische Ausbildung; 56 % Universität |
| Haushalts-Bruttoeinkommen | 7 % < 4'500 CHF; 6 % 4'500-5'999 CHF; 23 % 6'000-8'999 CHF; 29 % 9'000-12'000 CHF; 35 % > 12'000 CHF |

Die Abbildung 65 und Abbildung 66 zeigen die Anzahl an Befragten, welche ÖV-Abos und (E-)Autos besitzen. Etwas mehr als die Hälfte der Befragten hat ein Halbtax-Abo. Rund 20 % haben ein Generalabonnement oder ein Halbtax plus, während rund 13 % entweder ein regionales Abo oder kein ÖV-Abo haben. Die Mehrheit der Teilnehmenden besitzt kein E-Auto (75,5 %). Fast die Hälfte der Befragten besitzt kein konventionelles Auto (49,4 %). 38,1 % der Teilnehmenden besitzen ein konventionelles Auto, während 22,2 % über ein E-Auto verfügen. Schliesslich besitzen 12,4 % der Befragten mehr als ein konventionelles Auto, und 2,3 % mehr als ein E-Auto.

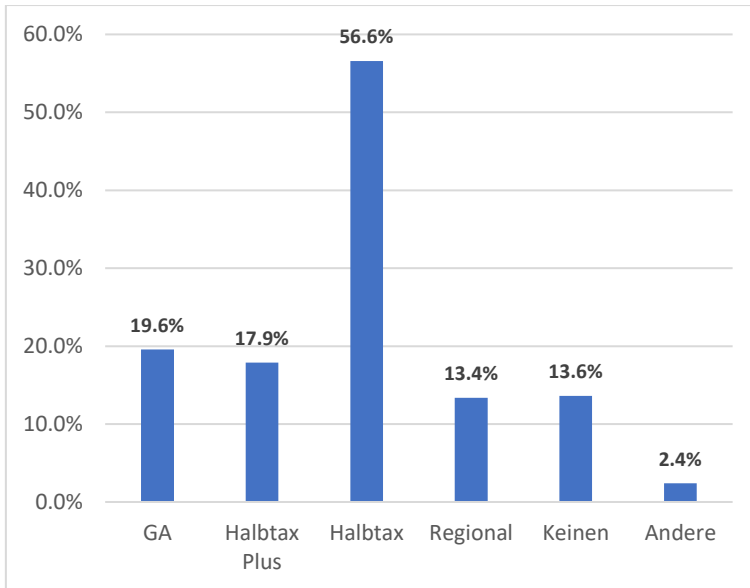


Abbildung 65: ÖV-Abos der Befragten

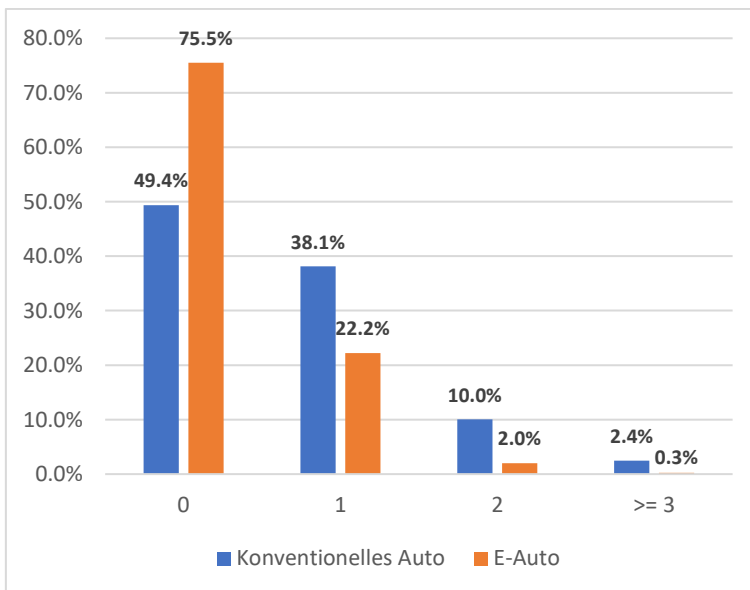


Abbildung 66: Autobesitz der Befragten

Einstellungen und Wahrnehmungen

Im Folgenden werden die Einstellungen und Wahrnehmungen der Befragten zum kabellosen Laden und E-Autos sowie dem assoziierten Nutzen und Risiken dargestellt. Die Ergebnisse werden in Violin-Plots abgebildet und zeigen die Verteilung der Antworten in der Skala von 1 («Stimme überhaupt nicht zu»/ «Sehr negativ») bis 5 («Stimme voll und ganz zu»/«Sehr positiv»). Auf den Abbildungen wird der arithmetische Mittelwert mit einer horizontalen Linie angezeigt. Die statistischen Analysen inklusive Signifikanzen zum neutralen Wert 3 sind im Anhang 10.6 aufgeführt. Mithilfe dieser Berechnung kann festgestellt werden, ob der Mittelwert jeweils signifikant über oder unter dem neutralen Wert 3 liegt.

Wie Abbildung 67 zeigt, sind die Einstellungen der Befragten hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit und Akzeptanz des kabellosen Ladens insgesamt positiv und signifikant überdurchschnittlich. Die Mittelwerte (3,67 und 4,0) liegen in beiden Fällen nah an «Stimme eher zu». Nur wenige Befragte haben angegeben, dass kabelloses Laden nicht bald akzeptiert werden wird, oder dass es nicht einfach und



intuitiv ist. Diese Einschätzungen stammen jedoch von Personen ohne Erfahrung mit kabellosem Laden und sind somit eher hypothetischer Natur. Bei dem wahrgenommenen Nutzen gibt es mehr Unterschiede. Die Befragten denken nicht, dass kabelloses Laden die Ladekosten senken wird (Mittelwert von 2,22). Sie glauben aber in der Mehrheit, dass das Aufladen bequemer sein wird (4,25), und dass es zu einer Verbesserung der Qualität des täglichen Lebens kommen kann (3,82). Alle Werte liegen entweder signifikant über oder unter dem neutralen Wert 3.

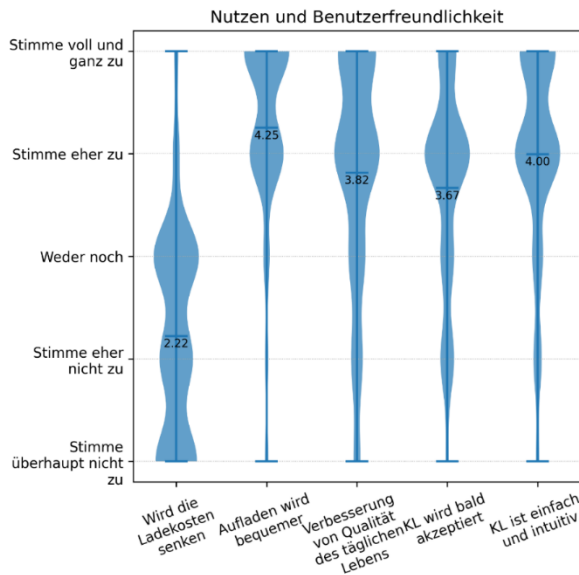


Abbildung 67: Wahrgenommener Nutzen und Benutzerfreundlichkeit von kabellosem Laden (KL)

Die grössten Risiken des kabellosen Ladens (Abbildung 68) werden in der reduzierten Ladegeschwindigkeit, den höheren Kosten und einer geringeren Effizienz gesehen. Der Durchschnitt der Wahrnehmung dieser drei Risiken liegt bei 3,5, 3,45, und 3,77. Das heisst, dass die Einschätzung dieser am häufigsten genannten Risiken nicht von allen Befragten geteilt werden. Die Verzögerung von Reiseplänen und die Strahlung werden weniger oft als Risiken wahrgenommen, mit Mittelwerten von 2,58 und 2,56. Die Beschädigung der Batterie wird als das kleinste Risiko wahrgenommen, mit einem Durchschnitt von 2,16. Alle Werte liegen entweder signifikant über oder unter dem neutralen Wert 3.

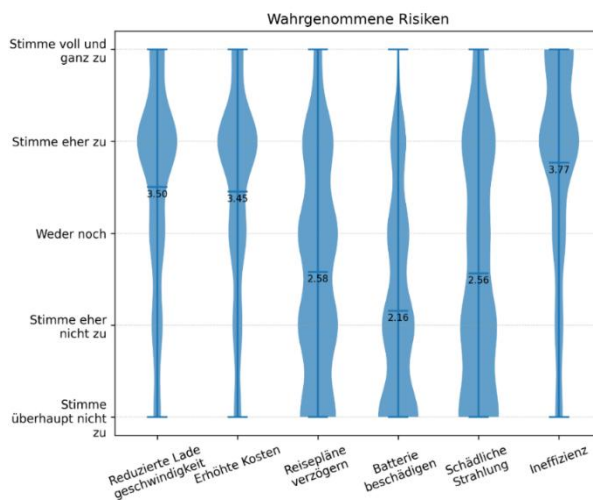


Abbildung 68: Wahrgenommene Risiken von kabellosem Laden



Die Einstellungen zu kabellosem und kabelgebundenem Laden sind positiv (Abbildung 69), mit einem Durchschnitt nahe an "Eher positiv" (3,73), wobei kabelgebundenes Laden einen leicht höheren Wert hat (3,86). Die Einstellungen zu E-Autos und E-Carsharing sind noch positiver, mit einem Durchschnitt, das nahe an "Sehr positiv" liegt (jeweils 4,54 und 4,53). Verglichen mit dem neutralen Wert 3 sind alle Mittelwerte klar überdurchschnittlich.

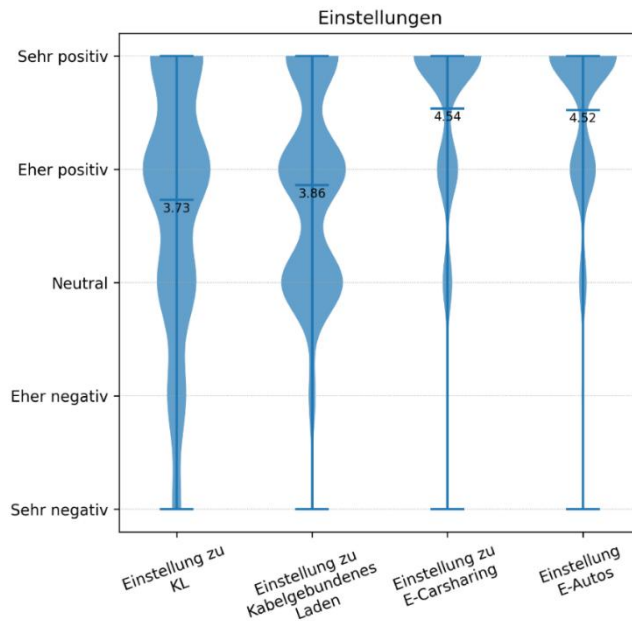


Abbildung 69: Einstellungen zu kabellosem Laden (KL)

Trotz der positiven Einstellungen wird Carsharing nur selten im Alltag benutzt (Abbildung 70). Am häufigsten wird es für Erledigungen (wie z.B. Einkaufen) benutzt, mit einem Durchschnitt von knapp unter 1–4-mal pro Jahr. Für soziale Aktivitäten und Freizeitfahrten wird es etwas seltener benutzt. Für das Pendeln, Geschäftsreisen und andere Fahrten wird es deutlich seltener benutzt, und die Mittelwerte liegen nahe am Minimum von weniger als einmal pro Jahr oder nie.

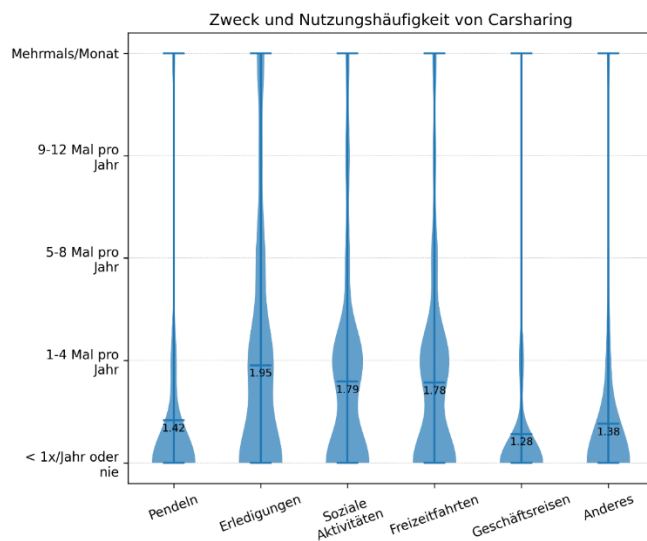


Abbildung 70: Nutzung von Carsharing



Nutzungs- und Kaufabsichten

Abbildung 71 zeigt die Nutzungs- und Kaufabsicht von kabellosem Laden. Die Mehrheit der Teilnehmenden haben angegeben, dass kabelloses Laden keinen Effekt auf ihre Absicht haben würde, E-Carsharing zu nutzen. Kabelloses Laden scheint also kein wichtiger Faktor bei der Entscheidung für E-Carsharing zu sein. Trotzdem würden einige Nutzer:innen kabelloses Laden weiterempfehlen, mit einem Durchschnitt, das zu einer leichten Zustimmung neigt. Die Kaufabsichten zeigen mehr Variation in den Antworten. Obwohl die häufigste Antwort bei der Kaufintention einer kabellosen Ladestation „Stimme eher zu“ ist, zeigt sich insgesamt eine breite Verteilung der Antworten. Dadurch liegt der Durchschnitt leicht unter der neutralen Antwort, unterscheidet sich von dieser aber nicht signifikant. Im Gegensatz dazu ist auch bei der Kaufabsicht eines E-Autos mit kabellosem Laden eine breite Streuung erkennbar, jedoch mit einer tendenziell etwas höheren Kaufbereitschaft, sodass der Durchschnitt signifikant im positiven Bereich liegt.

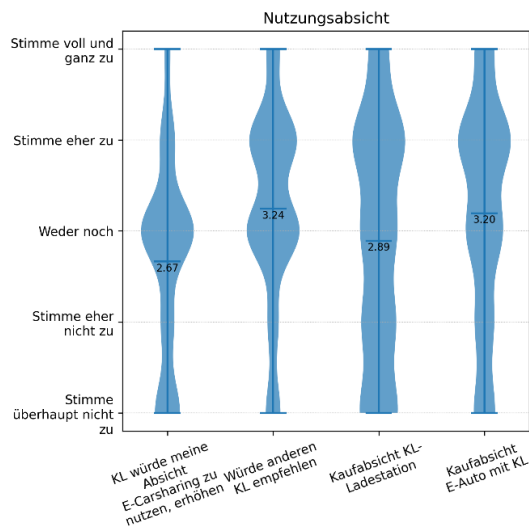


Abbildung 71: Nutzungsabsichten der Befragten zu kabellosem Laden (KL)

Die Nutzenden wären bereit, im Durchschnitt 6 % mehr für eine Ladestation mit kabellosem Laden zu zahlen (Abbildung 72). Im Kontrast dazu würden die meisten Nutzenden im Durchschnitt nur 2 % mehr für E-Carsharing mit dieser Funktion zahlen.

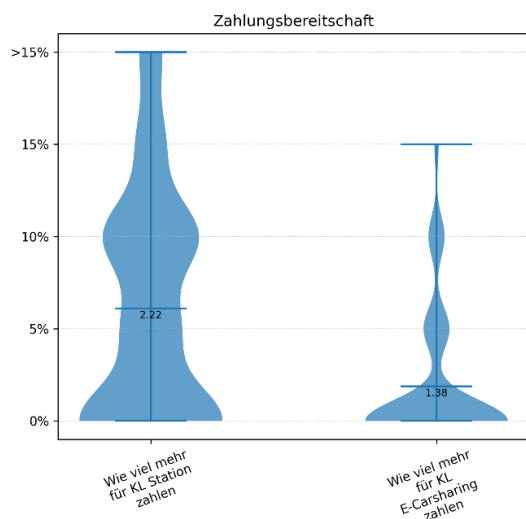


Abbildung 72: Zahlungsbereitschaft der Befragten für kabelloses Laden (KL)



Aus den Abbildungen lässt sich schliessen, dass Nutzende grundsätzlich bereit wären, kabelloses Laden zu verwenden und ein E-Auto mit dieser Funktion zu erwerben. Weniger Bereitschaft zeigen sie hingegen darin, selbst eine kabellose Ladestation zu kaufen, mehr als 10 % zusätzlich zu bezahlen oder höhere Kosten für E-Carsharing mit kabellosem Laden zu akzeptieren.

