

Schlussbericht der Bender GmbH & Co. KG

Verbundprojekt im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung

PVtec-Charger

**Zuverlässige und kostenoptimierte Ladestationen und
vernetzte neue Ladelösungen für die netzdienliche und
wirtschaftliche Ladung von Elektrofahrzeugen mit Strom aus
Erneuerbaren Energien**

Teilvorhaben: Sensorik zur Gewährleistung der elektrischen Sicherheit

Förderkennzeichen: 03ETE037C
Laufzeit des Vorhabens: 01.09.2021 – 31.12.2024
Projektleitung Bender: Maren Gombert (09/21-04/24) Mario Lehr (ab 04/24)
Autoren des Berichtes: Mario Lehr

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Förderkennzeichen 03ETE037A gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1.	Kurzfassung zur Aufgabenstellung	5
2.	Aufgabenstellung und Zielsetzung des Vorhabens	6
3.	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	9
4.	Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation	12
5.	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	13
6.	Erzielte Ergebnisse	15
6.1	Prädiktive und prospektive Instandhaltung durch Übermittlung von Sensorsignalen.....	15
6.1.1	Layer-Modell System Kommunikation	17
6.1.2	Use-Cases zu Wartung und Betrieb von Ladeinfrastruktur	18
6.2	Betrachtung der elektrischen Sicherheit bei galvanisch nicht getrennten DC- Wallboxen	20
6.2.1	Sicherheitsrisiken im „traflosen“ Betrieb	20
6.2.2	Äußere und innere Sicherheit.....	22
6.2.3	Bedeutung von Berührungsströmen und Abschaltzeiten	24
6.2.4	Zusammenfassung der Lösungsansätze und deren Limitierung.....	26
6.3	Verbesserter Sensor zur elektrischen Sicherheit für DC-Wallboxen	28
6.3.1	Fusi-Konzept für Basisschutz zur elektrischen Sicherheit	28
6.3.2	Umsetzung optimierter Sensorik.....	31
6.4	Sensoren für DC-Lader größerer Leistung mit Multi-Outlet.....	34
6.5	Innovation im Projekt	38
6.6	Forschungsbereiche für die Weiterentwicklung.....	38
7.	Bekanntgewordener Fortschritt von anderen Stellen	39
8.	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse.....	40
9.	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	41
10.	Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse	44
11.	Literaturverzeichnis.....	45

Impressum

Herausgeber:

Bender GmbH & Co. KG

Londorfer Straße 65

35305 Grünberg

Telefon: +49 (0)6401-807-0

www.bender.de

Juli 2025

© Copyright 2025, Bender GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten

1. Kurzfassung zur Aufgabenstellung

Übergeordnetes Leitziel des Verbundvorhabens war die Erforschung und Erarbeitung von interoperabler und netzdienlicher Systemintegration und deutliche Kostenreduktion der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität bei gleichzeitiger Verbesserung ihrer Zuverlässigkeit und der Sicherstellung aller aktuell und zukünftig relevanten Funktionalitäten, Zukunftsfähigkeit, Sicherheit (insb. Cyber-Security), Effizienz und ressourcenschonender langer Lebensdauern.

Hintergrund der gemeinsamen Motivation hierfür war der Grund, dass Ladelösungen für die Elektromobilität und entsprechende Ladestationen derzeit noch durch zu hohe Kosten und eine noch unzureichende Integrierbarkeit in das sich dynamisch wandelnde Energiesystem geprägt sind. Für die Verbesserung von der Wirtschaftlichkeit, der Nutzbarkeit sowie Umwelteigenschaften und Nachhaltigkeit von Ladelösungen in einem zukünftig vollständig aus Erneuerbaren Energien gespeisten Energiesystem bedurfte es der eingehenden Analyse, Erforschung und Erprobung von in der Regel technischen Hürden.

Erreicht werden sollen diese Ziele durch einen neuartigen Lösungsansatz mit einer Reihe technologischer Innovationen aus der Wechselrichter- und Digitalisierungstechnik sowie einer ganzheitlichen Betrachtung von der Leistungselektronik auf Baugruppenebene, incl. der Sensorik für elektrische Sicherheit bis hin zur optimalen Integration ins Energiesystem und weltweiten Anwendbarkeit für alle Systemkonstellationen.

In Summe sollte eine neue technologische Basis und optimierte Lösungsansätze geschaffen werden um die netzdienlichere und wirtschaftlichere Bereitstellung von Ladeinfrastruktur, gespeist aus erneuerbaren Energien zur Verbesserung der CO₂-Fußabdrücke über den Lebenszyklus.

Bender hat sich im Zuge des Teilvorhabens den Anteil der Verbesserung und Erforschung von neuen Methoden, Messtechniken und Lösungsansätzen zur elektrischen Sicherheit befasset. Konkret wurden dabei Lösungsansätze und deren Limitierung zur Ermöglichung von transformatorlosen DC-Wallboxen kleiner Leistung, verbesserte Lösungsansätze zur Verwendung in DC-Ladestationen großer Leistung sowie die Verbesserung der Sensordaten für eine prädiktive Instandhaltung betrachtet. Hierbei sollten erste Funktionsmuster und Ansätze für Datenpunkte erzeugt und im Rahmen des Verbundvorhaben bei den Partnern integriert und getestet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie das erschlossene Grundlagenwissen werden in den Ausbau der Ladeinfrastruktur bzgl. der Nutzung in neuen Sensoren und Konzepten der elektrischen Sicherheit sowie deren Datenverarbeitung und Weiterentwicklungen der branchenspezifischen Normen über deren zugeordneten technischen Arbeitskreise einfließen. Dies soll ein nachhaltigeres Betreiben und einen effizienteren Hochlauf sowie verbesserte Nutzerakzeptanz im Hochlauf der Elektromobilität stützen.

2. Aufgabenstellung und Zielsetzung des Vorhabens

Der konsequente Ausbau der Ladeinfrastruktur zur Elektromobilität geht gut voran, birgt allerdings nach wie vor Herausforderungen, welche einen noch schnelleren und nachhaltigeren Ausbau verzögern. Ladelösungen für die Elektromobilität und entsprechende Ladestationen sind derzeit noch durch zu hohe Kosten und eine noch unzureichende Integrierbarkeit in das sich dynamisch wandelnde Energiesystem geprägt.

Ziel des Verbundvorhabens war daher die interoperable und netzdienliche Systemintegration und deutliche Kostenreduktion bei gleichzeitiger Verbesserung der Zuverlässigkeit und Sicherstellung aller aktuell und zukünftig relevanten Funktionalitäten, Zukunftsfähigkeit, Sicherheit (insb. Cyber-Security), Effizienz und ressourcenschonender langer Lebensdauern. Der Fokus des Verbundprojektes lag auf der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Nutzbarkeit, Umwelteigenschaften und Nachhaltigkeit von Ladelösungen in einem zukünftig vollständig aus Erneuerbaren Energien gespeisten Energiesystem.