4.9.2 Resultate SEM-Analyse Baseline-Umfrage

Um die Einflussfaktoren der zentralen Konstrukte auf die beabsichtigte Nutzung des induktiven Ladens zu untersuchen, wurde in einem zweiten Schritt mit der Kontrollgruppe ein Strukturgleichungsmodell (SEM) berechnet (Abbildung 73). Die berücksichtigten Konstrukte waren wahrgenommener Nutzen (perceived usefulness (PU)), wahrgenommene Bedenken (perceived concern (PC)), wahrgenommene Einfachheit der Nutzung (perceived ease of use (PEOU)), subjektive Normen (subjective norm (SN)), Einstellung zu induktivem Laden (attitude towards inductive charging (ATT)) sowie Nutzungsintention (intention to use (IU)). Die Konstrukte (PU, PC, PEOU, SN und IU) wurden jeweils aus mehreren Items (siehe Abbildungen oben) gebildet. ATT bestand aus nur einer einzelnen Frage.

Die Nutzungsintention für induktives Laden im E-Carsharing Kontext (IU) wird im Modell ausschliesslich durch die Einstellung gegenüber dem induktiven Laden (ATT) direkt beeinflusst. ATT zeigt einen klar positiven und signifikanten Effekt auf IU, was verdeutlicht, dass eine positivere Haltung direkt zu einer höheren Intention führt, die Technologie zu nutzen.

Die Einstellung wird hauptsächlich durch zwei Faktoren beeinflusst, wobei der eine Faktor der wahrgenommene Nutzen (PU) ist, der sich positiv auf ATT auswirkt, was bedeutet, dass eine höhere Wahrnehmung des Nutzens (z.B. Bequemlichkeit, Lebensqualität) auch eine positivere Einstellung zur Folge hat. Perceived concerns (PC) wirken dagegen negativ auf ATT, was bedeutet, dass stärkere Bedenken die Akzeptanz mindern.

Perceived ease of use (PEOU) und subjektive Normen (SN) zeigen vorwiegend indirekte Effekte, indem sie den wahrgenommenen Nutzen (PU) erhöhen und die wahrgenommenen Bedenken (PC) reduzieren. Sie wirken aber somit nur indirekt über andere Konstrukte und zeigen keinen direkten Einfluss auf ATT oder IU.

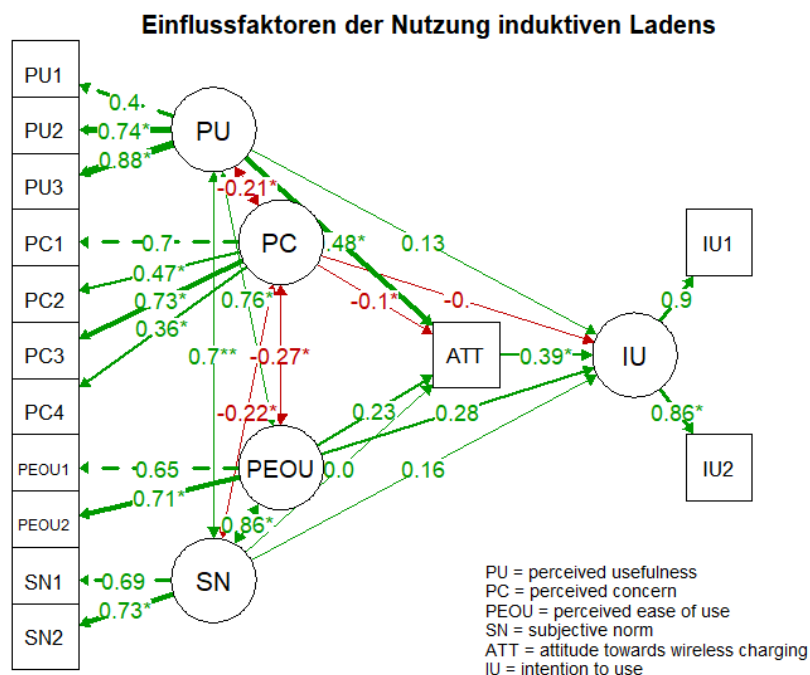


Abbildung 73: SEM-Analyse intention to use

Das zweite Strukturgleichungsmodell (Abbildung 74) untersucht dieselben Einflussfaktoren auf die Kaufintention eines induktiv ladenden E-Autos samt entsprechender Ladeinfrastruktur (IB). Berücksichtigt



wurden wiederum perceived usefulness (PU), perceived concern (PC), perceived ease of use (PEOU), subjective norm (SN) sowie die Einstellung gegenüber induktivem Laden (ATT).

Die Kaufintention (IB) wird, ähnlich wie die Nutzungsintention, in erster Linie durch die Einstellung gegenüber dem induktiven Laden (ATT) beeinflusst. ATT zeigt einen klar positiven und signifikanten Effekt auf IB, was darauf hinweist, dass eine positivere Haltung die Bereitschaft erhöht, ein Fahrzeug mit induktiver Ladefunktion zu erwerben. Zusätzlich zeigt PU in diesem Modell einen weiteren direkten und signifikanten positiven Effekt auf die Kaufintention, sodass ein höher eingeschätzter Nutzen die Kaufbereitschaft zusätzlich stärkt.

Die Einstellung (ATT) selbst wird, wie im Nutzungsmodell, hauptsächlich durch perceived usefulness (PU) und perceived concerns (PC) bestimmt. PU beeinflusst ATT positiv, während PC die Einstellung negativ prägt. Ein höherer wahrgenommener Nutzen erhöht somit die Akzeptanz, während stärkere Bedenken diese mindern. Perceived ease of use (PEOU) sowie subjektive Normen (SN) zeigen auch in diesem Modell überwiegend indirekte Effekte, indem sie PU erhöhen bzw. PC reduzieren, jedoch keinen direkten Einfluss auf ATT oder IB aufweisen.

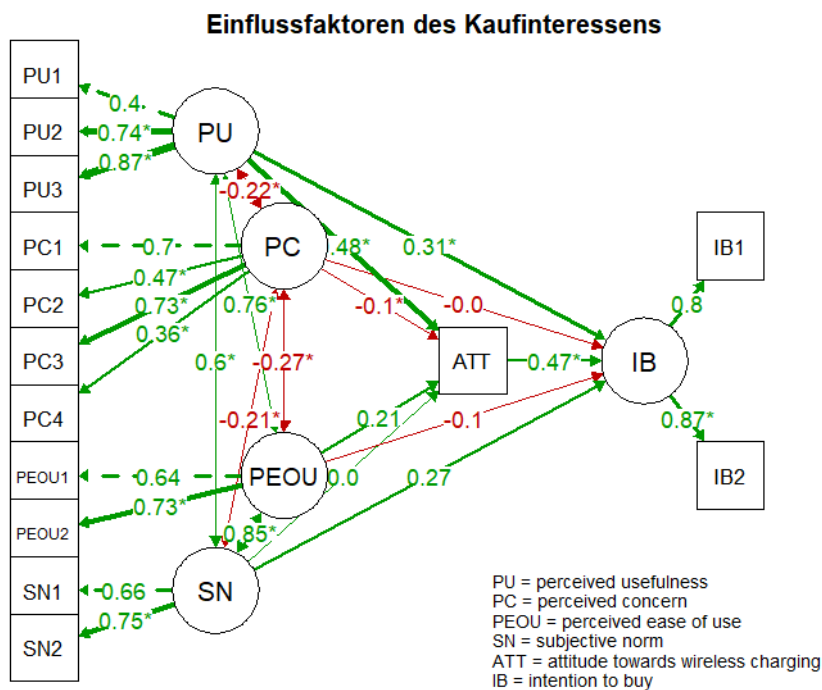


Abbildung 74: SEM-Analyse intention to buy

Insgesamt bestätigen beide Modelle gewisse theoretischen Annahmen des TAM und TPB. Sie verdeutlichen, dass insbesondere Nutzenwahrnehmung und geringe Bedenken zentrale Prädiktoren für die Einstellung gegenüber dem induktiven Laden sind, welche wiederum entscheidend für sowohl die Nutzungs- als auch die Kaufintention ist. Subjektive Normen und die Einfachheit der Nutzung haben jedoch keinen direkten Einfluss.

4.9.3 Resultate Testgruppe (Endline-Survey)

Aufgrund der geringen Stichprobengröße ($n=17$) werden im Folgenden hauptsächlich deskriptive Ergebnisse dargestellt (Abbildung 75, Abbildung 76, Abbildung 77, Abbildung 78). Die Boxplots zeigen die Verteilung der Antworten auf einer Skala von 1 bis 5. Die Box repräsentiert den Bereich, in dem die mittleren 50 Prozent der Antworten liegen (Interquartilsabstand). Der schwarze Strich innerhalb der Box markiert den Median, also den Wert, der die Daten in zwei Hälften teilt. Der Diamantpunkt zeigt den



Mittelwert der Antworten an. Die vertikalen Linien geben die Spannweite der meisten Werte ohne Ausreisser an. Einzelne Punkte ausserhalb können Ausreisser darstellen.

Die Nutzerinnen und Nutzer waren insgesamt sehr zufrieden mit dem kabellosen Laden. Einzig die Anzeige im Fahrzeug erhielt eine etwas niedrigere Bewertung, die jedoch immer noch deutlich im positiven Bereich liegt. Als einzige Schwierigkeit wurde das Parkieren innerhalb des Positionierungsbereichs auf der Ladeplatte genannt. Auch im offenen Textfeld wurde erwähnt, dass teilweise mehrere Parkversuche nötig waren, bis der Ladevorgang startete. Weitere Probleme wurden nicht berichtet.

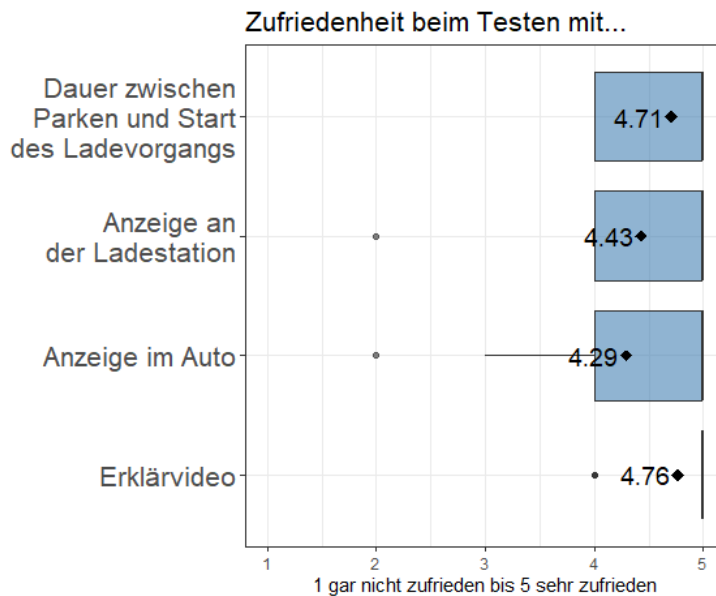


Abbildung 75: Zufriedenheit mit induktivem Laden

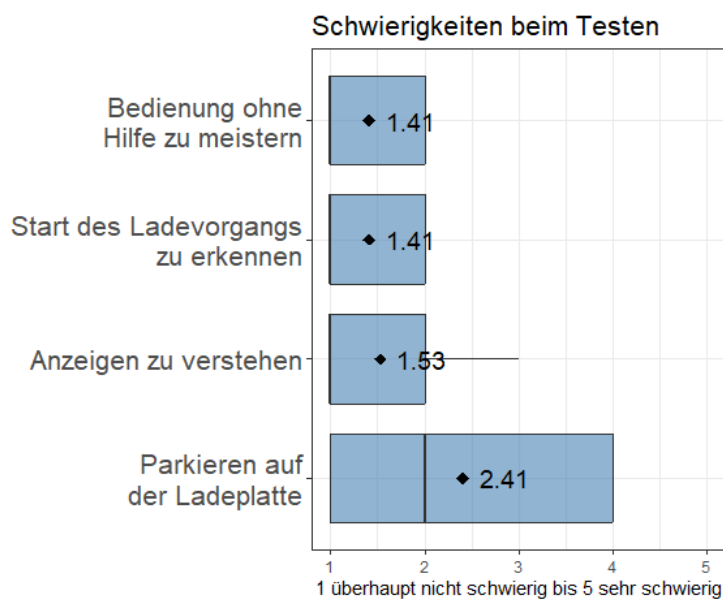


Abbildung 76: Schwierigkeiten mit induktivem Laden

Die Testpersonen fühlten sich während des gesamten Versuchs sicher und äusserten keine Bedenken bezüglich möglicher Strahlung. Im Vergleich zum kabelgebundenen Laden wurde das induktive Laden als komfortabler empfunden. Der wahrgenommene Aufwand bis zum Start des Ladevorgangs war geringer, während die Zuverlässigkeit beider Ladearten ähnlich eingeschätzt wurde.

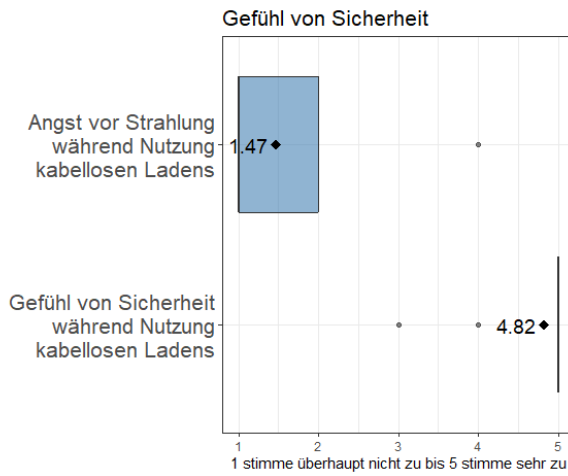


Abbildung 77: Gefühlte Sicherheit beim induktiven Laden

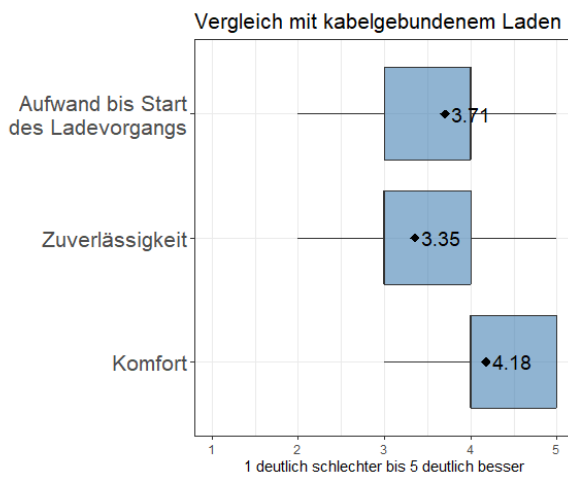


Abbildung 78: Vergleich zu kabelgebundenem Laden

Von den 17 Befragten hatte lediglich eine Person nach dem Test eine negativere Einstellung gegenüber dem induktiven Laden als zuvor (Abbildung 79). Dies lag vor allem daran, dass der Ladevorgang nicht immer zuverlässig funktionierte. Bei elf Personen verbesserte sich die Einstellung. Besonders häufig hervorgehoben wurden die einfache Handhabung sowie der Abbau von Hemmschwellen durch die Nutzung.

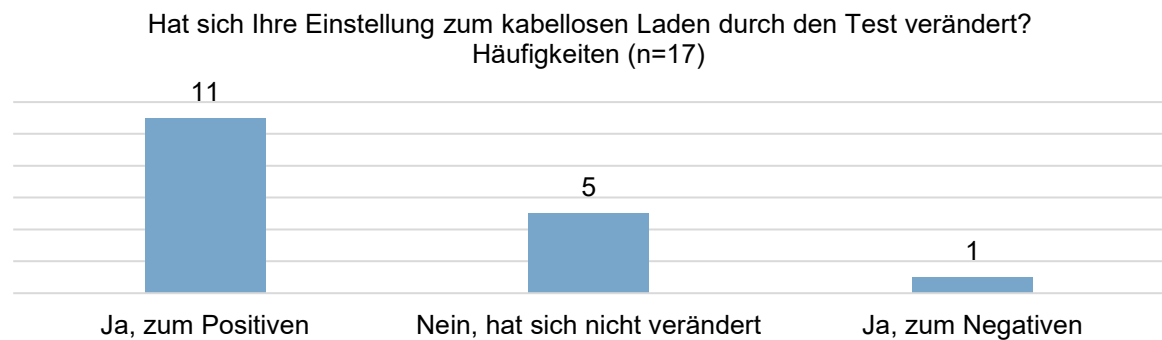


Abbildung 79: Häufigkeit Veränderung der Einstellung



Da wir die Baseline-Umfrage und die Endline-Umfrage mit denselben Personen gemacht haben, konnten Vorher-Nachher-Vergleiche durchgeführt werden. Aufgrund der geringen Anzahl an Testpersonen ($n = 17$) lassen sich jedoch keine statistisch belastbaren Aussagen treffen, jedoch können Tendenzen beobachtet werden.

Insbesondere konnten verschiedene anfängliche Bedenken durch die Testfahrten reduziert werden. Die grössten Veränderungen betreffen die Sorge, dass induktives Laden Reisepläne verzögern könnte, sowie die Befürchtung potenziell schädlicher Strahlung. Beide Ängste nahmen nach der Testnutzung deutlich ab. Auch weitere Bedenken, wie etwa die Annahme, dass induktives Laden die Batterie von Elektrofahrzeugen beschädigen könnte oder im Vergleich zu kabelgebundenem Laden weniger effizient sei, wurden tendenziell abgebaut.

Bei den übrigen Variablen zeigten sich zwar ebenfalls Veränderungen, diese sind jedoch aufgrund der kleinen Stichprobe nicht zuverlässig interpretierbar.

4.9.4 Synthese der Ergebnisse der User-Experience

Die Ergebnisse aus Baseline- und Endline-Erhebung liefern ein relativ konsistentes Bild zur Akzeptanz und Nutzung von induktivem Laden im E-Carsharing-Kontext. Während die Baseline-Umfrage überwiegend hypothetische Einschätzungen von Personen ohne direkte Erfahrung mit induktivem Laden abbildet, spiegeln die Resultate der Testgruppe tatsächliche Erfahrungen wider. Die Synthese beider Perspektiven ermöglicht eine differenzierte Beantwortung der Forschungsfragen.

FF1: Welche Faktoren beeinflussen die Akzeptanz von induktivem Laden bei E-Carsharing-Nutzenden?

Die Ergebnisse der Baseline-Befragung zeigen, dass sich die Akzeptanz des induktiven Ladens im Wesentlichen anhand zentraler Mechanismen des TAM und TPB erklären lässt. Dabei ist entscheidend, inwiefern die Nutzenden das System als nützlich und alltagspraktisch wahrnehmen. Ein erwarteter Nutzen, beispielsweise eine bequemere Handhabung, fördert die Offenheit gegenüber der Technologie. Bedenken hinsichtlich der Effizienz oder der Kosten mindern hingegen die Bereitschaft, sie zu nutzen. Diese Abwägung spiegelt sich in der Einstellung gegenüber dem System wider und ist letztlich entscheidend dafür, ob induktives Laden als attraktive Option wahrgenommen wird.

FF2: Wie beeinflusst die Erfahrung mit induktivem Laden die Einstellung gegenüber der Technologie?

Die Endline-Ergebnisse zeigen einen deutlichen positiven Einfluss der praktischen Nutzung. Die Mehrheit der Testpersonen hatte nach persönlicher Erfahrung eine positivere Einstellung, wobei besonders die einfache Handhabung und der Wegfall von Hemmschwellen hervorgehoben wurden. Ausserdem reduzierten sich mehrere anfängliche Bedenken klar, insbesondere bezüglich Strahlung und Reiseverzögerungen. Herausforderungen ergaben sich fast ausschliesslich beim präzisen Parkieren über der Ladeplatte, ohne dass dies die Gesamtbewertung negativ prägte. Praktische Erfahrung führt somit zu einem Abbau anfänglicher Sorgen und zu einer realistischeren sowie positiveren Einschätzung der Technologie.

FF3: Erhöht eine positive Akzeptanz und Erfahrung mit induktivem Laden die Offenheit, induktives Laden im E-Carsharing zu nutzen?

Die Daten legen dies nahe, denn bereits in der Baseline-Befragung zeigte sich eine grundsätzlich positive Nutzungsbereitschaft, auch wenn kabelloses Laden kein zentraler Entscheidungsfaktor für E-Carsharing ist. In der Testgruppe zeigte sich, dass konkrete Nutzungserfahrungen sowohl die Einstellung als auch die Bereitschaft zur zukünftigen Nutzung stärken. Insgesamt weisen die Ergebnisse darauf hin, dass positive Erfahrungen ein entscheidender Hebel sind, um die Offenheit für induktives Laden im E-Carsharing zu erhöhen.



5 Bewertung der Ergebnisse

Die im Projekt durchgeführten Arbeiten haben umfassende Erkenntnisse zur technischen, regulatorischen und praktischen Umsetzbarkeit des induktiven Ladens in der Schweiz geliefert. Die Ergebnisse belegen, dass sowohl die Integration in Fahrzeuge, die Installation der Infrastruktur als auch die Validierung der Sicherheit und Effizienz erfolgreich umgesetzt werden konnten.

5.1 Technische Integration und Fahrzeugumbauten

Die Umrüstung der drei VW ID.5 hat gezeigt, dass ein induktives Ladesystem technisch zuverlässig in ein Serienfahrzeug integriert werden kann. Die im Projekt identifizierten Herausforderungen, insbesondere Softwareinkompatibilitäten, Störquellen im Integrationskit sowie der Austausch defekter Hardware konnten gemeinsam mit WiTricity, Empa und AMAG systematisch behoben werden. Die nachweislich funktionale und stabile Integration der Vehicle Assembly bestätigen die Praxistauglichkeit der Technologie.

Mit dem Reverse-Engineering des ersten Fahrzeugs und der nachfolgenden Optimierung beim Umbau des Empa-Fahrzeugs konnte gezeigt werden, dass der Integrationsprozess reproduzierbar ist und durch geeignete Dokumentation sowie angepasste Kabelführung weiter optimiert werden konnte.

5.2 Zulassungsverfahren und regulatorische Erkenntnisse

Ein zentraler Meilenstein war die reguläre Strassenzulassung der Fahrzeuge, einschliesslich des induktiven Ladesystems. Die durchgeführte Prüf- und Genehmigungspraxis zeigt, dass die Zulassung auch dort möglich ist, wo das induktive Laden als gekoppeltes Gesamtsystem in der bestehenden Trennung zwischen Fahrzeugrecht und Produkterecht noch nicht eindeutig abgebildet ist und deshalb fallbezogene Nachweis- und Prüfkonzpte erforderlich sind. Die erreichte Zulassung liefert damit eine Referenz für künftige Serien- und Retrofitvorhaben. Insgesamt zeigt das Projekt, dass induktive Ladesysteme regulatorisch bewältigbar sind und in der Schweiz bei sachgerechter Nachweisführung innerhalb des bestehenden Rechtsrahmens zugelassen werden können.

5.3 Installation der Ladeinfrastruktur

An beiden Standorten (Eniwa in Buchs und Empa in Dübendorf) konnte die Installation unter Berücksichtigung der sicherheitsrelevanten Normen und auf Basis sorgfältiger Risikoanalysen erfolgreich umgesetzt werden. Die Arbeiten zeigen, dass induktive Ladeplatten im Bestand technisch und baulich integrierbar sind und betrieblich stabile Ergebnisse liefern. Die ergänzenden Monitoringsysteme sowie der Einsatz von Schutzmechanismen (z. B. LOD) haben sich im Feldbetrieb bewährt.

Die Durchführung der Risikoanalyse war insbesondere erforderlich, weil eine Konformitätserklärung seitens WiTricity fehlte. Durch die systematische Analyse und Bewertung potenzieller Gefährdungen konnte dennoch ein Betrieb der Anlagen verantwortet werden.

5.4 Effizienz- und Netzqualitätsmessungen

Die umfangreichen Laboruntersuchungen der Empa bestätigen die hohe technische Reife des Systems. Der gemessene Grid-to-Battery-Wirkungsgrad liegt bei rund 90 % und bleibt innerhalb der zugelassenen Positionierungstoleranzen stabil. Selbst bei Abweichungen vom optimalen Alignment zeigt die Energieübertragung ein robustes Verhalten. Auch unter erschwerten Umweltbedingungen wie Eis, Schnee oder Regen arbeitet das System zuverlässig und mit fast gleichbleibender Effizienz.

Im direkten Vergleich erreicht die drahtlose Lösung ein Niveau nahe konduktiver AC-Ladestationen und positioniert sich im Benchmark mit über 20 Serienfahrzeugen im soliden Mittelfeld. Die Netzanalysen zu Flicker, FFT und THD weisen keine kritischen Rückwirkungen aus, sämtliche Kennwerte liegen im üblichen Bereich vergleichbarer Leistungsklassen.



Vor diesem Hintergrund relativieren die Messergebnisse das weit verbreitete Bild einer grundsätzlich ineffizienten Induktionsladung deutlich. Dieses Narrativ ist historisch gewachsen. Einerseits war es durch frühe Systemgenerationen mit grösseren Luftspalten, weniger leistungsfähiger Leistungselektronik und hoher Sensitivität gegenüber Fehlpositionierung geprägt. Andererseits reicht die Skepsis bis zu den grossskaligen Übertragungskonzepten von Nikola Tesla Ende des 19. Jahrhunderts zurück. Deren geringe Kopplungsgrade, hohe Streuverluste und das wirtschaftliche Scheitern entsprechender Projekte verankerten früh die Vorstellung einer systembedingt ineffizienten drahtlosen Energieübertragung.

Die aktuellen Resultate zeigen hingegen, dass moderne, resonanzoptimierte Systeme mit präziser Spulenauslegung und angepasster Leistungselektronik Effizienzen erreichen, die konduktivem AC-Laden nahekommen und damit eine sachliche Neubewertung erlauben.

5.5 User Experience

Die kombinierte Auswertung von Baseline- und Endline-Umfragen zeigt gute Resultate.

Die Einstellung gegenüber induktivem Laden verbessert sich signifikant nach realen Nutzungserfahrungen. Die Technologie wird als komfortabel, einfach und wenig fehleranfällig wahrgenommen. Die grösste Herausforderung bleibt die präzise Positionierung des Fahrzeugs beim Parken, was jedoch die grundsätzliche Akzeptanz nicht schmälert. Bedenken zu Strahlung oder Sicherheit reduzierten sich nach der Praxiserfahrung deutlich.

Insgesamt stützt die nutzerseitige Perspektive die Einschätzung, dass induktives Laden ein relevantes Zukunftsthema für E-Carsharing und Elektromobilität im Allgemeinen ist.

5.6 Wirtschaftliche Aspekte

Die im Projekt eingesetzten induktiven Ladesysteme befinden sich noch im Prototypenstadium und sind entsprechend kostenintensiv. Aufgrund manueller Fertigung, individueller Anpassungen sowie zusätzlicher Prüf- und Integrationsaufwände liegt der Systempreis derzeit im mittleren bis oberen fünfstelligen Bereich. Eine wirtschaftliche Skalierung ist unter diesen Bedingungen nicht gegeben.

Auch die Umrüstung bestehender Fahrzeuge ist aufwendig und teuer, da Serienfahrzeuge seitens der Hersteller nicht für induktive Systeme vorbereitet sind. Mechanische Anpassungen, Eingriffe ins Hochvolt- und Kühlsystem sowie zusätzliche Prüf- und Zulassungsverfahren verursachen erhebliche Mehrkosten. Retrofit-Lösungen finden daher aktuell primär im Pilotkontext Anwendung.

Eine wirtschaftliche Perspektive ergibt sich vor allem bei einer OEM-Integration in der Serienfertigung, wo durch Standardisierung und Industrialisierung deutliche Kostensenkungen erwartet werden können. Das Projektteam sieht die Kosten für zukünftige, direkt vom Hersteller integrierbare induktive Ladesysteme im mittleren vierstelligen Bereich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die Marktdurchdringung und Skalierung massgeblich von einer strategischen Entscheidung seitens der OEM abhängen. Sie bestimmen, in welchem Umfang und mit welcher Priorität die Technologie in das Produktportfolio integriert und aktiv im Markt positioniert wird.

5.7 Gesamtfazit

Das Projekt demonstriert erfolgreich die Machbarkeit und Akzeptanz des induktiven Ladens. Sicherheitsrelevante Themen wurden punktuell geprüft und normativ eingeordnet, ohne dass damit eine vollständige Konformitätsbewertung des Gesamtsystems vorweggenommen wurde.

Die Technologie erweist sich damit als reif für eine weitergehende Markteinführung – insbesondere in Anwendungsbereichen mit hohem Komfortbedarf, automatisierten Fahrzeugflotten sowie sektorgekoppelten Anwendungen mit hoher und planbarer Netzverfügbarkeit.



5.8 Ausblick

Auch nach Abschluss des Projekts sollen die umgerüsteten Fahrzeuge der Eniwa und der Empa weiter betrieben werden. So können zusätzliche Praxiserfahrungen im regulären Einsatz gesammelt werden. An beiden Standorten muss jedoch der Betrieb der Ladestation aufgrund der fehlenden CE-Konformitätserklärung neu evaluiert und gegebenenfalls juristisch abgeklärt werden.

Eniwa wird im kommenden Jahr einen technischen Austausch mit einem weiteren Hersteller induktiver Ladesysteme durchführen. Ziel dieses Austauschs ist es, unterschiedliche technologische Ansätze, Integrationskonzepte und Entwicklungsstände zu vergleichen und das Potenzial alternativer Systeme für künftige Anwendungen zu beurteilen. Eniwa wird die Entwicklung induktiver Ladelösungen aktiv weiter beobachten, insbesondere da während des Projekts ein deutliches Interesse von Transport- und Logistikunternehmen an induktivem Laden für schwere Nutzfahrzeuge festgestellt wurde.

Die ZHAW wird die im Rahmen des Projekts gewonnenen Daten und Erkenntnisse in einer wissenschaftlichen Publikation aufbereiten und veröffentlichen.

Übergreifend erscheint es angezeigt, die im Projekt identifizierten Abgrenzungsfragen zwischen Fahrzeugrecht und Produkterecht für induktives Laden im gekoppelten Betrieb (Fahrzeug + Infrastruktur) in den einschlägigen Gremien (z.B. UNECE/WP.29 bzw. EU) weiter zu präzisieren. Bis zu einer solchen Klärung wird empfohlen, bei künftigen Vorhaben frühzeitig ein abgestimmtes Nachweis- und Prüfkonzept mit den zuständigen Behörden sowie spezialisierten Technischen Diensten/Prüfstellen festzulegen und die fallbezogene Interpretation sowie den Umfang der Nachweise transparent zu dokumentieren.

In der frühen Entwicklungsphase wurde die induktive Ladetechnologie vor allem durch zwei technische Faktoren begrenzt: einen vergleichsweise geringen Wirkungsgrad und eine limitierte Ladeleistung. Die Energieverluste lagen deutlich über jenen konduktiver Systeme und die übertragbare Leistung war für viele praktische Anwendungen nicht ausreichend. Entsprechend galt induktives Laden lange Zeit als technisch interessant, jedoch nur eingeschränkt alltagstauglich.