Die gemeinsame Zielsetzung des Vorhabens über alle Konsortialpartner hinweg umfasste drei Hauptschwerpunkte (a,b,c):

- a. Verbesserung der **Wirtschaftlichkeit** von Ladelösungen & Ladestationen (*inkl. Leistungselektronik, Vernetzung, eichrechtskonforme Abrechnung, Betriebsführung, Betriebskosten & Erlöse*) durch ihre Weiterentwicklung im Hinblick auf:
 - Kostenreduktion (*Ladestation, Zusatzkomponenten, Dienste*)
 - Qualitäts- & Zuverlässigkeitsverbesserung (*inkl. Nachweis, Lebensdaueroptimierung*)
 - Erbringung von Netz-Systemdienstleistungen (*zusätzliche Erlöse*)
 - Flexibilitäts- & Lastmanagement (*inkl. Prognose*) für energiewirtschaftliche Marktteilnahme (*reduzierte Strombezugskosten*)
 - Vereinfachung der Systemintegration, Vernetzung und Inbetriebnahme
- b. Verbesserung von **Umwelteigenschaften** und Nutzen/Nutzbarkeit durch:
 - verstärkte EE-Nutzung durch Synchronisation mit EE-Angebot (*sowohl marktorientiert durch Teilnahme an EE-Märkten, wie auch für Eigenverbrauchs-Anwendungen, inkl. Inselnetz*)
 - Flexibilitätserbringung für das zukünftig rein EE versorgte Netz (*stärkt EE-Verbreitung*)
 - kostenminimale Reduktion der Geräuschemissionen (insb. bei Schnellladung)
 - lebensdaueroptimierte, robuste Lösungen (*reduzieren Material- & Rohstoffverbrauch*)
- c. Nachweis der technischen und wirtschaftlichen **Realisierbarkeit** mittels:
 - Entwicklung innovativer Ladestations-Funktionsmusterlösungen für den öffentl. Raum und für das private Laden (*inkl. Digitalisierungslösungen für die Systemintegration*)
 - Piloterprobung & Evaluation der neuen Lösungen im Praxisbetrieb und Flottenversuch

Erreicht werden sollte dies durch einen neuartigen Lösungsansatz mit einer Reihe technologischer Innovationen aus der Wechselrichter- und Digitalisierungstechnik sowie einer ganzheitlichen Betrachtung von der Leistungselektronik auf Baugruppenebene bis hin zur optimalen Integration ins Energiesystem und weltweiten Anwendbarkeit für alle Systemkonstellationen. Der spezielle technologische Innovationsansatz des Vorhabens war, die Errungenschaften der Photovoltaik und ihrer Wechselrichter (Skaleneffekte, Kosten, Qualität, Zuverlässigkeit, Netzintegration) auf die Ladeinfrastruktur anzuwenden, dabei die elektrische Sicherheit stets über neue Ansätze zu gewährleisten bzw. zu verbessern und gleichzeitig das Gesamtsystem im Hinblick auf konsequente Sektor Kopplung und Digitalisierung weiterzuentwickeln.

Dabei sollten alle Systemklassen der Elektromobilität und Energiesysteme, von der privaten Wallbox über die Flottenlösung im Gewerbe bis hin zu großen Ladeparks und öffentlichen Ladestationen für Deutschland und auch weltweit adressiert werden.

Im Vorhaben sollten die grundlegenden Systemarchitekturen und Technologielösungen für skalierbare Anwendungen geschaffen und neuartige Ladelösungen über Funktionsmuster realisiert und via Labor- und Felderprobung evaluiert werden.



Bild 1: Netzdienliche Systemintegration von kosteneffizienter, robuster Ladeinfrastruktur in einem mit Erneuerbaren Energien versorgten Energiesystem, Visualisierung der Verbundprojekt-Vision (bei Antragstellung/Projektkonzeption in 2021)

Zur Sicherstellung notwendiger wirtschaftlicher, technischer und wissenschaftlicher Kompetenzen und Expertise innerhalb des Vorhabens schlossen sich Hersteller für Ladeinfrastruktur sowie Universitäten mit entsprechenden Fachbereichen, Unternehmen der PV- bzw. Wechselrichter-Technik und der Sicherheitstechnik eng zusammen. Weitere Hinweise zu Partnern & Konsortium siehe Kapitel 3+5.

Gemäß der zentralen Arbeitspakete AP3, AP4, AP5 wurden aus technischer Sicht im Wesentlichen das öffentliche DC-Laden mit Blick auf größerer Leistung, das Laden zu Hause mit möglichst einer transformatorlosen DC-Wallbox kleiner Leistung sowie die Systemintegration aller genannten Ausprägungen untersucht und erforscht.

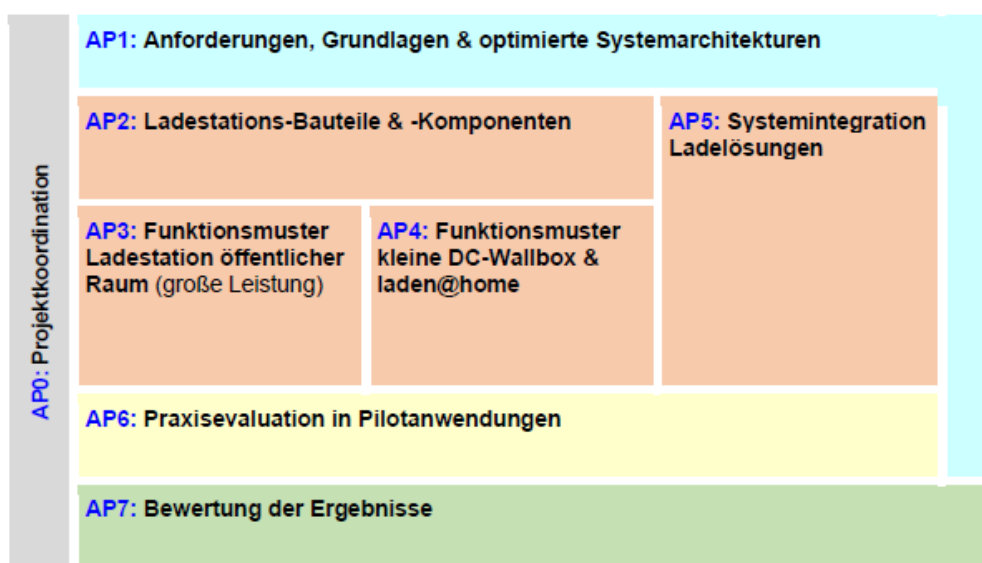


Bild 2: Übersicht der bei Antragstellung/Projektkonzeption in 2021 definierten Arbeitspakete

Abgeleitet von der übergeordneten Zieldefinition des Verbundvorhabens sollte im Teilvorhaben von Fa. Bender als wissenschaftlich-technische Arbeitsziele die folgenden Erkenntnisse und Lösungsbereiche erarbeitet, mit den Verbundpartnern abgestimmt und zu einer Erprobung vorangetrieben werden:

- Technologie- und Funktionsmusterlösungen sowie Technologieerkenntnisse für Sensoren zur Sicherstellung der elektrischen Sicherheit zum Einsatz in Trafolosen DC-Ladeeinheiten bzw. DC-Ladestationen größerer Leistung
- Erkenntnisse zu Systemarchitekturen und Sicherheitskonzepten
- Technologieerkenntnisse zu Sensoren für Trafolose Ladestationen und Eignung von PV-WR-Technik für Ladestations-Leistungselektronik
- Erprobung und Evaluation von Sensordaten zum erweiterten Anlagenmonitoring
- Funktionsmuster von integrierbarer Sensorik für DC-Ladestationen großer Leistung

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Gemäß der Arbeitspaketplanung wurde zu Beginn des Verbundvorhabens im Rahmen des AP1 die systematische Analyse aller Anforderungen, Rahmenbedingungen und Zukunftstrends sowie eine Reihe von Grundlagenuntersuchungen und die Erarbeitung optimaler und zukunftsicherer Systemarchitekturen verfolgt. Dabei sollten in einer ganzheitlichen Betrachtung der Ladestations- und Ladelösungsthematik insgesamt zunächst die Grundlagen für die weiteren FuE-Arbeiten im Projekt gelegt werden.