Die Ergebnisse des vorliegenden Projekts zeigen jedoch klar, dass diese zentralen Hemmnisse mit der aktuellen Technologiereife weitgehend überwunden sind. Moderne Systeme erreichen hohe Wirkungsgrade und Ladeleistungen auf dem Niveau üblicher konduktiven Ladestationen. Die frühere Kritik an Effizienz und Leistungsfähigkeit trifft damit in dieser Form nicht mehr zu.

Aus heutiger Sicht bestehen folglich keine grundsätzlichen technischen Ausschlusskriterien für bestimmte Fahrzeugkategorien oder Einsatzbereiche. Induktives Laden ist überall dort denkbar und einsetzbar, wo Fahrzeuge regelmässig stationär abgestellt werden. Die Technologie ist somit nicht auf einzelne Nischen beschränkt, sondern grundsätzlich breit anwendbar.

Für eine erfolgreiche Markteinführung und breite Durchdringung sind jedoch weitere Schritte erforderlich. Eine wirtschaftlich tragfähige Skalierung wird primär über eine serienmässige Integration durch Fahrzeughersteller erfolgen. Retrofit-Lösungen dürften demgegenüber auf Spezialanwendungen beschränkt bleiben. Die verbleibenden Herausforderungen liegen damit weniger in der technischen Machbarkeit als vielmehr in der industriellen Integration und Skalierung der Technologie.

6 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Im Rahmen des Projekts wurde auf eine enge Zusammenarbeit mit internationalen und nationalen Partnern gesetzt, um die bestmöglichen Ergebnisse zu erzielen.

WiTricity, mit Hauptsitz in den USA und einer Zweigniederlassung in Mägenwil, war der zentrale Partner für die Bereitstellung der induktiven Ladetechnologie. Dank der Nähe der Niederlassung in der Schweiz, konnten Probleme schnell gelöst und kleinere Änderungen am System zügig umgesetzt werden, was einen sehr guten Projektablauf gewährleistete.



Mit ABT e-Line GmbH in Deutschland konnte ein erfahrener Partner für die technische Umrüstung des ersten VW ID.5 gewonnen werden. ABT übernahm die Integration des ersten induktiven Ladesystems ins Fahrzeug und stellte sicher, dass alle notwendigen Anpassungen an den elektrischen Systemen des Fahrzeugs reibungslos erfolgten. Bedauerlicherweise stand ABT für die Umrüstung der nächsten Fahrzeuge nicht mehr zur Verfügung und es musste ein neuer Partner gesucht werden.

Auf nationaler Ebene spielte das EMC-Testcenter in Regensdorf eine entscheidende Rolle. Hier wurden die Tests zur elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) des Fahrzeugs durchgeführt. Das EMC-Testcenter bescheinigte mit ihrem Prüfbericht, dass die umgerüsteten Fahrzeuge den gesetzlichen Vorschriften entsprechen.

Zusätzlich war die sehr kooperative Zusammenarbeit mit den Strassenverkehrsämtern des Kantons Zürich und Aargau von grosser Bedeutung. Die beiden Strassenverkehrsämter unterstützten das Projekt tatkräftig bei der Zulassung der umgerüsteten Fahrzeuge. Das Erreichen einer unbefristeten regulären Strassenzulassung ist einzigartig in der Schweiz und möglicherweise über die Landesgrenzen hinaus.

Swiss E-Car sowie die beteiligten Umbaupartner (AMAG Autowelt Zürich und Durot Electric) trugen wesentlich dazu bei, dass Umbau, Integration und Sharing-Betrieb erfolgreich umgesetzt werden konnten. Durch ihre Flexibilität und ihr technisches Know-how konnten Herausforderungen im Bereich Fahrzeugzugang, Elektronik, Hochvoltsysteme und Integration effizient gelöst werden.

Die Zusammenarbeit mit all diesen Partnern ermöglichte es, die innovative Technologie zu nutzen und gleichzeitig die hohen Qualitäts- und Sicherheitsanforderungen des Projekts zu gewährleisten. Das Projektteam dankt den Partnern für die geschätzte Unterstützung.



7 Kommunikation

Eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten medienwirksamen Auftritte und Publikationen:

Diverse Medienmitteilungen in Schweizer Zeitungen und Onlineplattformen berichten über den Start und die Idee des Projekts.

- Sciena:
<https://www.sciena.ch/de/tech-transfer/charging-electric-cars-without-any-cables.html>
- Luzerner / Solothurner / Zuger / Aargauer Zeitung:
<https://www.luzernerzeitung.ch/aargau/aarau/buchs-elektroauto-laden-ohne-kabel-eniwa-unter-sucht-innovative-technologie-ld.2553714>
<https://www.solothurnerzeitung.ch/aargau/aarau/buchs-elektroauto-laden-ohne-kabel-eniwa-unter-sucht-innovative-technologie-ld.2553714>
<https://www.zugerzeitung.ch/aargau/aarau/buchs-elektroauto-laden-ohne-kabel-eniwa-unter-sucht-innovative-technologie-ld.2553714>
<https://www.aargauerzeitung.ch/aargau/aarau/buchs-elektroauto-laden-ohne-kabel-eniwa-unter-sucht-innovative-technologie-ld.2553714>
- Swisspower:
<https://swisspower.ch/themen-und-standpunkte/elektroauto-laden-ohne-kabel-erstes-projekt-mit-induktivem-laden-in-der-schweiz/>
- Punkt4info:
<https://punkt4.info/nachrichten/detail/news/schweizer-projektteam-laedt-e-autos-ohne-kabel/>
- Empa:
<https://www.empa.ch/web/s604/inductive-charging>
<https://www.empa.ch/web/s604/induktives-laden>
- CEdoday:
<https://www.cetoday.ch/elektro/2023-12-22/elektroautos-laden-ganz-ohne-kabel>
- Energate-messenger:
<https://www.energate-messenger.ch/news/238888/eniwa-und-partner-testen-kabelloses-laden-von-elektroautos>
<https://www.energate-messenger.ch/news/258789/der-flaschenhals-sind-die-autohersteller>
- EE-News:
<https://www.ee-news.ch/de/erneuerbare/article/52694/forschungsprojekt-elektroauto-laden-ohne-kabel-projekt-testet-induktives-laden-in-der-schweiz>
- ZHAW:
<https://www.zhaw.ch/de/forschung/projekt/77977>

Eine Landingpage bietet weiterführende Informationen zum Projekt: wireless-charging.ch, inlade.ch und kabellos-laden.ch.

Energy Startup Day 2023 (14. Dezember 2023, Bern): Auf dieser Veranstaltung, die jährlich stattfindet, präsentierten Claudio Richter und Hubert Wolters das Projekt. Über 250 Teilnehmer und 42 Startups nahmen teil, was zu einem regen Austausch und neuen potenziellen Partnerschaften führte. Die Idee des Projekts wurde von den Gästen und Investoren sehr positiv aufgenommen.

<https://www.energy-startup-day.ch/#section-top>



Engineers Day 2024: Auf dieser Veranstaltung, die sich speziell an Ingenieurinnen und Ingenieure richtet, wurde der Stand der Technologie zum induktiven Laden an einem Stand präsentiert, was zu weiteren Fachgesprächen und potenziellen Kooperationen führte.

<https://www.engineersday.ch/veranstaltungen/2024/netzwerkanlass-engineers-day-2024-in-aarau/>

Stadtwerkekongress Davos 2024: Hier wurde das Fahrzeug, das mit induktiver Ladetechnologie ausgestattet ist, vor der Eventhalle des WEF ausgestellt.

SRF-Dokumentation und Podcast: Eine ausführliche Berichterstattung zum Kick-Off des Projekts wurde veröffentlicht, um die Technologie einem breiteren Publikum zugänglich zu machen.

<https://www.srf.ch/audio/regionaljournal-aargau-solothurn/eniwa-autos-so-einfach-laden-wie-ein-handy?id=e542c04d-fa5d-47e1-a613-675cfdff9330>

Empa Zeitschrift «Quarterly»: Ein Artikel beleuchtet die technologischen Fortschritte sowie die Zusammenarbeit mit der Forschung.

<https://www.empa.ch/web/s604/eq84-induktives-laden>

Pitches mit potenziellen Partnern: Präsentationen vor bedeutenden Fahrzeugherstellern zur Förderung weiterer Kooperationen.

Marketingvideos: Diese wurden produziert, um die Funktionalität und Vorteile der induktiven Ladetechnologie zu veranschaulichen. Vor allem auf der Landingpage oder der Website von WiTricity zu finden.

Empa Tag der offenen Tür 2024: Das ausgestellte Fahrzeug, ausgestattet mit induktiver Ladetechnologie, wird vor einem Plakat und detaillierten Informationen von Mathias Huber vorgestellt.

<https://openday.empa.ch/move-openday>

Social Media (LinkedIn etc.): Projektbeteiligte veröffentlichten zahlreiche Posts, die die neuesten Entwicklungen und Fortschritte des Projekts hervorhoben.

SRF 10 vor 10 Beitrag (25. Oktober 2024): In der beliebten Nachrichtensendung «10 vor 10» auf SRF wurde das Projekt zum induktiven Laden von Elektrofahrzeugen vorgestellt. Der Beitrag beleuchtete die Vorteile der Technologie und zeigte die Pilotinstallation in Buchs, die den Einsatz des kabellosen Ladesystems in der Praxis demonstriert.

<https://www.srf.ch/play/tv/10-vor-10/video/10-vor-10-vom-25-10-2024?urn=urn:srf:video:56b65d1f-c670-4b5d-86ce-64591779a7fb&startTime=1130>

Referat anlässlich des jährlichen Energie Anlasses am Hightechzentrum in Brugg (29. Oktober 2024)

<https://hightechzentrum.ch/event/energie-anlass-2024>



Referat Smart City Hub Austausch Projektgruppe Klimaschutz und Digitalisierung (27.02.2025)

https://www.smartcityhub.ch/austauschgruppe_klimaschutz_und_digitalisierung.810de.html

Kundenmagazin VIVA von Eniwa (04.04.2025)

<https://cms.eniwa.ch/assets/files/Downloads/Viva/kundenmagazin-viva-01-2025.pdf>

Besichtigung der Kantonspolizei Aargau bei Eniwa vor Ort (24.04.2025)

Besichtigung Verein Swissmove bei Eniwa vor Ort (01.09.2025)

SRF Schweiz aktuell Beitrag (09.10.2025)

Interview Mathias Huber Empa

<https://www.srf.ch/play/tv/schweiz-aktuell/video/schweiz-aktuell-vom-09-10-2025?urn=urn:srf:video:2816d33c-60d0-4cc1-a0c9-1734eccc1e21>

Projektwebseite Kanton Zürich (Q4 2025)

<https://www.zh.ch/de/umwelt-tiere/energie/pilotprojekt-energie/flexdata/inlade--induktives-laden-von-elektrofahrzeugen.html>

8 Publikationen

Der Zwischenbericht des Projekts wurde publiziert und ist auf der Forschungsplattform ARAMIS öffentlich verfügbar (Knöri, et al., 2024). Die ZHAW wird im kommenden Jahr ein wissenschaftliches Paper erarbeiten, das die im Projekt durchgeführte User-Experience-Studie sowie deren Ergebnisse vertieft analysiert. Die Einreichung ist für das Jahr 2026 vorgesehen.



9 Literaturverzeichnis

- Ahmad, A., Alam, M., & Mohamed, A. (2019). Design and Interoperability Analysis of Quadruple Pad Structure for Electric Vehicle Wireless Charging Application. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 5(4), 934-945. Von <https://doi.org/10.1109/TTE.2019.2929443> abgerufen
- Ajzen, I. (1991). The Theory of Planned Behavior. *Organizational Behavior and Human Decision Processes*, 50, 179-211. Von [https://doi.org/10.1016/0749-5978\(91\)90020-T](https://doi.org/10.1016/0749-5978(91)90020-T) abgerufen
- Amanor-Boadu, J. (2018). The Impact of Pulse Charging Parameters on the Life Cycle of Lithium-Ion Polymer Batteries. *Energies*. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en11082162>
- Brúch, W. (2018). *Laden noch einfacher als Tanken*. Von BMW Group PressClub Deutschland: <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0281369DE/laden-noch-einfacher-als-tanken?language=de> abgerufen
- Dandl, F., Niels, T., & Bogenberger, K. (2020). Design and Control of Park & Charge Lanes for Carsharing Services with Highly-Automated Electric Vehicles. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 15420-15427. Von <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.2363> abgerufen
- Davis, F. (1989). Perceived Usefulness, Perceived Ease of Use, and User Acceptance of Information Technology. *MIS Quarterly*, 13(3), 319-340. Von <https://doi.org/10.2307/249008> abgerufen
- Fett, D., Ensslen, A., Jochem, P., & Fichtner, W. (2018). A Survey on User Acceptance of Wireless Electric Vehicle Charging. *World Electric Vehicle Journal*, 9(3). Von <https://doi.org/10.3390/wevj9030036> abgerufen
- Frenzel, I., Jarass, J., Trommer, S., & Lenz, B. (2015). *Erstnutzer von Elektrofahrzeugen in Deutschland: Nutzerprofile, Anschaffung, Fahrzeugnutzung*. [Berichtsreihe]. Von <https://elib.dlr.de/96491/> abgerufen
- Knöri, C., Richter, C., Vancu, F., Bittner, M., Huber, M., Elser, M., . . . Pfaffen, S. (2024). *Induktives Laden von Elektrofahrzeugen - Zwischenbericht*. Von <https://www.aramis.admin.ch/Default?DocumentID=72729&Load=true> abgerufen
- Kumar, A., Ngô, H., & Mishra, S. (2020). Optimal Positioning of Dynamic Wireless Charging Infrastructure in a Road Network for Battery Electric Vehicles. *Transportation Research Part D Transport and Environment*, 85. Von <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102385> abgerufen
- Mohammed, S., & Jung, J. (2021). A Comprehensive State-of-the-Art Review of Wired/Wireless Charging Technologies for Battery Electric Vehicles: Classification/Common Topologies/Future Research Issues. *IEEE Access*, 9, 19572-19585. Von <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3055027> abgerufen
- Prigent, J.-M. (2024). *Transport - Vehicle Regulations*. Von IWG-EMC 45th session: <https://wiki.unece.org/spaces/trans/pages/270368781/IWG-EMC+45th+session+-+2024-11-28+29> abgerufen
- Schlüter, J., & Weyer, J. (2019). Car sharing as a means to raise acceptance of electric vehicles: An empirical study on regime change in automobility. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 60, 185-201. Von <https://doi.org/10.1016/j.trf.2018.09.005> abgerufen
- Stuttgart, U. (2023). *E-Fahrzeuge induktiv so effizient aufladen wie mit einem Kabel*. Von Universität Stuttgart: <https://www.uni-stuttgart.de/universitaet/aktuelles/meldungen/E-Fahrzeuge-induktiv-so-effizient-aufladen-wie-mit-einem-Kabel/> abgerufen
- Waluga, G. (2023). Induktives Taxi-Ladekonzept als Baustein einer Emissionsreduzierung in Innenstädten. In H. Proff, M. Clemens, P. Marrón, & B. Schmölling (Hrsg.), *Induktive Taxiladung für den öffentlichen Raum: Technische und betriebswirtschaftliche Aspekte* (S. 9-32). Springer Fachmedien. Von https://doi.org/10.1007/978-3-658-39979-5_2 abgerufen
- Wikipedia. (2025). Von Eigenschaften des Wassers: https://de.wikipedia.org/wiki/Eigenschaften_des_Wassers abgerufen



10 Anhang

10.1 Risikoanalyse Installationsstandort Eniwa



Risiko Betrachtung Ladestation Standort Eniwa im Pilotprojekt induktives Laden (INLADE)

Geht an:

Raphael König, Leiter Elektro und Mitglied der Geschäftsleitung

Samuel Pfaffen, Leiter Unternehmensentwicklung und Mitglied der Geschäftsleitung

Roman Bertsch, Leiter Immobilien

Datum:

12. Juli 2024

Von:

Claudio Richter, Projektleiter

Ausgangslage

Die Eniwa AG ist Teil eines Pilotprojekts zum induktiven Laden von Elektrofahrzeugen. Dieses Vorhaben sieht die Installation einer Ladestation vor, die über einen Zeitraum von mehreren Monaten ohne Konformitätserklärung betrieben werden soll. Induktives Laden, auch als kabelloses Laden bekannt, bietet eine innovative Alternative zu herkömmlichen Ladesystemen und hat das Potenzial, den Komfort und die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen zu erhöhen. Das Fahrzeug wurde bereits mit dem Receiver, dem Gegenstück zur Ladestation, ausgerüstet und hat erfolgreich die Fahrzeugprüfung des Strassenverkehrsamts bestanden.

Aktuell gibt es keine umfassende Konformitätserklärung für das geplante Ladesystem. Dies bedeutet, dass der Installateur der Anlage, in diesem Fall Eniwa, das Risiko trägt. Die Konformitätserklärung dient normalerweise als Nachweis, dass ein Produkt den geltenden Normen und Vorschriften entspricht und sicher betrieben werden kann. Ohne diesen Nachweis besteht die Gefahr, dass das Ladesystem nicht den erforderlichen Sicherheits- und Qualitätsstandards entspricht, was zu möglichen technischen Problemen, Sicherheitsrisiken und rechtlichen Konsequenzen führen könnte.

In diesem Kontext wird eine umfassende Risikobeurteilung notwendig, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Pilotprojekts zu gewährleisten und mögliche Haftungsrisiken für die Eniwa AG zu reduzieren. Diese Beurteilung umfasst die Analyse potenzieller Gefahrenquellen, die Entwicklung von Sicherheitsmassnahmen sowie die Prüfung bereits durchgeführter Tests des Herstellers. Sie bildet die Grundlage für die Entscheidungsfindung und die Implementierung geeigneter Risikominderungsstrategien sowie des Standorts.

Gesetzliche Grundlagen / Spezifikationen und Vorabklärungen Hersteller

Gesetzliche Grundlagen:

- Starkstromverordnung (StV)
- Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV)
- Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA) Regelungen
- Verordnung über die Unfallverhütung (VUV)
- Verordnung über das Inverkehrbringen elektrischer Erzeugnisse (EleV)
- Verordnung über den vorbeugenden Brandschutz (VBV)
- Brandschutznorm (VKF)



Spezifikationen und Vorabklärungen Hersteller:

- WiTricity 11 kW Halo Spec Sheet.pdf
- WiTricity_Highly-Resonant-Wireless-Power-Transfer.pdf
- WiTricity BfE Q\u0026As Summary and Links.pdf
- Weitere Testberichte folgen – WiTricity ist gerade an der amerikanischen UL-Zertifizierung

Gefährdungen / Risiken:

Brand Gefährdungen / Risiken

- **Überhitzung:** Ladesysteme können sich erhitzen, insbesondere bei hohen Ladeleistungen über längere Zeit.
- **Materialien:** Verwendung von brennbaren Materialien in der Umgebung der Ladestation kann das Risiko erhöhen.
- **Fehlfunktionen:** Technische Defekte oder Fehler in der Elektronik könnten zu Bränden führen.
- **Kabel und Verbindungen:** Schlechte Verbindungen oder beschädigte Kabel können Kurzschlüsse verursachen.
- **Lüftung:** Unzureichende Belüftung kann zur Ansammlung von Wärme oder brennbaren Gasen und letztlich zu Bränden führen.
- **Umgebungseinflüsse:** Externe Faktoren wie hohe Umgebungstemperaturen, direkte Sonneneinstrahlung oder Vandalismus können das Risiko eines Brandes erhöhen.
- **Sachen und Personenschutz**

Elektrische Gefährdungen / Risiken

- **Kurzschluss:** Fehlfunktionen in der elektrischen Schaltung können Kurzschlüsse verursachen.
- **Überspannung:** Spannungsüberschreitungen können die elektrischen Komponenten beschädigen.
- **Fehlerstrom:** Unsachgemässe Erdung kann zu gefährlichen Fehlerströmen führen.
- **Isolationsfehler:** Mangelhafte Isolierung kann zu Stromschlägen und anderen Sicherheitsrisiken führen.
- **Kontaktgefährdung:** Direkter oder indirekter Kontakt mit unter Spannung stehenden Teilen kann zu Stromschlägen führen. (Mensch und Tier)
- **Fehlende Schutzmechanismen:** Unzureichende Absicherung oder fehlende Schutzmechanismen können das Risiko elektrischer Unfälle erhöhen. (Mensch und Tier)
- **Elektromagnetische Interferenzen:** Induktives Laden erzeugt elektromagnetische Felder, die andere elektrische Geräte stören können.
- **Wartungsmängel:** Unzureichende oder fehlende Wartung kann zu elektrischen Problemen und erhöhten Risiken führen. (Bsp. Software)

Mögliche Varianten / Standorte:

Variante 1: Tiefgarage im Bereich der MA-Parkplätze

Variante 2: Werkhof

Variante 3: Kiesplatz Eniwa (Lagerplatz)

Variante 4: Aussenparkplatz bei Swiss E-Car



Beurteilung der Varianten

| Gefährdung | Minimale | Mässige | Grosse |
|-------------------------|--|---|---|
| Variante 1 | | | Hohe Brandlast / Zugang externer Personen und Gefährdung Server Eniwa |
| Variante 2 | | Kein Platz | |
| Variante 3 | Zugänglichkeit eher schwierig / Use-Case Sharing nicht möglich | | |
| Variante 4 - Akzeptiert | | Minimale Brandlast / Anschlüsse vorhanden / öffentlich zugänglich | |

Minimale Gefährdung

Die Station kann ohne Aufsicht eingeschaltet und betrieben werden

Mässige Gefährdung

Die Station muss überwacht werden

Grosses Gefährdung

Die Station darf nicht installiert werden

Entscheidungsbeurteilung für Variante 4:

Nach sorgfältiger Analyse der verschiedenen Varianten haben wir uns entschieden, Variante 4 umzusetzen. Die Entscheidung basiert auf der Abwägung der Gefährdungen und der praktischen Umsetzbarkeit. Variante 3 weist ein geringeres Risiko auf, lässt sich aber nicht mit dem im Projekt zwingend zu prüfenden Use-Case des E-Carsharing vereinen.

Umgesetzte Schutzmassnahmen

- **Überhitzung verhindern:** Ladestation wird freistehend bei einem Aussenparkplatz installiert.
- **Fehlfunktionen minimieren:** Regelmässige Inspektionen und Wartung der elektronischen Komponenten.
- **Umgebungsüberwachung:** Es wird eine Überwachungskamera installiert.
- **Kurzschluss- und Überspannungsschutz:** Installation von Schutzvorrichtungen wie Fehlerstromschutzschalter, Sicherungen und Überspannungsableitern.
- **Erdung und Isolierung:** Sicherstellung ordnungsgemässer Erdung und Isolierung aller elektrischen Komponenten.
- **Wartungsprotokolle:** Implementierung regelmässiger Wartungs- und Inspektionsprotokolle.

Restrisiken nach Umsetzung

- Elektromagnetische Interferenzen könnten weiterhin auftreten.
- Restliches Brandrisiko aufgrund von nicht vorhersehbaren Materialfehlern, Vandalismus oder unkontrollierbaren Umgebungsbedingungen sowie Fehlbedienung.

Buchs, 12.07.2024

Claudio Richter
Projektleiter



10.2 Risikoanalyse Installationsstandort Empa



Risiko Betrachtung Ladestation Standort Empa- Campus im Pilotprojekt induktives Laden (INLADE)

Datum:

03. November 2025

Von:

Mathias Huber, Projektleiter

Ausgangslage

Die Empa ist Teil eines Pilotprojekts zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen (INLADE). Dieses Vorhaben sieht die Installation einer Ladestation vor, die über einen Zeitraum von mehreren Monaten ohne Hersteller-Konformitätserklärung betrieben werden soll. Induktives Laden, auch als kabelloses Laden bekannt, bietet eine innovative Alternative zu herkömmlichen Ladesystemen und hat das Potenzial, den Komfort und die Akzeptanz von Elektrofahrzeugen zu erhöhen. Das Fahrzeug wurde bereits mit dem Receiver, dem Gegenstück zur Ladestation, ausgerüstet und hat erfolgreich die Fahrzeugprüfung des Strassenverkehrsamts bestanden.

Aktuell gibt es keine umfassende Konformitätserklärung für das geplante Ladesystem. Dies bedeutet, dass der Installateur der Anlage, in diesem Fall die Empa, das Risiko trägt. Die Konformitätserklärung dient normalerweise als Nachweis, dass ein Produkt den geltenden Normen und Vorschriften entspricht und sicher betrieben werden kann. Ohne diesen Nachweis besteht die Gefahr, dass das Ladesystem nicht den erforderlichen Sicherheits- und Qualitätsstandards entspricht, was zu möglichen technischen Problemen, Sicherheitsrisiken und rechtlichen Konsequenzen führen könnte.

In diesem Kontext wird eine umfassende Risikobeurteilung notwendig, um die Sicherheit und Zuverlässigkeit des Pilotprojekts zu gewährleisten und mögliche Haftungsrisiken für die Empa zu reduzieren. Diese Beurteilung umfasst die Analyse potenzieller Gefahrenquellen, die Entwicklung von Sicherheitsmassnahmen sowie die Prüfung bereits durchgeführter Tests des Herstellers. Sie bildet die Grundlage für die Entscheidungsfindung und die Implementierung geeigneter Risikominderungsstrategien sowie des Standorts.

Gesetzliche Grundlagen / Spezifikationen und Vorabklärungen Hersteller

Gesetzliche Grundlagen

- Starkstromverordnung (StV)
- Verordnung über elektrische Niederspannungsinstallationen (NIV)
- Schweizerische Unfallversicherungsanstalt (SUVA) Regelungen
- Verordnung über die Unfallverhütung (VUV)
- Verordnung über das Inverkehrbringen elektrischer Erzeugnisse (EleV)
- Verordnung über den vorbeugenden Brandschutz (VBV)
- Brandschutznorm (VKF)

Spezifikationen und Vorabklärungen Hersteller

- WiTricity 11 kW Halo Spec Sheet.pdf
- WiTricity_Highly-Resonant-Wireless-Power-Transfer.pdf
- WiTricity BfE Q\u0026As Summary and Links.pdf
- Weitere Testberichte folgen – WiTricity ist gerade an der amerikanischen UL-Zertifizierung



Evaluierte Risiken

Brand Risiken

- **Überhitzung**
Ladesysteme können sich erhitzen, insbesondere bei hohen Ladeleistungen über längere Zeit.
- **Materialien**
Verwendung von brennbaren Materialien in der Umgebung der Ladestation kann das Risiko erhöhen.
- **Fehlfunktionen**
Technische Defekte oder Fehler in der Elektronik könnten zu Bränden führen.
- **Kabel und Verbindungen**
Schlechte Verbindungen oder beschädigte Kabel können Kurzschlüsse verursachen.
- **Lüftung**
Unzureichende Belüftung kann zur Ansammlung von Wärme oder brennbaren Gasen und letztlich zu Bränden führen.
- **Umgebungseinflüsse**
Externe Faktoren wie hohe Umgebungstemperaturen, direkte Sonneneinstrahlung oder Vandalismus können das Risiko eines Brandes erhöhen.
- **Sachen und Personenschutz**

Elektrische Risiken

- **Kurzschluss**
Fehlfunktionen in der elektrischen Schaltung können Kurzschlüsse verursachen.
- **Überspannung**
Spannungsüberschreitungen können die elektrischen Komponenten beschädigen.
- **Fehlerstrom**
Unsachgemässe Erdung kann zu gefährlichen Fehlerströmen führen.
- **Isolationsfehler**
Mangelhafte Isolierung kann zu Stromschlägen und anderen Sicherheitsrisiken führen.
- **Kontaktgefährdung**
Direkter oder indirekter Kontakt mit unter Spannung stehenden Teilen kann zu Stromschlägen führen. (Mensch und Tier)
- **Fehlende Schutzmechanismen**
Unzureichende Absicherung oder fehlende Schutzmechanismen können das Risiko elektrischer Unfälle erhöhen. (Mensch und Tier)
- **Elektromagnetische Interferenzen**
Induktives Laden erzeugt elektromagnetische Felder, die andere elektrische Geräte stören können.
- **Wartungsmängel**
Unzureichende oder fehlende Wartung kann zu elektrischen Problemen und erhöhten Risiken führen. (Bsp. Software)



Umgesetzte Schutzmassnahmen

- Überhitzung verhindern
Ladestation wird freistehend im Aussenbereich installiert.
- Umgebungsüberwachung
der gesamte Campus verfügt über Video-Überwachung.
- Kurzschluss- und Überspannungsschutz
Installation von Schutzvorrichtungen wie Fehlerstromschutzschalter, Sicherungen und Überspannungsableitern.
- Erdung und Isolierung
Sicherstellung ordnungsgemässer Erdung und Isolierung aller elektrischen Komponenten.
- Eingeschränkter Nutzerkreis
Nur vom Projektleiter und/oder anderen technisch- wissenschaftlichen Mitarbeitern der Abteilung «Chemische Energieträger & Fahrzeugsysteme» geschulte Personen haben Zugang zum Fahrzeug und können die Ladestation betreiben.

Restrisiken nach Umsetzung

- Elektromagnetische Interferenzen könnten weiterhin auftreten. Die Ladestation war aber teil der EMV-Prüfung des Fahrzeuges und hat alle Tests erfolgreich durchlaufen.
- Restliches Brandrisiko aufgrund von nicht vorhersehbaren Materialfehlern, Vandalismus oder unkontrollierbaren Umgebungsbedingungen sowie Fehlbedienung.