Seitens Bender erfolgte hier die Recherche, Aufbereitung und Analyse der Anforderungen für zukünftige Sensorik zur Verwendung in Trafo-losen DC-Wallboxen bzw. kostenreduzierte Sensorik zur Integration in DC-Schnellladern, sowie die internationale Recherche relevanter Zukunftstrends im Hinblick auf die in den Ladelösungen zum Einsatz kommenden Technologien und Kostenzielen und die Erarbeitung, Diskussion & Dokumentation der Anforderungsprofile, insbesondere auch in gemeinsamen Fachworkshops mit den Partnern zum Cross-Check der firmenübergreifenden Zwischenergebnisse deren Teilvorhaben. Besonderes Augenmerk lag hierbei in der Diskussion von festgestellten Road-Blockern bei der Beurteilung von Trafo-losen DC-Wallboxen, sowohl aus normativer als auch technischer Sicht.

Um bei den zukunftsfähigen Systemarchitekturen neue optimale Systemarchitekturen mit Blick auf Konzepte, Systempartitionierung, Schnittstellen & Protokolle sowie Betriebsstrategien für Ladelösungen und ihre Systembausteine zu erarbeiten und somit der Möglichkeit Skaleneffekte zu erschließen, befasste sich Bender mit dem Entwurf geeigneter Sensorarchitekturen, der Kommunikationsschnittstellen zwischen Sensorik und Steuereinheiten sowie Optimierung im Hinblick auf die datentechnische Interoperabilität. Weiterhin erfolgte die Diskussion der Systemarchitekturen und der relevanten Betriebsweisen bzw. Use-Cases, insbesondere im Hinblick auf die Nutzung der Sensordaten zur Ermöglichung prädiktiver Instandhaltung. Darüber hinaus wurden auf Basis vorhandener Lösungsansätze und Produkten diverse Verbesserungspotentiale zur Verringerung der Hardware- und Fertigungskosten von Sensoreinheiten analysiert und somit die Grundlagen für die Arbeitspakete AP2 bis AP5 gelegt.

Unter Berücksichtigung der zuvor erarbeiteten Grundlagen erfolgte im Rahmen der Forschungs- und Entwicklungsphasen und über die Arbeitspakete AP2 bis AP5 die technologische Weiterentwicklung modularer Ladestations-Bauteile & -Komponenten, der Aufbau von entsprechenden Funktionsmusterlösungen sowie dessen Evaluation und Erprobung. Für Bender mit dem insgesamt kleinsten Anteil am Gesamtprojekt lag im AP2 neben den Tätigkeiten in AP1 der Hauptumfang des Teilvorhabens. Die weiteren Arbeitspakete als Schwerpunkt der Konsortialpartner wurden mitwirkend und unterstützend betreut.

Die konkrete Technologieentwicklung verschiedener Komponenten und Baugruppen, welche sich in unterschiedlichen Ladestationsarten und Skalierungen einsetzen lassen sollen, erfolgte im Rahmen des AP2 und baute auf vorhandenen Technologien und Konzepten der Bereiche 6mA-Fehlerstromsensoren und Isolationsüberwachung auf.

Diese neuen Komponenten und Technologielösungen sollten sowohl in den im Projekt adressierten Ladestations-Funktionsmusterlösungen (AP3 und AP4) eingesetzt und weitergehenden Untersuchungen und Bewertungen im Rahmen von AP5 -AP7 genutzt werden. Die Technologieentwicklung für diese neuen Ladestationskomponenten erfolgte vor allem im Hinblick auf Modularität, Kostenreduktion, Zuverlässigkeit und erweiterte Funktionalitäten.

Die bereitgestellten Funktionsmuster wurden im Rahmen der Pilotversuche der Konsortialpartner verwendet und bildeten somit einen Teil der Gesamterprobung ab. Mit der Zusammenfassung, Aufbereitung und abschließenden Diskussion im Konsortium wurden die Ergebnisse, Erkenntnisse und offene Fragestellungen erörtert, sowie weitergehende Empfehlungen für die fortlaufende Verwertung, Forschung und Weiterarbeit ausgesprochen. Das Verbundforschungsvorhaben wurde zum 31.12.2024 erfolgreich beendet.

Zusammenarbeit im Verbund

Um die anspruchsvolle Zielsetzung des Vorhabens – einen signifikanten und im Praxisbetrieb nachgewiesenen Fortschritt bei Wirtschaftlichkeit, Zuverlässigkeit und Systemintegration von Ladelösungen – erreichen zu können, bedurfte es einer branchenübergreifenden, engen Zusammen-arbeit von Ladeinfrastruktur-Herstellern mit Unternehmen der Solar- und Wechselrichter-Technik, der Energiesystemtechnik und der Sicherheitstechnik sowie entsprechender Wissenschaftspartner aus der ingenieurwissenschaftlichen Forschung.

Einen Überblick über das Konsortium und die Aufgaben- und Rollenverteilung gibt darüber hinaus auch die nachstehende Tabelle.

Tabelle 1: Übersicht der Projektpartner im Konsortium

Arbeitsteilung & Aufgaben der Projektpartner		
	Branche / Kompetenzen	Aufgaben / Rollenverteilung
SMA (inkl. coneve)	PV-Wechselrichter-Hersteller, Energiesystemtechnik & Datendienste	laden@home & Funktionsmuster kleine DC-Wallbox sowie Integration in PV- & Energiemanagement-Lösungen
aixACCT Systems	Entwicklung Ladestations-Komponenten	Technologieentwicklung für Ladestations-Komponenten
Bender	Hersteller elektr. Sicherheitstechnik und Ladecontroller	Elektr. Sicherheits- und Steuerungstechnik für transformatorlose Ladestationen
elaxon (inkl. AixControl)	Herstellung & Vertrieb Ladestationen	Funktionsmuster innovative Ladestation großer Leistung für den öffentlichen Raum
Uni Kassel Prof. Brabetz	Forschung zur Elektrotechnik in Fahrzeugen	Mission Profiles und thermisches Monitoring
RWTH Aachen Prof. De Doncker	Forschung zur Leistungselektronik und Ladetechnik	Labortest-Charakterisierung und Erprobung & Evaluation der Ladesäulen

Kurzportrait der Bender GmbH & Co. KG

Die **Bender GmbH & Co. KG** mit rund 1300 Beschäftigten und 250 Mio. Euro Umsatz (2023) als zentraler Teil der Bender Group ist ein weltweit agierendes mittelständisches Familienunternehmen und erfolgreicher Pionier und Marktführer für elektrische Sicherheitsprodukte und -lösungen. Das Spektrum umfasst Mess-, Schutz- und Überwachungssysteme für Anwendungen im Bereich Maschinen- und Anlagenbau, der Mobilität für Elektro- und Hybridfahrzeuge, der Energieerzeugung und -verteilung, der regenerativen Energiegewinnung sowie für die Gebäudetechnik, Krankenhäuser und vielfältige industrielle Bereiche. Produziert wird an zwei Standorten in Deutschland.