Dübendorf, 03.11.2025

Mathias Huber
Projektleiter



10.3 Vollständiges Messprotokoll der Effizienz- und Netzqualitätsmessungen


| Test | Comment | Test Date | SOC Range [%] | Charge Duration [h] | Total energy from the mains [kWh] | Total energy absorbed by vehicle [kWh] | Charger energy losses [kWh] | Efficiency absorbed/mains [%] |
|-------------------------------|------------------------------|------------|------------------|------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|----------------------------------|
| 01_Ind_c23C_Test01 | preliminary test inductive | 18.02.2025 | --- | --- | | | | |
| 02_Ind_c23C_Test02 | preliminary test inductive | 18.02.2025 | --- | --- | | | | |
| 03_Ind_c23C_XcYcZn_34-80 | inductive, all center, | 19.02.2025 | 34-80 | 03:40:01 | 39.72 | 35.71 | 4.01 | 89.91% |
| 04_Ref_w23C_Test04 | preliminary test conductive | 21.02.2025 | --- | --- | | | | |
| 05_Ref_w23C_18-80 | conductive | 24.02.2025 | 18-80 | 04:38:06 | 50.01 | 47.08 | 2.93 | 94.15% |
| 06_Ind_w23C_X+5_Y00_Z00_31-36 | +50mm X | 27.02.2025 | 31-36 | 00:46:11 | 8.49 | 7.52 | 0.97 | 88.56% |
| 07_Ind_w23C_X-5_Y00_Z00_36-44 | -50mm X | 27.02.2025 | 36-44 | 00:36:24 | 6.64 | 5.91 | 0.74 | 88.90% |
| 08_Ind_w23C_X00_Y-5_Z00_44-50 | - 50mm Y | 27.02.2025 | 44-50 | 00:27:10 | 4.82 | 4.33 | 0.49 | 89.78% |
| 09_Ind_w23C_X+5_Y-5_Z00_50-55 | +50 mm Y | 27.02.2025 | 50-55 | 00:28:29 | 4.99 | 4.45 | 0.54 | 89.09% |
| 10_Ind_w23C_X+5_Y+5_Z00_55-65 | +50mm X, +50mm Y | 27.02.2025 | 55-65 | 00:45:20 | 8.32 | 7.35 | 0.97 | 88.34% |
| 11_Ind_w23C_X-5_Y+5_Z00_65-76 | -50mm X, +50mm Y | 27.02.2025 | 65-76 | 00:57:55 | 10.59 | 9.45 | 1.14 | 89.25% |
| 12_Ref_w23C_19-90 | conductive | 03.03.2025 | 19-90 | 05:34:32 | 58.02 | 54.67 | 3.34 | 94.24% |
| 13_Ind_c23C_Xc_Yc_Zn_51-57 | all center | 05.03.2025 | 51-57 | 00:42:35 | 7.32 | 6.60 | 0.72 | 90.18% |
| 14_Ind_c23C_X-4YcZn_37-40 | -40mm Y | 06.03.2025 | 37-40 | 00:26:40 | 4.47 | 4.03 | 0.44 | 90.16% |
| 15_Ind_w23C_X-8YcZn_40-47 | -80mm Y | 06.03.2025 | 40-47 | 00:38:57 | 6.03 | 5.34 | 0.69 | 88.60% |
| 16_Ind_w23C_X-10YcZn_47-47 | Test aborted due to failure! | 06.03.2025 | --- | --- | | | | |
| 17_Ind_w23C_XcY-4Zn_48-53 | -40mm Y | 06.03.2025 | 48-53 | 00:26:45 | 4.40 | 3.96 | 0.44 | 90.09% |
| 18_Ind_w23C_XcY-8Zn_53-57 | -80mm Y | 06.03.2025 | 53-57 | 00:29:42 | 4.49 | 4.04 | 0.44 | 90.10% |
| 19_Ind_w23C_XcY-100-Zn_57-57 | Test aborted due to failure! | 06.03.2025 | --- | --- | | | | |
| 20_Ind_c23C_XcYcZn_43-62 | all center | 07.03.2025 | 43-62 | 01:44:29 | 18.91 | 17.03 | 1.88 | 90.04% |
| 21_Ind_w23C_XcYcZn_26-33 | all center | 10.03.2025 | 26-33 | 00:52:22 | 9.41 | 8.48 | 0.93 | 90.08% |
| 22_Ind_w23C_X+4YcZn_33-41 | +40mm X | 10.03.2025 | 33-41 | 00:38:12 | 6.39 | 5.72 | 0.67 | 89.55% |
| 23_Ind_w23C_X+8Y0Zn_51-53 | +80mm X | 10.03.2025 | 51-53 | 01:00:46 | 10.16 | 8.96 | 1.20 | 88.20% |
| 24_Ind_w23C_X+10Y0Zn_53-58 | +100mm X | 10.03.2025 | 53-58 | 00:34:10 | 4.91 | 4.28 | 0.63 | 87.15% |
| 25_Ind_w23C_X0Y0Zn_58-65 | all center | 10.03.2025 | 58-65 | 00:38:46 | 6.61 | 5.95 | 0.66 | 90.02% |
| 26_Ind_w23C_x-40_Y0Zn_65-66 | Test aborted due to failure! | 11.03.2025 | --- | --- | | | | |
| 27_Ind_w23C_x-20_Y0Zn_66-67 | Test aborted due to failure! | 11.03.2025 | --- | --- | | | | |
| 28_Ind_w23C_x0Y0Zn_67-67 | Test aborted due to failure! | 12.03.2025 | --- | --- | | | | |
| 29_Ind_c23C_X0Y0Zn_54-57 | all center | 14.03.2025 | 54-57 | 00:23:22 | 3.19 | 2.87 | 0.31 | 90.16% |
| 30_Ind_c23C_X-4Y0Zn_57-64 | -40mm X | 14.03.2025 | 57-64 | 00:36:04 | 6.08 | 5.49 | 0.60 | 90.16% |
| 31_Ind_w23C_x-8Y0Zn_64-72 | -80mm X | 14.03.2025 | 64-72 | 00:41:01 | 6.84 | 6.08 | 0.76 | 88.90% |
| 32_Ind_w23C_x-10Y0Zn_72-77 | -100mm X | 14.03.2025 | 72-77 | 00:34:44 | 4.92 | 4.33 | 0.59 | 88.00% |
| 33_Ind_w23C_x-12Y0Zn_77-82 | -120mm X | 14.03.2025 | 77-85 | 00:41:12 | 4.66 | 4.04 | 0.63 | 86.53% |
| 34_Ind_w23C_x0Y0zn_82-86 | all center | 14.03.2025 | 82-86 | 00:15:23 | 2.25 | 2.02 | 0.22 | 90.04% |
| 35_Ind_w23C_x0y+4z0_86-91 | +40mm Y | 14.03.2025 | 86-91 | 00:26:31 | 4.32 | 3.89 | 0.43 | 89.95% |
| 36_Ind_w23C_x0y+80zn_91-96 | +80mm Y | 14.03.2025 | 91-96 | 00:27:33 | 4.64 | 4.17 | 0.47 | 89.82% |
| 37_Ind_w23C_x0y0zn_44-45 | all center | 17.03.2025 | 44-45 | 00:24:20 | 3.78 | 3.40 | 0.37 | 90.09% |
| 38_Ind_w23C_x0y+100zn_45-51 | +100mm Y | 17.03.2025 | 45-51 | 00:39:12 | 6.48 | 5.83 | 0.66 | 89.87% |
| 39_Ind_w23C_x0y+120zn_51-57 | +120mm Y | 17.03.2025 | 51-57 | 00:31:55 | 5.32 | 4.76 | 0.56 | 89.54% |
| 40_Ind_w23C_x0y+140zn_57-62 | +140mm Y | 17.03.2025 | 57-62 | 00:25:55 | 4.27 | 3.79 | 0.48 | 88.83% |
| 41_Ind_w23C_x0y-40zn_62-65 | -40mm Y | 17.03.2025 | 62-65 | 00:18:21 | 2.72 | 2.45 | 0.27 | 89.95% |
| 42_Ind_w23C_x0y-80zn_65-70 | -80mm Y | 17.03.2025 | 65-70 | 00:22:20 | 3.43 | 3.09 | 0.34 | 90.08% |
| 43_Ind_w23C_x0y-100zn_70-73 | -100mm Y | 17.03.2025 | 70-73 | 00:16:49 | 2.38 | 2.14 | 0.24 | 90.01% |
| 44_Ind_w23C_x0y-120zn_73-74 | -120mm Y | 17.03.2025 | 73-74 | 00:09:56 | 1.54 | 1.39 | 0.15 | 90.23% |
| 45_Ind_w23C_x0y-140zn_74-77 | -140mm Y | 17.03.2025 | 74-77 | 00:15:22 | 2.24 | 2.02 | 0.23 | 89.88% |
| 46_Ind_w23C_x120y0zn_43-44 | +120mm X | 19.03.2025 | 43-44 | 00:07:49 | 0.64 | 0.54 | 0.09 | 85.20% |
| 47_Ind_w23C_x-80y-100zn_44-45 | -80mm X, -100mm Y | 19.03.2025 | 44-45 | 00:23:41 | 3.58 | 3.19 | 0.39 | 89.06% |



| Test | Comment | Test Date | SOC Range | Charge Duration | Total energy from the mains | Total energy absorbed by vehicle | Charger energy losses | Efficiency absorbed/mains |
|--------------------------------|-------------------------------|------------|-----------|-----------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------|---------------------------|
| | | | [%] | [h] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] |
| 48_Ind_w23C_x-80y+100zn_45-52 | -80mm X, +100mm Y | 19.03.2025 | 45-52 | 00:37:54 | 6.02 | 5.34 | 0.68 | 88.70% |
| 49_Ind_w23C_x80y100zn_52-56 | +80mm X, +100mm Y | 19.03.2025 | 52-56 | 00:33:38 | 3.89 | 3.41 | 0.47 | 87.84% |
| 50_Ind_w23C_x80y-100zn_56-61 | +80mm X, -100mm Y | 19.03.2025 | 56-61 | 00:27:35 | 4.70 | 4.16 | 0.54 | 88.58% |
| 51_Ind_w23C_x40y-100zn_61-65 | +40mm X, -100mm Y | 19.03.2025 | 61-65 | 00:20:55 | 3.34 | 3.00 | 0.34 | 89.91% |
| 52_Ind_w23C_x-40y-100zn_65-69 | -40mm X, -100mm Y | 19.03.2025 | 65-69 | 00:22:44 | 3.49 | 3.15 | 0.34 | 90.16% |
| 53_Ind_w23C_x-80y-80zn_69-73 | -80mm X, -80mm Y | 19.03.2025 | 69-73 | 00:22:26 | 3.64 | 3.25 | 0.39 | 89.27% |
| 54_Ind_w23C_x-80y80zn_73-77 | -80mm X, +80mm Y | 19.03.2025 | 73-77 | 00:21:24 | 3.41 | 3.03 | 0.38 | 88.96% |
| 55_Ind_w23C_x80y80zn_42-47 | +80mm X, +80mm Y | 21.03.2025 | 42-47 | 00:46:59 | 8.03 | 7.08 | 0.95 | 88.15% |
| 56_Ind_w23C_x80y-80zn_47-47 | Test aborted due to failure! | 21.03.2025 | --- | --- | | | | |
| 57_Ind_w23C_x80y-80zn_47-52 | +80mm X, -80mm Y | 21.03.2025 | 47-52 | 00:27:13 | 4.62 | 4.10 | 0.52 | 88.75% |
| 58_Ind_w23C_x40y-40zn_52-57 | +40mm X, -40mm Y | 21.03.2025 | 52-57 | 00:24:24 | 3.93 | 3.52 | 0.40 | 89.77% |
| 59_Ind_w23C_x-40y-40zn_57-63 | -40mm X, -40mm Y | 21.03.2025 | 57-63 | 00:34:24 | 5.69 | 5.13 | 0.56 | 90.20% |
| 60_Ind_w23C_x-40y40zn_63-66 | -40mm X, +40mm Y | 21.03.2025 | 63-66 | 00:21:35 | 3.34 | 3.01 | 0.33 | 90.10% |
| 61_Ind_w23C_x-40y100zn_66-72 | -40mm X, +100mm Y | 21.03.2025 | 66-72 | 00:27:08 | 4.55 | 4.08 | 0.47 | 89.71% |
| 62_Ind_w23C_x40y100zn_72-79 | +40mm X, +100mm Y | 21.03.2025 | 72-79 | 00:28:30 | 4.82 | 4.30 | 0.52 | 89.18% |
| 63_Ind_w23C_x40y40zn_79-85 | +40mm X, +40mm Y | 21.03.2025 | 79-85 | 00:36:34 | 6.14 | 5.50 | 0.64 | 89.65% |
| 64_Ind_w23C_x0y0z-20_66-67 | -20mm Z | 24.03.2025 | 66-67 | 00:27:05 | 4.45 | 4.01 | 0.44 | 90.08% |
| 65_Ind_w23C_x0y0z-40_67-74 | -40mm Z | 24.03.2025 | 67-74 | 00:33:43 | 5.78 | 5.18 | 0.60 | 89.63% |
| 66_Ind_c23C_x0y0z-60_75-82 | -60mm Z | 24.03.2025 | 75-82 | 00:37:54 | 6.56 | 5.76 | 0.80 | 87.77% |
| 67_Ind_w23C_x0y0z+20_82-87 | +20mm Z | 24.03.2025 | 82-87 | 00:27:37 | 4.56 | 4.07 | 0.49 | 89.26% |
| 68_Ind_w23C_x0y0z0_87-91 | all center | 24.03.2025 | 87-91 | 00:21:45 | 3.57 | 3.21 | 0.36 | 89.82% |
| 69_Ind_FlickerStart_w23C_11-12 | Flicker Startverhalten | 31.03.2025 | 11-12 | 00:08:17 | | | | |
| 70_Ind_Flicker_w23C_12-42 | Flicker | 31.03.2025 | 12-42 | 02:20:36 | | | | |
| 71_Ref_Flicker_w23C_42-72 | Flicker | 31.03.2025 | 42-72 | 02:06:17 | | | | |
| 72_Grid | Flicker Netz (ohne Last) | 31.03.2025 | --- | 02:20:41 | | | | |
| 73_Ind_Flicker_w23C_44-76 | Flicker | 02.04.2025 | 44-76 | 02:49:31 | | | | |
| 74_Ref_Flicker_w23C_41-59 | Flicker konduktive | 02.04.2025 | 41-59 | 01:35:21 | | | | |
| 75_Ind_Flicker_c23C_59-87 | Flicker | 14.04.2025 | 59-87 | 02:10:49 | | | | |
| 76_Flicker_Netz_blind | Flicker Netz (ohne Last) | 14.04.2025 | --- | 02:01:07 | | | | |
| 77_Flicker_Netz_blind | Test aborted due to failure! | 14.04.2025 | --- | --- | | | | |
| 78_Ind_THD-10Hz | Total Harmonic Distortion | 16.04.2025 | --- | 00:00:13 | | | | |
| 79_Ind_THD-1Hz | Total Harmonic Distortion | 16.04.2025 | --- | 00:02:36 | | | | |
| 80_Ref_THD-10Hz | Total Harmonic Distortion | 16.04.2025 | --- | 00:00:13 | | | | |
| 81_Ref_THD-1Hz | Total Harmonic Distortion | 16.04.2025 | --- | 00:02:25 | | | | |
| 82_R2_Ind_c23C_49-52 | 23° C | 28.04.2025 | 49-52 | 00:17:29 | 3.04 | 2.71 | 0.33 | 89.20% |
| 83_R2_Ind_c-10C_52-58 | -10°C | 29.04.2025 | 52-58 | 01:01:39 | 11.00 | 9.92 | 1.08 | 90.21% |
| 84_R2_Ind_c-10C_58-71_6cmEis | -10° C, 6cm ice | 29.04.2025 | 58-71 | 01:17:36 | 13.41 | 12.10 | 1.31 | 90.25% |
| 85_R2_Ind_c23C_53-65 | 23° C | 30.04.2025 | 53-65 | 01:06:31 | 11.95 | 10.75 | 1.20 | 89.96% |
| 86_R2_Ind_c35C_65-78 | 35° C | 30.04.2025 | 65-78 | 00:56:51 | 10.28 | 9.22 | 1.05 | 89.77% |
| 87_OD_Ind_x0y0zn_34-34 | PreTest | 11.06.2025 | 34-34 | 00:04:31 | 0.21 | 0.18 | 0.02 | 89.15% |
| 88_OD_Ind_x0y0zn_35-40 | all center, outdoor reference | 11.06.2025 | 35-40 | 00:26:44 | 4.59 | 4.13 | 0.46 | 89.93% |
| 89_Texa_TempLog_37-80soc_cond | battery temp log, conductive | 19.06.2025 | 37-80 | 03:30:28 | | | | |
| 90_Texa_TempLog_37-80soc_ind | battery temp log, inductive | 26.06.2025 | 37-80 | 03:50:14 | | | | |
| 91_IND_15-37_35deg_Accomp | battery temp log, 35°C | 30.06.2025 | 15-37 | 01:53:52 | | | | |
| 92_OD_Ind_x0y0zn_37-54 | all center, outdoor reference | 04.07.2025 | 37-54 | 01:30:54 | | | | |
| 93_Regen_Ind_54-90 | rain | 07.07.2025 | 54-90 | 04:10:59 | 32.46 | 29.19 | 3.27 | 89.92% |