4. Wissenschaftliche und technische Ausgangssituation

Zu Projektstart im Jahr 2021 stellte sich die wissenschaftliche und technische Ausgangssituation wie folgt dar:

Ladelösungen für die Elektromobilität und entsprechende Ladestationen sind derzeit für unterschiedlichste Einsatzbereiche und Use-Cases in einer Vielzahl an Varianten und Leistungsklassen marktverfügbar. Für einen breiten, mit konventioneller Verkehrstechnik wettbewerbsfähigen und gleichzeitig nachhaltig umweltverträglichen, massentauglichen Großserieneinsatz bestehen jedoch noch vielfältige und höchst anspruchsvolle Herausforderungen, die es zu lösen gilt:

- Ladestationen und Ladelösungen sind für einen breiten Einsatz derzeit noch deutlich zu teuer, hier ist eine drastische Kostenreduktion nötig
- Ungewissheit, wohin sich die zukünftigen Rahmenbedingungen, Use-Cases und Anforderungen entwickeln werden – dies gefährdet die dauerhafte Nutzbarkeit der Ladeinfrastruktur
- Proprietäre und inkompatible Lösungen behindern oft Nutzbarkeit und Komfort
- Elektromobilität ist nur dann nachhaltig, wenn der Strom aus Erneuerbaren Energien kommt
- Bei der Energiewende muss auch die Elektromobilität ihren Beitrag zu Netzsystemdienstleistungen und Flexibilitätserbringung leisten

Mit dem geplanten Vorhaben sollte ein relevanter Beitrag zur Kostenreduktion und nachhaltigen Systemintegration und somit der Lösung all dieser Herausforderungen geleistet werden. Kerngedanke ist es dabei, die Errungenschaften der Photovoltaik (Skaleneffekte, Kosten, Qualität, Zuverlässigkeit, Netzintegration) auf die Ladeinfrastruktur anzuwenden und gleichzeitig im Hinblick auf Sektor Kopplung und Digitalisierung weiterzuentwickeln. Insbesondere der in drei Jahrzehnten Forschung und Entwicklung erreichte Stand der PV-Wechselrichtertechnik mit 100 Gigawatt pro Jahr Weltmarktvolumen bietet hier eine hervorragende technologische Ausgangsbasis und das Potential für einen schnellen, kurzfristigen Innovationssprung.

Weiterhin gab und gibt es auch auf Seiten der Fahrzeug OEMs und in der Auslegung der Fahrzeugschnittstelle zur Ladeinfrastruktur immer wieder Bestrebungen die oben genannten Punkte zu adressieren.

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Zur Sicherstellung der Zielsetzung des Verbundvorhabens bedurfte es verschiedener Disziplinen um die 3 als wesentlich genannten Aspekte um die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit und Umwelteigenschaften sowie der Nachweis der technischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit erreichen zu können.

Dabei bedurfte es einer Einbindung verschiedener Branchen bzgl. notwendiger wirtschaftlicher, technischer und wissenschaftlicher Kompetenzen und Expertise, vertreten durch folgende Hersteller für Ladeinfrastruktur sowie Universitäten/ Wissenschaftspartner mit entsprechenden Fachbereichen, Unternehmen der PV- bzw. Wechselrichter-Technik und der Sicherheitstechnik:

- **SMA Solar Technology AG**, Niestetal
- **coneva GmbH**, Niestetal
- **aixACCT Systems GmbH**, Aachen
- **Bender GmbH & Co. KG**, Grünberg
- **elexon GmbH**, Aachen
- **AixControl GmbH**, Aachen
- **Universität Kassel**
- **RWTH Aachen**

Gemäß Gesamt-Vorhabens-Beschreibung wurden die coneva GmbH und die AixControl GmbH über entsprechende FuE-Unteraufträge eingebunden. Einen Überblick über das Konsortium und die Aufgaben- und Rollenverteilung gibt die nachstehende Tabelle.

Tabelle 2: Übersicht der Projektpartner und deren Rollen / Teilvorhaben

Arbeitsteilung & Aufgaben der Projektpartner im Verbundprojekt		
Projektpartner	Branche / Kompetenzen	Teilvorhaben / Rollenverteilung
	PV-Wechselrichter-Hersteller, Energiesystemtechnik & Datendienste	• Laden@home & Funktionsmuster kleine DC-Wallbox bzgl. Leistungselektronik • Integration in PV- & Energiemanagement-Lösungen • Gesamtprojekt-Koordinator
	Entwicklung Ladestations-Komponenten	• Technologieentwicklung für Ladestations-Komponenten, insbesondere optimierter Ladecontroller
	Hersteller elektr. Sicherheitstechnik und Ladecontroller	• Elektr. Sicherheits- und Steuerungstechnik für transformatorlose Ladestationen.

		• Sensorik bzw. Ladestationskomponenten zur Gewährleistung der elektrischen Sicherheit bei DC-Ladern größerer Leistung
 	Herstellung & Vertrieb Ladestationen	• Funktionsmuster innovative Ladestation großer Leistung für den öffentlichen Raum
	Forschung zur Elektrotechnik in Fahrzeugen	• Mission Profiles und thermisches Monitoring
	Forschung zur Leistungselektronik und Ladetechnik	• Labortest-Charakterisierung und Erprobung & Evaluation der Ladesäulen • Charakterisierung und Analyse von Leistungselektronik

Weitere Zusammenarbeit:

Seitens Bender wurden über den guten Austausch innerhalb des Verbundprojektes auch Inhalte und Ergebnisse sowie allgemeine Fragestellungen zur elektrischen Sicherheit innerhalb der Elektromobilität und verwandten Industriebereichen bzgl. ähnlichen Aufgabenstellungen mit Vertretern der fachspezifischen Normung (u.a. ZVEI und DKE) rund um die Ladeinfrastruktur und Netzintegration sowie parallellaufende Forschungsvorhaben wie z.B. DC-INDUSTRIE2 (03EI6002A-Q) sowie IMITAES als Teil des Clean Sky 2 Undertaking (Grant agreement No 101008082) diskutiert.

6. Erzielte Ergebnisse

Mit Blick auf die definierte Zielsetzung des Verbundforschungsvorhaben PVtec Charger, hat sich Bender im Teilvorhaben mit den Themengebieten der elektrischen Sicherheit auseinandergesetzt. Insbesondere wurden die Ziele des Vorhabens um deutliche Kostenreduktion bei gleichzeitiger Verbesserung der Zuverlässigkeit und Sicherstellung aller aktuell und zukünftig relevanten Funktionalitäten, Zukunftsfähigkeit, Sicherheit und ressourcenschonender langer Lebensdauern sowie der Verbesserung der Nutzbarkeit seitens Bender adressiert. Hierbei konnten Möglichkeiten der intelligenten Nutzung von Sensordaten zur Verbesserung der prädiktiven Instandhaltung von Ladestationen, zahlreiche Ansätze zur Kostenreduzierung im Blick auf hochintegrierter und automatisierter Ladestationsproduktion incl. deren Komponentenkosten sowie neue Konzepte zu optimierten Architekturen von DC-Ladestationen größerer Leistung aufgezeigt werden. Besonderer Fokus lag auf der Betrachtung der elektrischen Sicherheit bei galvanisch nicht getrennten (trafo-losen) DC-Wallboxen, insbesondere auf der Umsetzbarkeit dessen bzw. der Identifizierung von technologischen Show-Stoppern“ und Hürden. Hierbei konnte neben ersten Funktionsmustern auch ein breites Spektrum an Grundlagenwissen erarbeitet, eine Basis für technische Serienprodukte geschaffen sowie verbleibende Forschungsfragen aufgestellt werden. Die erzielten Ergebnisse werden in den folgenden Kapiteln entsprechend aufgezeigt.

6.1 Prädiktive und prospektive Instandhaltung durch Übermittlung von Sensorsignalen

In derzeit am Markt üblicher Ladeinfrastruktur ist die Datenanbindung der Ladepunkte an ein Backend über den OCPP-Standard 1.6 definiert. Dabei werden unter anderem Betriebszustände, Daten zum Ladevorgang und Authentifizierung des Users übertragen. Es findet zwar kontinuierlich eine Erweiterung des Standards für erweiterte Diagnose und zur Abbildung von Lade-Use-Cases statt, allerdings wird zu Beginn des Verbundforschungsvorhabens nicht alle vorhandenen Daten einer Station, insbesondere mit Blick auf die elektrische Sicherheit an die Backends zur weiteren Interpretation übertragen. Im Grundverständnis der Branche sollen Sensoren zur elektrischen Sicherheit bei Eintreten eines Fehlerzustandes lediglich lokal den Ladevorgang beenden. Rein aus Sicht der Safety ist dies sicherlich hinreichend gelöst, allerdings wird damit der Aspekt der Wartungskosten und Nutzerakzeptanz nicht ausreichend adressiert. Im Wesentlichen werden folgende Fragestellungen betrachtet:

- ➔ Lassen sich Wartungskosten und Zeitpunkte vorhersagen und verringern?
- ➔ Können von Sensordaten der Ladestation auch Rückschlüsse auf das Fahrzeug getroffen werden?
- ➔ Welche Sensor-Daten müssten dazu wie erhoben werden?

Um diese Fragestellungen beantworten zu können, wurde zunächst die Theorie zu Instandhaltungskosten betrachtet. Hierbei spielt der Vergleich bisheriger Wartungskosten mit den ggf. zu tätigen Mehrkosten und den erwarteten Einsparungen bei sinnvoller Nutzung der gewonnenen Informationen eine entscheidende Rolle. Im Fall von Ladestationen erfolgt die Erzielung von Erträgen im Wesentlichen über den Verkauf von Energie. Somit ist neben der tatsächlichen Nutzung der Ladestation auch die Verfügbarkeit der Anlage selbst ein elementarer Anteil aus Sicht der Betreiber.

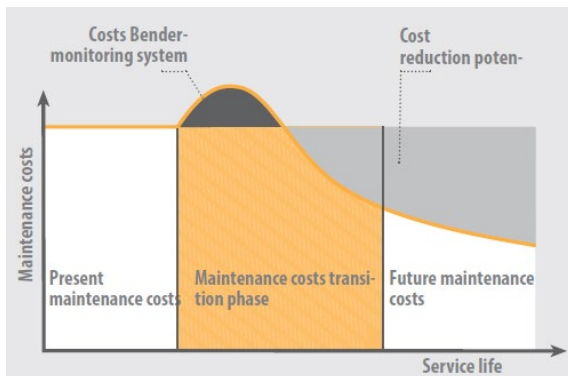


Bild 3: Maintenance Kosten-Modell

Da die in den folgenden Kapiteln betrachteten Sensoren für elektrische Sicherheit neben dem rudimentären Melden von Schwellwertunter- und Überschreitungen auch größere Messbereiche aufweisen und über Datenschnittstellen verfügen, galt es die Mehrwerte der Datennutzung auf höheren Layer als nur auf Ladestationsebene hinaus zu bewerten. Über eine Referenzstation wurden die Daten der folgenden Abbildung 4 gewonnen und es soll der Mehrwert Beispiel mit einem Schwellwert von 100kOhm diskutiert werden. Während des ersten Zeitbereich hat die Station ein stabiles höheres Isolationsniveaus, welches dann aber auf Werte leicht oberhalb der Schaltschwellen abfällt. Sofern diese Messwerte nicht weiter interpretiert werden, wirkt die Ladestation als voll tauglich. Allerdings verhärtert sich der niedrigere Messwert und so könnte die Isolation innerhalb kurzer Zeit und unerwartet in den kritischen Bereich abfallen und die Ladestation außer Betrieb geschaltet werden. Ist dieses niedrigere, aber noch unkritische Niveaus allerdings bekannt, wäre es möglich proaktiv eine Wartung geplant durchzuführen und die Station zurück auf ein hohes Isolationsniveaus zu führen. Ziel ist es daher die Daten von Sensoren für präventive Maintenance Vorteile zugänglich zu machen.

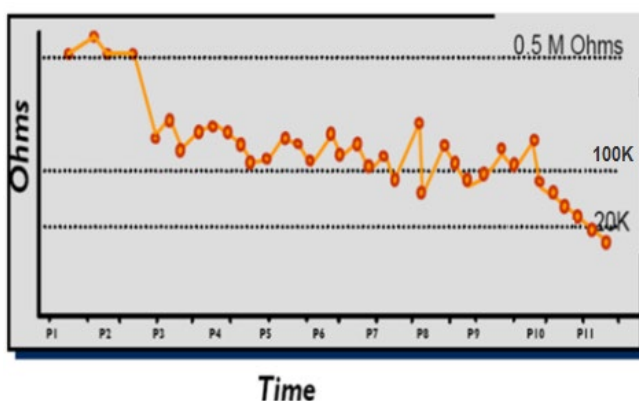


Bild 4: Messwertabfall Isolation

Im Rahmen der gemeinsamen Diskussionen der Konsortialpartner wurden die folgenden Themenbereiche der Datenerhebung festgelegt und im Detail erörtert. Dies mit dem Ziel vor allem die Verfügbarkeit, Nutzerakzeptanz (wer will schon an eine nicht betriebsbereite Ladestation heranfahren) und Umweltfreundlichkeit (frühe Wartung reduziert die Kosten auf Grund von vermiedenen Folgekosten) von zukunftsfähigen Ladestationen zu verbessern.

- ➔ Welche Daten sind vom Sensor zu erfassen und übertragen?
- ➔ In welcher Frequenz sind Daten zu übertragen?
- ➔ Physische Beschaffenheit der Schnittstellen
- ➔ Schnittstellen-Kommunikation

6.1.1 Layer-Modell System Kommunikation

Gemäß den Aufgabenstellungen aus dem Kapitel 6.1 wurde ein Layer-Modell gemäß Abbildung 5 erstellt, welches den bisher im Markt typisch genutzten Umfang der Sensordaten einer Ladestation und den angestrebten zukünftig nutzbar zu machenden Umfang an Sensordaten definiert. Zentraler Ansatz dabei ist es die Meta-Daten des Ladevorgangs mit den vor, während und nach Beendigung des Ladevorgang gewonnenen Daten zu kombinieren und dem Backend als höchste Instanz via OCPP zur Verfügung zu stellen. Da es in dem Standard zu OCPP 1.6 keine fest definierten Parameter für die identifizierten Parameter gibt, kann das hier erarbeitete Forschungsergebnis als Grundlage für die Weiterentwicklung dieses Standards genutzt werden.