10.4 Fahrzeugausweise mit Eintragung des induktiven Ladesystems (Eniwa)

| 2 | | 3 | |
|---|---|--|---|
| 01-06 Name, Vornamen Wohnort Nom, prénoms Domicile Cognome, nomi Domicilio Num, prenumi Domicil | Eniwa AG Industriestrasse 25 5033 Buchs AG | | 00.000.127.841 |
| 07 Geburtsdatum Date de naissance Data di nascita Data da nascit. | ** | 08 Heimatstaat Pays d'origine Paese d'origine Stadi d'origin | ** |
| 09 Versicherung Assurance Assicurazione Assicuranza | Zürich | | |
| 13 Kantonale Vermerke Verfügungen der Behörde | Annotations cantonales Désions de l'autorité Annotazioni cantonali Decisioni dell'autorità Annotaziuns chantunals Disposiziuns da l'autorità | | |
| Steuer-PS 15.00 KOFAMU / 04.12.2025 07:57 / ag-sfbi | | | |
| 234 | Anhängelast ungebremst: 750 kg Stützlast: 75 kg Einschränkungen durch Hersteller, Benutzerhandbuch und/oder Prüfbericht einer Prüfstelle sind zu beachten | | |
| 500 | Umbau am Unterboden für induktives Laden (Prototyp) Marke: WiTricity, L: 380mm, B: 380mm SN: VWA11421023348000800 *** Ende der Verfügungen *** | | |
| A 15 Schild Plaque Targa Numer | AG 142 061 | | weiss |
| 17 Bes. Verwendung Usage spécial Uso speciale Usar special | ** | | |
| 19 Art des Fahrzeugs Genre de véhicule Genere di veicolo Gener dal vehichel | Personenwagen | Code 001 | |
| D 21 Marke und Typ Marque et type Marca e tip | VW ID.5 Pro Perform. | | |
| E 23 Fahrgestell-Nr. Châssis no Telajo n. Schassis nr. | WVG ZZZ E2Z NP50 2916 | | |
| 25 Karosserie Carrosserie Carrozzeria Carrossaria | Stationswagen | Code 161 | |
| 26 Farbe Couleur Colore Color | weiss | | |
| 27 Plätze: Posti: Plaz: Total Total Total | 5 | 2 (vorne) avant) anteriori) davanti) | 30 Leergewicht Poids à vide Peso a vuoto Paisa da vid |
| 18 Stammnummer N° matricule N. di matricola Nr. da matricia | 225.124.814 | | 32 Nutz-/Sattelast Charge utile/sellella Carico utile/sella Chargia utila/sella |
| 24 Typgenehmigung Réception par type Approvazione del tipo Approvaziun dal tip | 1VR731 | | 33 Gesamtpgewicht Poids total Peso totale Paisa totala |
| 37 Hubraum Cylindrée Cilindrata Cilindrada | ** | | 35 Gewicht des Zuges Poids de l'ensemble Peso del convoglio Paisa compusziun |
| 76 Leistung Puissance Potenza Prestaziun | 150 | | 31 Anhängelast Poids remorquable Carico rimorchiato Chargia annessa |
| 78 Leergewicht poids à vide peso a vuoto paisa da vid | ** | | 55 Dachlast Charge sur le toit Carico sul tetto Chargia sin il tefo |
| B 36 1. Inverkehrsetzung 1° mise en circulation 1° messa in circolazione 1. entrada en circulaziun | 20.05.2022 AG | | 72 Emissionscode Code émissions Codice emissioni Code d'emissions |
| 38 Schafisheim, 04.12.2025 |  | | |
| 39 Prüfungen Expertises Perizie Examinaziuns | 20.05.2022 / AG | | |

10.5 Fahrzeugausweise mit Eintragung des induktiven Ladesystems (Empa)

| 2 | | 3 | |
|---|---|--|---|
| 01-06 Name, Vornamen Wohnort Nom, prénoms Domicile Cognome, nomi Domicilio Num, prenumi Domicil | EMPA Eid Materialprüf- und Forschungsanstalt Ueberlandstrasse 129 8600 Dübendorf | | 17597116 |
| 07 Geburtsdatum Date de naissance Data di nascita Data da nascit. | | 08 Heimatstaat Pays d'origine Paese d'origine Stadi d'origin | |
| 09 Versicherung Assurance Assicurazione Assicuranza | Zürich Versicherung | | |
| 13 Kantonale Vermerke Verfügungen der Behörde | Annotations cantonales Désions de l'autorité Annotazioni cantonali Decisioni dell'autorità Annotaziuns chantunals Disposiziuns da l'autorità | | |
| 24.11.2025 10:57:32 / KP1 | | | |
| 500 Umbau am Unterboden für induktives Laden (Prototyp) Marke: WiTricity, L: 380mm, B: 380mm SN: VWA11421024155000800 | | | |
| A 15 Schild Plaque Targa Numer | ZH 950874 | | weiss |
| 17 Bes. Verwendung Usage spécial Uso speciale Usar special | | | |
| 19 Art des Fahrzeugs Genre de véhicule Genere di veicolo Gener dal vehichel | Personenwagen | Code 01 | |
| D 21 Marke und Typ Marque et type Marca e tip | VW ID.5 Pro Perform. | | |
| E 23 Fahrgestell-Nr. Châssis no Telajo n. Schassis nr. | WVG ZZZ E2Z PP5 086 42 | | |
| 25 Karosserie Carrosserie Carrozzeria Carrossaria | Stationswagen | Code 161 | |
| 26 Farbe Couleur Colore Color | rot met. | | |
| 27 Plätze: Posti: Plaz: Total Total Total | 5 | 2 (vorne) avant) anteriori) davanti) | 30 Leergewicht Poids à vide Peso a vuoto Paisa da vid |
| 18 Stammnummer N° matricule N. di matricola Nr. da matricia | 225.649.431 | | 32 Nutz-/Sattelast Charge utile/sellella Carico utile/sella Chargia utila/sella |
| 24 Typgenehmigung Réception par type Approvazione del tipo Approvaziun dal tip | 1VS5 69 | | 33 Gesamtpgewicht Poids total Peso totale Paisa totala |
| 37 Hubraum Cylindrée Cilindrata Cilindrada | ***** | | 35 Gewicht des Zuges Poids de l'ensemble Peso del convoglio Paisa compusziun |
| 76 Leistung Puissance Potenza Prestaziun | *150.0 | | 31 Anhängelast Poids remorquable Carico rimorchiato Chargia annessa |
| 78 Leergewicht poids à vide peso a vuoto paisa da vid | ***** | | 55 Dachlast Charge sur le toit Carico sul tetto Chargia sin il tefo |
| B 36 1. Inverkehrsetzung 1° mise en circulation 1° messa in circolazione 1. entrada en circulaziun | 30.11.2023 | | 72 Emissionscode Code émissions Codice emissioni Code d'emissions |
| 38 Zürich, den 29.08.2024 | | | |
| 39 Prüfungen Expertises Perizie Examinaziuns | 29.11.2023 ZH | | |



10.6 User-Experience Kontrollgruppe

Statistische Analyse von Mittelwerten im Vergleich zum neutralen Wert

| Gruppe | Variable | Mittelwert | Neutral | t-test | p-value |
|-----------------------------------|--|------------|---------|--------|----------|
| Benutzerfreundlichkeit und Nutzen | KL wird bald akzeptiert | 3.67 | 3 | 13.02 | 9.72E-33 |
| Benutzerfreundlichkeit und Nutzen | KL ist einfach und intuitiv | 4.00 | 3 | 19.85 | 3.13E-62 |
| Benutzerfreundlichkeit und Nutzen | Ladekosten senken | 2.22 | 3 | -15.16 | 1.12E-41 |
| Benutzerfreundlichkeit und Nutzen | Aufladen wird bequemer | 4.25 | 3 | 26.25 | 2.03E-90 |
| Benutzerfreundlichkeit und Nutzen | Verbesserung von Qualität des täglichen Lebens | 3.82 | 3 | 14.41 | 1.76E-38 |
| Einstellungen | Einstellung zu E-Carsharing | 4.54 | 3 | 41.22 | 3.6E-149 |
| Einstellungen | Einstellung E-Autos | 4.52 | 3 | 40.92 | 2.9E-148 |
| Einstellungen | Einstellung zu Kabelgebundenes Laden | 3.86 | 3 | 19.77 | 6.54E-62 |
| Einstellungen | Einstellung zu KL | 3.73 | 3 | 13.33 | 5.24E-34 |
| Nutzungsabsicht | Kaufabsicht KL-Ladestation | 2.89 | 3 | -1.67 | 0.096537 |
| Nutzungsabsicht | Kaufabsicht E-Auto mit KL | 3.20 | 3 | 3.24 | 0.001279 |
| Nutzungsabsicht | KL würde meine Absicht E-Carsharing zu nutzen, erhöhen | 2.67 | 3 | -6.15 | 1.83E-09 |
| Nutzungsabsicht | Würde anderen KL empfehlen | 3.24 | 3 | 4.62 | 5.22E-06 |
| Wahrgenommene Risiken | Reduzierte Ladegeschwindigkeit | 3.50 | 3 | 8.96 | 1.13E-17 |
| Wahrgenommene Risiken | Erhöhte Kosten | 3.45 | 3 | 8.30 | 1.48E-15 |
| Wahrgenommene Risiken | Reisepläne verzögern | 2.58 | 3 | -7.24 | 2.21E-12 |
| Wahrgenommene Risiken | Batterie beschädigen | 2.16 | 3 | -15.63 | 1.13E-43 |
| Wahrgenommene Risiken | Schädliche Strahlung | 2.56 | 3 | -6.85 | 2.73E-11 |
| Wahrgenommene Risiken | Ineffizienz | 3.77 | 3 | 13.30 | 6.58E-34 |



10.7 Terminologie: Genehmigung, Zulassung, Konformität

| | |
|------------------------------|---|
| Fahrzeuggenehmigung: | behördliches Validieren des Prüfberichtes / Gutachtens einer Prüfstelle (APS) oder eines technischen Dienstes (TD) auf Konformität mit den gesetzlichen Anforderungen |
| Fahrzeugprüfung: | die physische oder rechnerische Prüfung des Fahrzeuges oder Systems bei einer Prüfstelle (APS) oder technischem Dienst (TD) |
| Fahrzeugzulassung: | Verknüpfung des Fahrzeuges mit einem Halter, einem Kennzeichen und einer Versicherung und amtliche Erlaubnis zur Teilnahme am Strassenverkehr |
| Anerkannte Prüfstelle (APS): | vom ASTRA anerkannte Prüfstelle (CH) |
| Technischer Dienst (TD): | nach EU-Typgenehmigungsrecht benannter Technischer Dienst |
| Notified Body (NB): | benannte Stelle im EU-Produktrecht (CE) zur Konformitätsbewertung |
| Konformitätserklärung: | vom Hersteller abgegebene Erklärung, dass ein Fahrzeugteil, Fahrzeugsystem oder ein Ausrüstungsgegenstand den für die Zulassung in der Schweiz technischen Anforderungen entspricht |
| Konformitätsbewertung: | schriftlicher Nachweis anhand eines Prüfberichtes einer APS, dass ein Gegenstand den schweizerischen Vorschriften entspricht |
| Konformitätsbeglaubigung: | schriftlicher Nachweis anhand eines Prüfberichtes einer ausländischen Prüfstelle, dass ein Gegenstand den schweizerischen Vorschriften entspricht |
| EMV: | Elektromagnetische Verträglichkeit: Fähigkeit eines Geräts oder Systems, in seiner elektromagnetischen Umgebung störungsfrei zu funktionieren, ohne dabei unzulässige elektromagnetische Störungen zu verursachen (Emission) oder gegenüber solchen Störungen unzureichend empfindlich zu sein (Immunität). |
| EMF: | Elektromagnetische Felder / Exposition: Elektromagnetische Felder, denen Personen in der Umgebung eines Geräts oder Systems ausgesetzt sein können; die Bewertung erfolgt anhand von Expositionsgrenz- bzw. Referenzwerten zum Schutz vor gesundheitlichen Wirkungen. |
| NEV: | Verordnung über elektrische Niederspannungserzeugnisse: regelt die Sicherheitsanforderungen für elektrische Geräte mit einer Nennspannung bis zu 1000 V AC resp. 1500 V DC |
| NIV: | Niederspannungs-Installationsverordnung: regelt die Anforderungen für elektrische Installationen, die mit einer Nennspannung von höchstens 1000 V AC resp. 1500 V DC |
| VEMV: | Verordnung über die elektromagnetische Verträglichkeit: regelt die Anforderungen an Betriebsmittel und Geräte, welche elektromagnetische Störungen verursachen können |
| TGV: | Verordnung über die Typgenehmigung von Strassenfahrzeugen |
| VTS: | Verordnung über die technischen Anforderungen an Strassenfahrzeuge |



10.8 Normenübersicht an kabelloses Laden von Elektrofahrzeugen

In der nachfolgenden Tabelle sind einige der wichtigsten Normen und Regelungen, welche das kabellose Laden von Elektrofahrzeugen direkt betreffen, zusammengefasst.

Tabelle 9: Normen und Regelungen zum kabellosen Laden von Elektrofahrzeugen

| <i>Nummer</i> | <i>Titel</i> | <i>Allgemeine Anforderungen</i> | <i>Fahrzeugtechnik</i> | <i>Ladeschnittstelle</i> | <i>Kabelloses Laden</i> |
|---------------|--|---------------------------------|------------------------|--------------------------|-------------------------|
| ISO 15118-1 | Strassenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation - Teil 1: Allgemeine Informationen und Festlegungen der Anwendungsfälle | x | x | x | x |
| ISO 15118-2 | Strassenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation - Teil 2: Anforderungen an das Netzwerk- und Anwendungsprotokoll | x | x | x | |
| ISO 15118-8 | Strassenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation - Teil 8: Anforderungen an physikalische- und Datenverbindungsschnittstelle zur drahtlosen Kommunikation | | x | | x |
| IEC 61980-1 | Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge - Teil 1: Allgemeine Anforderungen | | | x | x |
| IEC 61980-2 | Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge - Teil 2: Besondere Anforderungen für die Kommunikation zwischen Elektrofahrzeugen und Infrastruktur | | | x | x |
| IEC 61980-3 | Kontaktlose Energieübertragungssysteme (WPT) für Elektrofahrzeuge - Teil 3: Spezifische Anforderungen für die kontaktlosen Energieübertragungssysteme mit Magnetfeld | | | x | x |
| ISO 19363 | Elektrisch angetriebene Strassenfahrzeuge - Drahtlose magnetische Energieübertragung - Sicherheit und Interoperabilitätsanforderungen | | x | x | x |
| UN R10 | Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Fahrzeugen hinsichtlich der elektromagnetischen Verträglichkeit | x | x | | |
| UN R100 | Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der besonderen Anforderungen an den Elektroantrieb | x | x | | |



10.9 Messungen zu Netzurückwirkungen

10.9.1 Spannungsschwankungen (Flicker)

Messverfahren und -geräte

Die Betriebsspannung im öffentlichen Stromnetz unterliegt zeitlichen Schwankungen, die durch die Last und der damit verbundenen Änderung der Impedanz verursacht werden. Dies kann beispielsweise zu flackern (engl. flicker) einer Lampe führen. Darüber hinaus können Flicker auch Auswirkungen auf sensible technische Geräte wie elektronische Steuerungen, Messgeräte und Kommunikationssysteme haben, deren Funktion durch die instabile Spannungsversorgung beeinträchtigt werden kann.

Die Anforderungen an ein Flickermessgerät sind in der Norm IEC 61000-4-15 festgelegt. Der Hioki Poweranalysator (siehe Absatz 4.8.1.3) verfügt über einen IEC konformen Messmodus und wurde für die Flickermessungen verwendet.

Messgrößen

Für die Flickermessung werden an der netzseitigen Versorgung sowohl Strom- als auch Spannungswerte an allen drei Phasen (L1, L2 und L3) erfasst. Auf Basis dieser Messdaten berechnet das Flickermeter die folgenden Parameter:

- Kurzzeitflickerwert, Pst
Ein über ein Zeitintervall von zehn Minuten berechneter Wert, der die Wahrnehmbarkeit von Flicker auf kurze Sicht beschreibt.
- Langzeitflickerwert, Plt
Der Langzeit-Flickerwert, der als kubisches Mittel mehrerer Pst-Werte über längere Beobachtungsintervalle (12-mal Pst) gebildet wird.
- Relative stationäre Spannungsänderung, dc
Die maximale, während eines Flicker Ereignisses beobachtete Änderung der Spannung
- Maximale relative Spannungsänderung, dmax
Der höchste Spannungswert, der relativ zur Nominalspannung registriert wird.
- Dauer eines Flicker Ereignisses, Td(t)
Der Zeitraum, in dem die relative Spannungsänderung den Grenzwert überschreitet.