Layer-Modell: System-Kommunikation

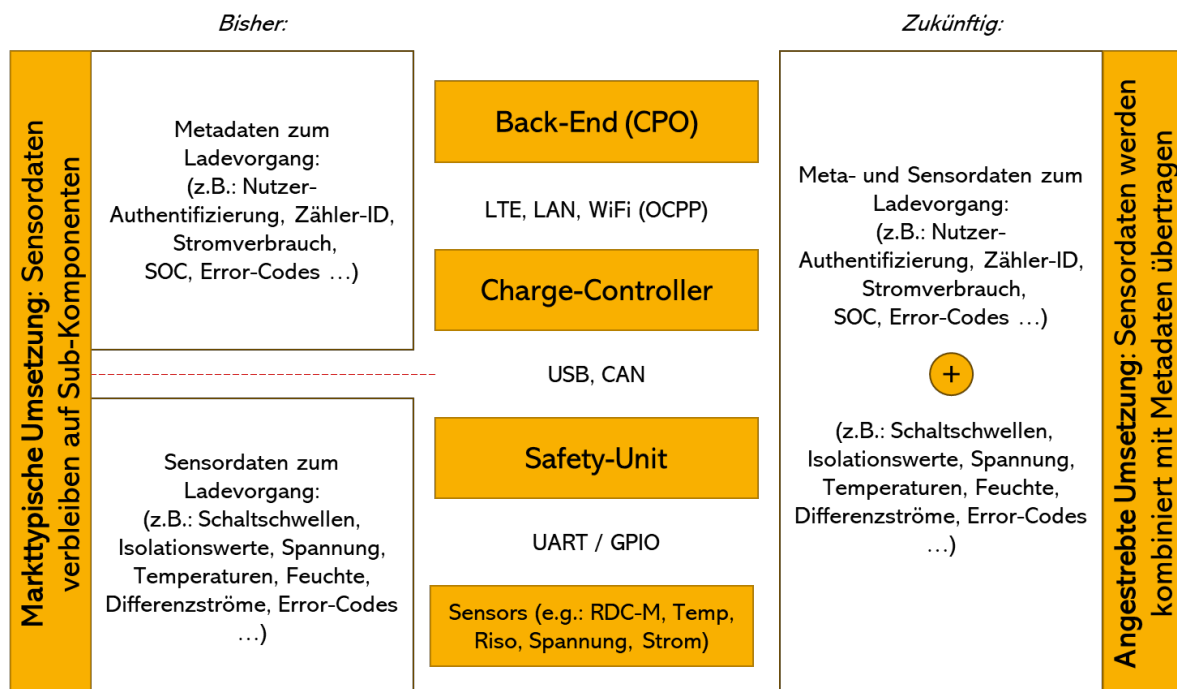


Bild 5: Layer-Modell zur Sensordatenübertragung

Mit Bezug auf die in Kapitel 6 präsentierte Architektur eines DC-Wallbox Funktionsmusters wurde neben den zur Verfügung zu stellenden physikalischen Schnittstellen wurden auch die Signale selbst benannt, der Übergabepunkt zwischen Einheiten, das jeweilige OSI-Layer und die Cycle-Zeit definiert. In Summe ergeben sich gemäß Tabelle 3 folgende festgelegte Sensorsignale, welche von der Safety-Einheit koordiniert werden sollen.

Tabelle 3: Sensorsignale für Maintenance Strategien

Signal	Capture & Data transfer	OSI - Layer 1	Cycle	Comments
AC Voltage (L1, L2, L3)	Power Unit → Safety Unit	CAN (Highspeed 1MBit/s)	1s	
AC Current (L1, L2, L3)	Power Unit → Safety Unit	CAN (Highspeed 1MBit/s)	1s	
Charging Voltage (incl. overvoltage detection)	Power Unit & Safety Unit	PU → SU: CAN	500ms	Plausibility
Charging Current (plausibility check)	Power Unit & Safety Unit	PU → SU: CAN	500ms	Plausibility
Temperature DC+, DC- @ Connector	Safety Unit	local	local: 100ms	
Temperature 1 & 2 in Charging station	Safety Unit	local	local: 100ms	
Insulation Resistance Rf+, Rf- (Station & Vehicle)	Safety Unit	local	Meas. time different	
Leakage Capacitance Ce (Station & Vehicle)	Safety Unit	local	Meas. time different	not implemented
CP Signal Conformity / CP-Level	Safety Unit	local	local: 1s / level change	
PP Signal Level	Safety Unit	local	local: 1s	
Weld Check AC-Contactor	Safety Unit	local	local: 1s / on request	
Power Supply Voltages (internal)	Safety Unit	local	local: 100ms	
Residual Current Id (AC/DC)	External RDC-M → Safety Unit	UART (19,2 kBit/s)	≥ 50ms	RDC-M: Polling
Humidity in Charging station	HMI → Ch.-Contr. → Safety Unit	USB (Full-Speed 12 MBit/s)	1s	
Light Intensity	HMI → Ch.-Contr. → Safety Unit	USB (Full-Speed 12 MBit/s)	1s	
Position / Damage	HMI → Ch.-Contr. → Safety Unit	USB (Full-Speed 12 MBit/s)	1s	
Temperature HMI	HMI → Ch.-Contr. → Safety Unit	USB (Full-Speed 12 MBit/s)	1s	
Outdoor temperature	via weather data	---		Option

6.1.2 Use-Cases zu Wartung und Betrieb von Ladeinfrastruktur

Zur Erlangung einer möglichst ganzheitlichen Betrachtung der allgemein bekannten Wartungsstrategien wurden Anwendungsfälle im Kontext des Betriebes von Ladeparks, abgebildet auf die 4 Säulen der Abbildung 6 diskutiert und Verbesserungspotentiale aufgezeigt. Speziell die Auswirkungen auf CPO und User stehen hierbei im Fokus.

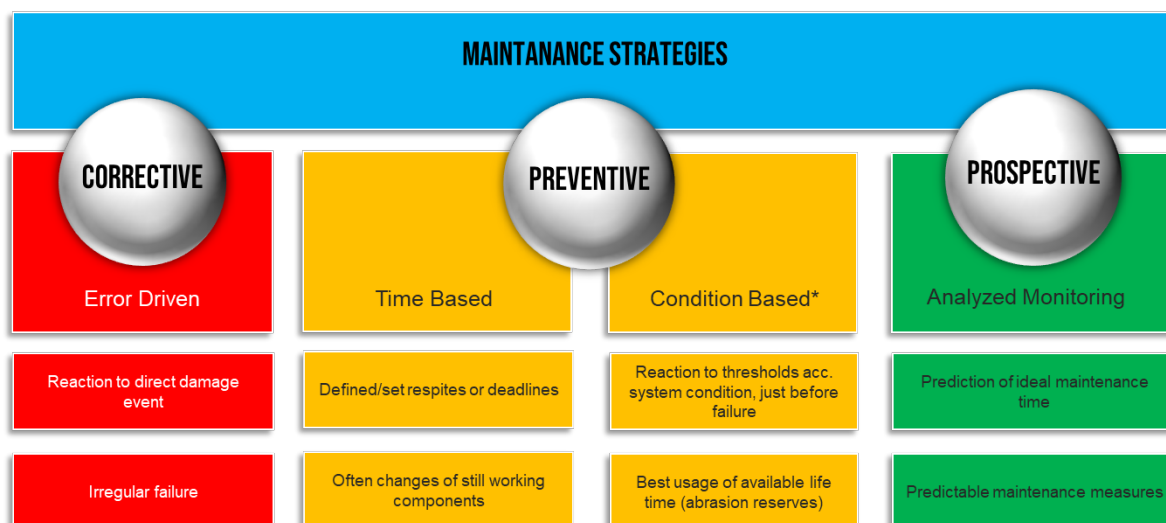


Bild 6: Maintenance Strategien

Tabelle 4: Use Cases von Wartungsstrategien bei Ladeinfrastruktur

Strategie	Beispiel mit Problemstellung	Lösungsansatz / mögliche Verbesserung
Error Driven	<i>Nicht im Projekt behandelt</i>	<i>Nicht im Projekt behandelt</i>
Time Based	Wiederholungsprüfungen der elektrischen Anlage (DGUV V3) ➔ Auch funktionierende Anlagen müssen gemäß §3 der Ladesäulenverordnung sowie die DGUV Vorschrift 3 (DGUV V3) eine jährliche wiederkehrende Prüfung bestehen. Die Prüf Fristen sind aber stark abhängig von den Umgebungsbedingungen sowie dem Nutzerkreis. ➔ Die Prüfung erfolgt nach den Vorgaben der VDE 0105-100/A1.	Wiederholungsprüfungen der elektrischen Anlage (DGUV V3) ➔ Durch gezieltes Monitoring der Sensor Daten im Backend, kann der Teil der elektrischen Prüfungen in der Prüf Frist deutlich verlängert werden. Hierdurch reduzieren sich die Kosten im Betrieb. ➔ Durch Unterscheidung der Sensordaten vor, während und nach dem Ladevorgang lassen sich die gewonnenen Daten differenziert dem Fahrzeug und der Ladestation zuordnen.
Condition Based	Wartung nach Auslösung von Schutzorganen ➔ Nach z.B. Ausgelöstem RCD-Typ A/B ist die Ladestation zwar nicht defekt, aber auch nicht betriebsbereit, was negativ für die Einnahmen und die Nutzerakzeptanz ist. Wartung nach Voralarmen ➔ Es wird auf Voralarme mit Wartungen reagiert, um noch vor Anlagenausfall Fehler beheben zu können.	Wartung nach Auslösung von Schutzorganen ➔ Durch Analyse der Sensordaten zur elektrischen Sicherheit und der Verwendung einer Auto-Reclosing Unit am RCD wäre eine Remote-Neuzuschaltung abbildbar Wartung nach Voralarmen ➔ Werden Voralarme mit Sensordaten kombiniert betrachtet, lassen sich kritische Zustände und deren Verweildauer (ggf. nur während des Ladens) für optimierte Wartungen verwenden.
Analyzed Monitoring	Wartung auf Basis von ausgewerteten Sensordaten über Zeit ➔ Die Übertragung der Sensordaten erfordert dafür vorgesehene Daten-Protokolle, die in der breiten Masse und allgemein gültig nutzbar sind. Ist dies nicht der Fall, ist die Wartung nur proprietär umsetzbar.	Wartung auf Basis von ausgewerteten Sensordaten über Zeit ➔ Eine Betrachtung von Sensordaten über einen längeren Zeitraum und in Verbindung mit weiteren Metadaten zum Ladevorgang, ermöglicht die intelligente und ggf. auch KI-gestützte Dateninterpretation incl. der davon abgeleiteten Handlungsanweisungen und Business Cases. ➔ Langsame Verschlechterungen oder Abhängigkeiten von z.B. Wetterdaten lassen einen Ausfallzeitpunkt von Station/Fahrzeug vorhersagen. ➔ Den nur während eines Ladevorgangs zugeordneten Sensordaten kann ein Fahrzeug zugewiesen werden und im Backend viele aufeinander folgende Ladezyklen verglichen werden (z.B. Prognose von Werkstattaufenthalten).

Grundsätzlich hat die Analyse der Sensordatennutzung aufgezeigt, dass alle Wartungsstrategien entscheidende Vorteile und Potentiale zur Betriebskostenreduzierung bei der zusätzlichen Sensordatennutzung erfahren können. Speziell mit dem „Analysed Monitoring“ wären aus CPO-Sicht z.B. Prognosen für Werkstattaufenthalte, mit automatischer Terminfindung für das Fuhrpark-Management als neuer Business Case abbildbar.

6.2 Betrachtung der elektrischen Sicherheit bei galvanisch nicht getrennten DC-Wallboxen

Eine der Hauptfragestellungen im Forschungsprojekt war es zu analysieren ob und wenn möglich die galvanische Trennung bei DC-Wallboxen entfallen kann, dies mit dem Ziel die ausgereifte und kostenoptimierte PV-Wechselrichter-Technologie als Basis für kostenoptimierte Ladeinfrastruktur zugänglich zu machen. In diversen bisherigen Ansätzen wurden unter Anderem weitere denkbare Vorteile mit Blick auf Wirkungsgrade und Gewicht angepriesen. Die folgenden Kapitel geben einen Überblick zu den erarbeiteten technisch-wissenschaftlichen Grundlagen und einen Ausblick zur Umsetzung bzw. Limitierung auf Grund von anderen Wechselwirkungen dessen. Die Überlegungen dabei bauen auf das skizzierte Architektur-Konzept der folgenden Abbildung 7 auf, wobei vereinfacht angenommen wird, dass die Power Unit über keine galvanische Trennung verfügt und somit „trafolos“ wäre.

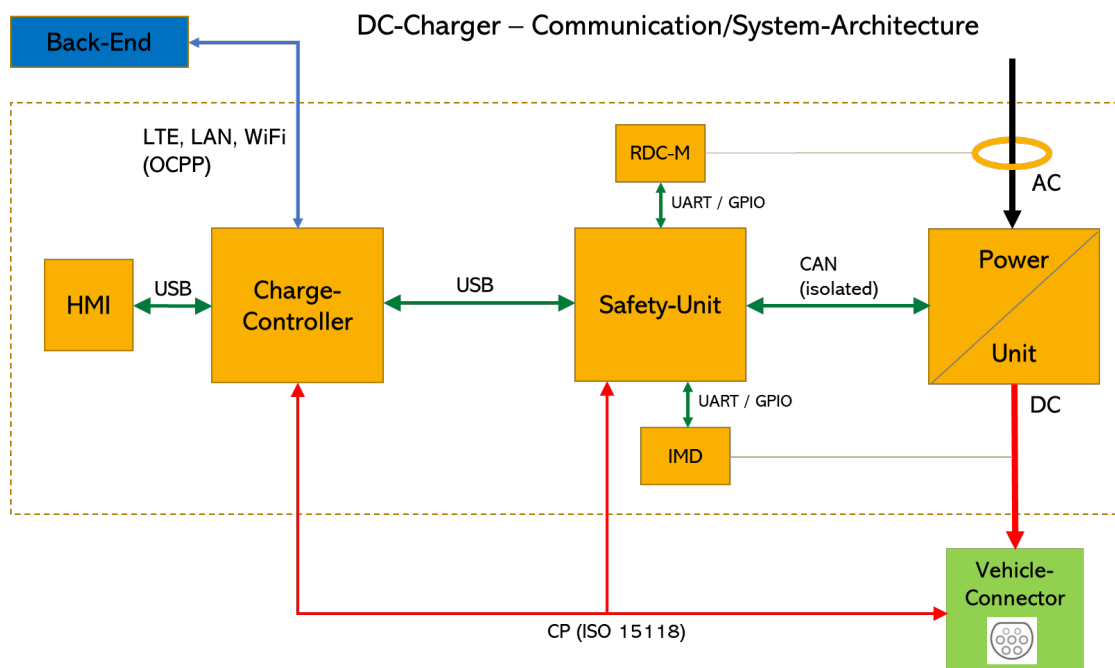


Bild 7: Vereinfachtes Konzept DC-Wallbox „trafolos“

6.2.1 Sicherheitsrisiken im „trafolosen“ Betrieb

Mit Blick auf die Sicherheitsrisiken wurden die Analysen unterteilt in die folgenden Ausprägungen, um diverse Sichten auf unterschiedliche verbundene Themenbereiche um die Wallbox und deren Betrieb herum abzudecken. Hierbei wurden auch Analogien zu im Forschungsprojekt „DC-Industrie 2“ herangezogen, um zu betrachtende Wechselwirkungen in DC-Netzen miteinzuschließen. Jeder der Cluster wurde mit der Risikobedeutung bzw. zu betrachtende Themengebiete beschrieben.