Zusammen erlauben diese Parameter eine umfassende Beurteilung der Netzurückwirkungen und der potenziellen Störeinflüsse auf angeschlossene Geräte.



Ergebnisse

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der Flickermessung. Der Beobachtungszeitraum betrug dabei 2 Stunden. Der Langzeitflickerwert (Plt) setzt sich demzufolge aus 12 aufeinanderfolgenden 10-minütigen Kurzzeitflicker-Intervallen (Pst) zusammen. Dabei sind sämtliche Parameter unauffällig und alle Grenzwerte wurden eingehalten.

Tabelle 10: Ergebnisse der Flickermessung

| | | Grenzwert IEC 61000-3-3 | L1 | L2 | L3 | max. | Grenzwert Ausschöpfung |
|---------------------------------|------|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------------------------------|
| P_{st} | - | 1,000 | 0,347 | 0,348 | 0,340 | 0,348 | 34,8 % |
| P_{lt} | - | 0,650 | 0,258 | 0,282 | 0,269 | 0,282 | 43,4 % |
| d_c | [%] | 3,300 | 0,818 | 0,637 | 1,071 | 1,071 | 32,5 % |
| d_{max} | [%] | 4,000 | 2,807 | 2,088 | 2,365 | 2,807 | 70,2 % |
| T_{d(t)>3,3%} | [ms] | 500 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0 | 0,0 % |

Zusätzliche Messwerte ohne Limits

| | | | | | |
|------------------------|-------|---|--------|--------|--------|
| U_{rms} | [V] | - | 229,16 | 231,24 | 230,57 |
| I_{rms} | [A] | - | 15,810 | 15,934 | 16,226 |
| P_{rms} | [kW] | - | 3,613 | 3,673 | 3,732 |
| S | [kVA] | - | 3,623 | 3,684 | 3,741 |
| Q | [var] | - | 115,14 | 262,42 | 143,54 |
| cos φ | - | - | 0,9972 | 0,9968 | 0,9977 |

Es ist wichtig zu beachten, dass solche Messungen in der Regel unter kontrollierten Bedingungen mit Hilfe von Netz-Simulatoren durchgeführt werden. Dadurch wird sichergestellt, dass netzseitige Störungen, die nicht vom Prüfling verursacht werden, ausgeschlossen werden. Da die Empa nicht über einen solchen Netz-Simulator verfügt, kann nicht ausgeschlossen werden, dass zumindest ein Teil der gemessenen Spannungsschwankungen nicht auf die Ladestation zurückzuführen sind, sondern bereits durch das Netz respektive durch andere daran angeschlossene Geräte verursacht wurden. Um diesem Umstand zumindest teilweise Rechnung zu tragen, wurde direkt anschliessend an die Flicker-Messung der Ladestation an derselben Messstelle eine Blindmessung des Netzes (also ohne angeschlossene drahtlose Ladestation) durchgeführt.

Abbildung 80 zeigt die Gegenüberstellung der Messergebnisse der WPT-Ladestation (entsprechend Tabelle 10, dargestellt in Rot) und der Blindmessung des Versorgungsnetzes (dargestellt in Blau). Die Ergebnisse der einzelnen Phasen (L1, L2 und L3) sind als überlagerte Balken dargestellt, wobei der höchste gemessene Wert aller drei Phasen als repräsentatives Resultat berücksichtigt wurde.

Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass etwa die Hälfte bis drei Viertel der Grenzwertausschöpfung auf bereits bestehende Spannungsschwankungen durch andere Geräte zurückzuführen sein könnte. Da die beiden Messungen jedoch nicht zeitsynchron durchgeführt wurden, bleibt diese Annahme unbestätigt. Klar ist jedoch, dass die drahtlose Ladestation Spannungsschwankungen im Versorgungsnetz verursacht, die deutlich unterhalb der zulässigen Grenzwerte liegen und somit keine kritischen Auswirkungen auf die Netzqualität haben.

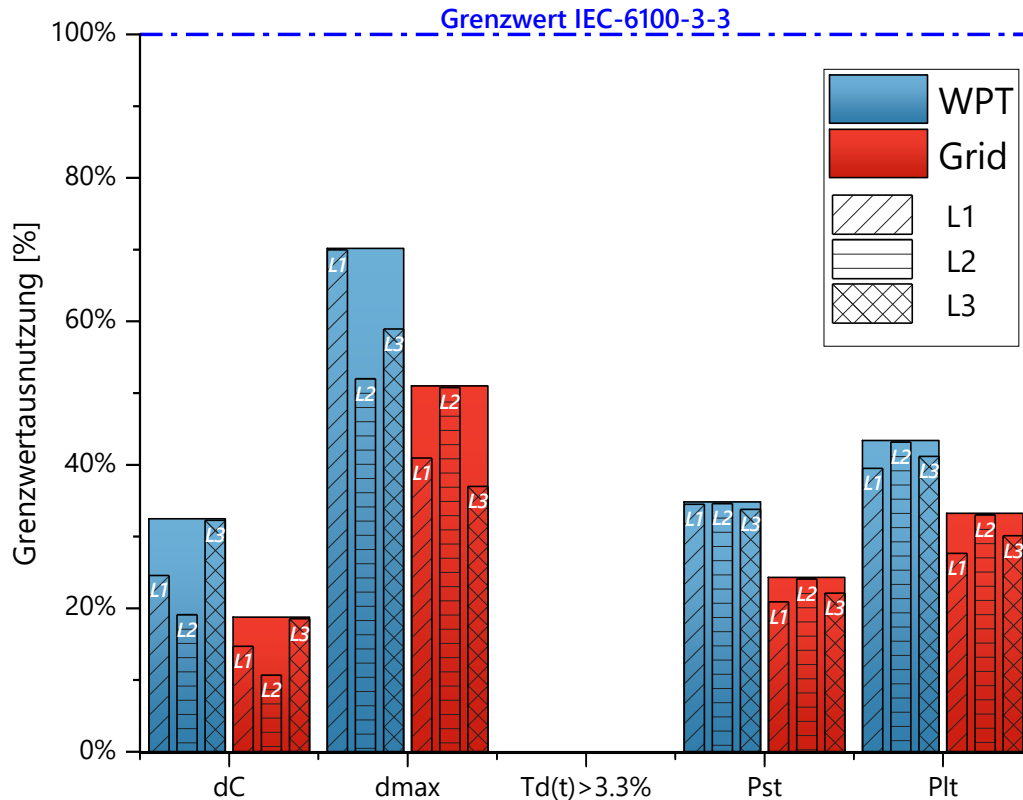


Abbildung 80: Flickermessung

10.9.2 Oberschwingungen und Verzerrung (THD & FFT)

Oberschwingungen sind harmonische Vielfache der Grundfrequenz (50 Hz), die zu Verzerrungen der Spannungs- und Stromwellenformen im Netz führen. Diese Verzerrungen entstehen durch nicht-sinusförmige Verbraucherlasten und können erhebliche Probleme in verschiedenen elektrischen Anlagen und Geräten verursachen.

Gemessen werden harmonische Oberschwingungen, indem ein Power Analyzer verwendet wird, der die Spannungs- und Stromwellenformen hochfrequent abtastet und mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) in ihre Frequenzkomponenten zerlegt.

Abbildung 81 zeigt die Analyse der Oberschwingungen der Spannung (in Blau) und des Stromes (in Grün) für alle drei Phasen (L1-L3). Die Werte der Referenzmessung (konduktives Laden) sind jeweils als schwarze Linie dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass solche Messungen zur Beurteilung der Netzqualität üblicherweise möglichst nahe am Netzanschlusspunkt (Point of Common Coupling - PCC) beziehungsweise an einem Netz-Simulator durchgeführt werden. In diesem Fall wurde die Messung am Anschluss des Ladegerätes am normalen Verteilnetz der Empa durchgeführt. Da die Kabelimpedanzen diese Messungen beeinflussen, kann annäherungsweise angenommen werden, dass:

1. Oberschwingungen in der Spannung eher die Qualität des Versorgungsnetzes und
2. Oberschwingungen im Strom eher die Güte der Last

beurteilen. Da sich Strom und Spannung gegenseitig beeinflussen, ist nicht auszuschliessen, dass über eine unetzeitige netzseitige Spannungsversorgung Fehler in diese Betrachtung einfließen.

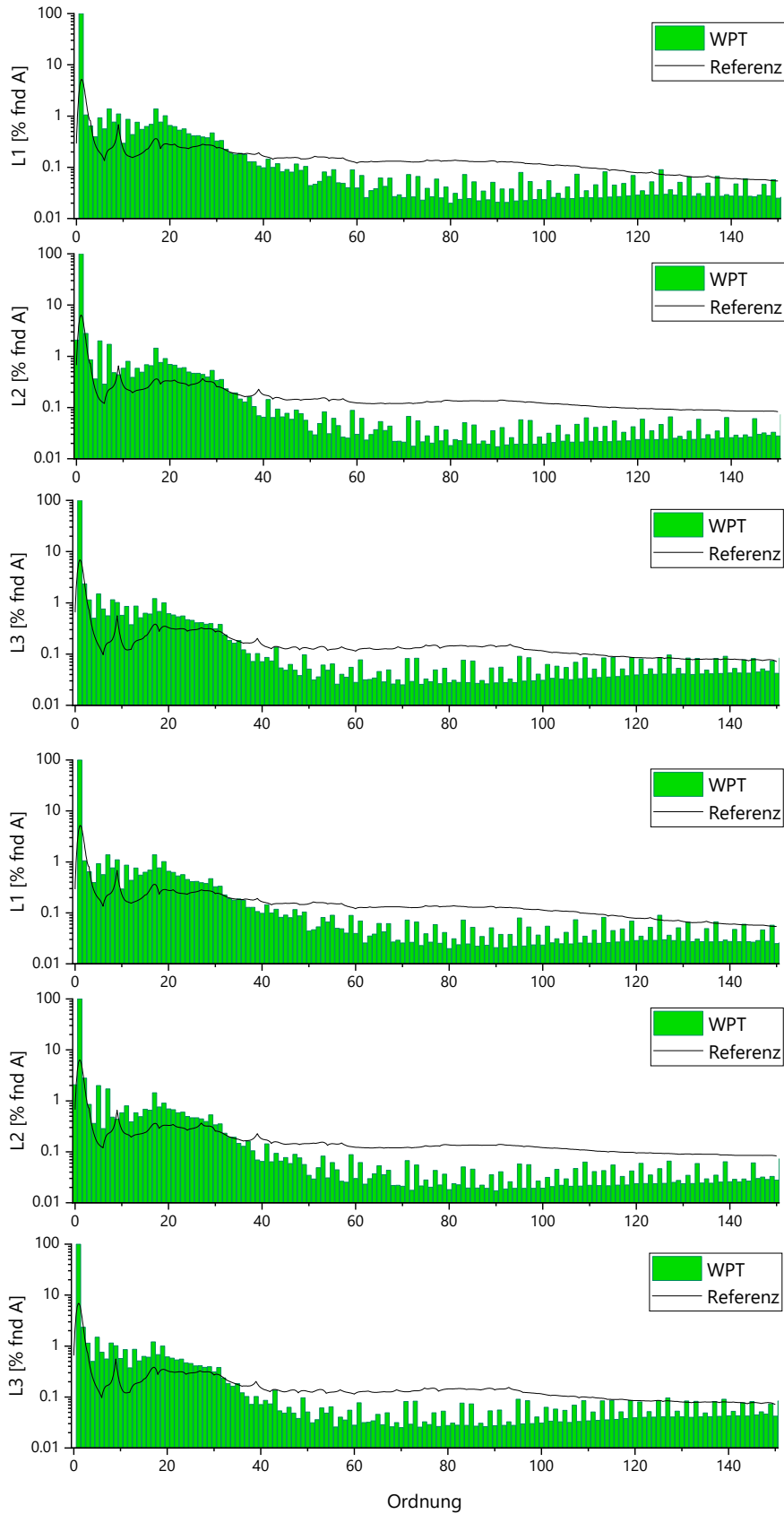


Abbildung 81: FFT-Analyse der harmonischen Oberschwingungen (Spannung blau, Strom rot)



Im unteren Frequenzbereich bis etwa zur 30. Harmonischen zeigt das drahtlose System im Vergleich zur Referenz eine erhöhte Oberwellenbildung. Diese höhere Oberschwingungsintensität ist jedoch vermutlich nicht direkt auf die kabellose Energieübertragung zurückzuführen, sondern vielmehr auf die Charakteristika der in der Wallbox integrierten Leistungselektronik – insbesondere des AC/DC-Wandlers und dessen Filterstufen. Diese Erhöhung ist als marginal zu betrachten. Der Grenzwert der Spannungsverzerrung gemäss IEEE 519-2014 liegt bei 5,0 % für einzelne Harmonische. Für Stromverzerrungen variieren die Grenzwerte je nach maximalem Kurzschlussstrom am PCC zwischen 1 % und 3 %. Da der Kurzschlussstrom des betreffenden Transformators unbekannt ist und die Messung nicht in unmittelbarer Nähe des PCC erfolgte, wurde die Einzeichnung der Grenzwerte im Diagramm der Stromverzerrungswerte bewusst weggelassen.

Oberschwingungsgesamtverzerrung (THD)

Ein zentraler Parameter zur Bewertung von Oberschwingungen ist der sogenannte Klirrfaktor, auch bekannt als Gesamtoberschwingungsgehalt (Total Harmonic Distortion, THD). Dieser beschreibt das Mass der gesamten harmonischen Verzerrung im Verhältnis zur Grundfrequenz.

Der THD wird somit als Verhältnis zwischen dem Effektivwert der Summe aller Oberschwingungen und dem Effektivwert der Grundschiwingung (50 Hz) angegeben. Im Unterschied zur FFT-Analyse der Oberschwingungen werden für die Berechnung des THD allerdings nur harmonische bis zur 50. Ordnung herangezogen. Im Wesentlichen fasst der THD also die Stärke aller harmonischen Verzerrungen relativ zur Grundfrequenz zusammen und dient als Schlüsselkennzahl für die Analyse der Netzqualität.

Die nachfolgende Tabelle 11 zeigt die gemessenen THD-Werte für die drahtlose Ladestation (WPT) im Vergleich zur Referenz (konduktive Ladung) sowie den Grenzwerten der IEEE 519-2014 für alle drei Phasen sowohl für Strom als auch für Spannung.

Tabelle 11: THD-Analyse

| | | Spannung | | | Strom | | |
|-----------------------------|-----|----------|-------|-------|------------------|------------------|------------------|
| | | L1 | L2 | L3 | L1 | L2 | L3 |
| WPT THD | [%] | 1,795 | 1,847 | 1,800 | 4,056 | 5,126 | 4,699 |
| Referenz (kond.) THD | [%] | 1,784 | 1,849 | 1,763 | 2,340 | 2,407 | 2,477 |
| Limit IEEE 519-2014 | [%] | 8,0 | 8,0 | 8,0 | 8,0 ³ | 8,0 ² | 8,0 ² |

Diese Werte entsprechen den Erwartungen und dem, was die FFT-Analyse bereits gezeigt hat: eine leichte Erhöhung der Stromverzerrung gegenüber dem konduktiven Laden. Diese Erhöhung ist jedoch als unkritisch anzusehen, da sie deutlich unterhalb der vorgesehenen Grenzwerte liegt.

³ Der Grenzwert für Stromverzerrungswerte beträgt nach IEEE 519-2014 je nach Kurzschlussstrom am PCC zwischen 5 % und 20 % für Geräte im entsprechenden Nennspannungsbereich. Da der Kurzschlussstrom am PCC unbekannt ist aber sicher deutlich höher als der 20-fache Laststrom liegen dürfte, wurde in dieser Tabelle 8,0 % Prozent als Grenzwert eingesetzt, was in diesem Sinne dem Worst-Case-Szenario entsprechen dürfte.



10.10 Vollständiger EMV/EMF Prüfbericht



Test-Report_EMCKP
5946D.pdf