Allgemeine Cluster zu Sicherheitsrisiken:

- ➔ Gebäudebeschädigung durch Korrosionsbildung
 - Sind, falls so ausgeführt, die zu den Ladestationen führenden Gleichstromleitungen besonders lang und nicht galvanisch isoliert, können große Streuströme erzeugt werden, welche Korrosion bewirken.
 - Mit steigender Anzahl an Ladepunkten steigt die Netzableitkapazität gegen Erde und sinkt der Gesamtisulationswiderstand.
- ➔ Brandgefahr, elektrischer Schlag, Netzurückwirkung und Beeinträchtigung Netzstabilität
 - Bei DC-Technologien können sehr schnell, sehr hohe Fehlerströme entstehen. Solche Fehlerströme können Brand, elektrischen Schlag oder eine Beeinträchtigung der Netzstabilität herbeiführen. Zur Risikominimierung ist eine Fehlerkennung und rechtzeitige Abschaltung der Stromzufuhr erforderlich. Wodurch bei einer traflosen DC-Technologie der Verbau eines extrem schnellen Schutzschalters erforderlich sein würde. Am Markt befinden sich derzeit keine Standard-Schutzschalter, welche derartige Anforderungen erfüllen. Der Verbau eines derartigen Schutzschalters ist nach einschlägigen Normen für den öffentlichen Bereich unerlässlich. Mithilfe einer im ungeerdeten Netz erfolgenden Isolationsüberwachung würde hingegen durch Nutzung erprobter Technologien eine Risikominimierung bewirkt werden.
 - Durch Kapazitätsumladung, speziell über im Fahrzeug vorhandene Ableitkapazitäten können 1000-fache Nennströme in der Überstromschutzeinrichtung der Ladestation entstehen. Diese Nennströme würden auch alle in Lastrichtung liegenden elektrischen Einheiten wie Schaltglieder, Energie-Zähler und Leistungsmodule aushalten können.
 - Ungewollte Feuchtigkeit und Isolationsbeeinträchtigung durch fehlerhafte Bedienung, Unfall und Vandalismus sowie durch Beschädigung.
- ➔ Netzausdehnung
 - Beim DC-Laden ist der OBC im EV nicht isoliert, weshalb trotz Abschalten der Ladestation eine lebensbedrohliche Spannungsrückwirkung durch ein EV erzeugt werden kann. Diesbezüglich stellt sich die Frage, wie der Isolationszustand des Fahrzeugs zwecks Risikominimierung geprüft werden kann.

6.2.2 Äußere und innere Sicherheit

Mit Bezug auf den Projektanteil von SMA und den hierzu im Rahmen der gemeinsamen Arbeiten der beteiligten Konsortialpartner vorgestellten Konzept zu einer 400VDC DC-Wallbox (vgl. Abbildung 7, Kap. 6.2) wurde darüber hinaus eine Analyse zur äußeren und inneren Sicherheit im Sinne von potenziellen Fehlerszenarien und notwendigem Umgang damit erstellt. Die Ergebnisse dessen sind im Folgenden aufgelistet und dienen der weiteren Diskussion von Technologie und Forschungsfragen.

Fehlerszenarien und Fragestellungen zur „Äußeren Sicherheit“:

- ➔ Wo, wie und in welcher Zeit muss ein Isolationsfehler detektiert und das Gerät abgeschaltet werden?
 - 100ms bei 400V DC, gemäß Figure 22 der IEC 60479-1:2018
- ➔ Das Ladekabel wird bis auf die leitenden Teile verletzt und eine Person berührt diese. Wie wird damit umgegangen?
 - Eine Abschaltung der DC-Ladestation und Auftrennen der Verbindung Fahrzeugbatterie zu Ladekabel bzw. Hochvoltbatterie binnen <100ms bei 30mA Fehlerstrom
- ➔ Harter Erdschluss bei verletztem Ladekabel, z.B. über geerdete in der Nähe befindliche Metallteile. Wie wird damit umgegangen?
 - Bei DC-Technologien können sehr schnell, sehr hohe Fehlerströme entstehen. Solche Fehlerströme können Brand, elektrischen Schlag oder eine Beeinträchtigung der Netzstabilität herbeiführen. Zur Risikominimierung ist eine Fehlerkennung und rechtzeitige Abschaltung der Stromzufuhr erforderlich. Wodurch bei einer traflosen DC-Technologie der Verbaue eines extrem schnellen Schutzschalters erfordert wird. Am Markt bestehen derzeit keine Standard-Schutzschalter, welche derartige Anforderungen erfüllen. Der Verbau eines derartiger Schutzschalter ist nach Norm für den öffentlichen Bereich unerlässlich.
 - Es ist zu beachten, dass der Schutzleiterquerschnitt eines Ladekabels hohe Belastungen nur über kurze Dauer standhält. Somit bedarf es einer Eigensicherheit und beidseitigen Abschaltung durch DC-Ladestation und Fahrzeug.

Fehlerszenarien und Fragestellungen zur „Innere Sicherheit“:

- ➔ Prüfung des Isolationswiderstands beim Starten des Ladevorgangs. Wie wird die Isolationsüberwachung während der Ladevorgangs gelöst?
 - Es erfolgt keine Überwachung während des Ladevorgangs, so bleibt das Risiko der Entstehung von hohen Fehlerströmen, die zu Brand, elektrischem Schlag oder Netzurückwirkung führen könne, bestehen.

- Die Isolation wird nur vor Start des Ladens, während der Pre-Cable-Check Phase und nur bzgl. der Station zwischen geöffnetem Trennschalter und des verbundenen Ladekabels selbst geprüft.
- ➔ DC-Fehlerströme über Erde, die Korrosion hervorrufen (analog DC-Industrie). Wie wird das Risiko von Streuströmen einer einzelnen DC-Wallbox gemindert, sofern das Ladekabel auf dem Betonboden liegt? Im Flottenbetrieb mit 2 bis n Wallboxen, vor allem bei DC-Versorgung dieser Wallboxen. Wie wird das Risiko von Streuströmen bei mehreren synchronisierten Laderegeln gemindert?
 - Die nicht vorhandene Überwachung müsste mindestens über eine sehr sensitive DC-Sensorik ersetzt werden.
 - Zur Vermeidung von Korrosion sind ein entsprechende Erdungskonzept und das Monitoring dessen erforderlich.
 - Ohne bestehende Isolationsüberwachung, bleibt der über ein Ladekabel erfolgende Stromfluss unbekannt.
- ➔ Wie wird der Aspekt der Netzausdehnung bewertet?
 - Der Einfluss von unbekannten Netzausdehnungen bei Betrieb von mehreren DC-Wallboxen auf die jeweils lokal verbauten Sensoriken und Schutzschaltgeräte müsste weitergehend betrachtet und erforscht werden. Auch die Fahrzeugseite müsste dafür vorbereitet sein.
 - Bei einem gemeinsamen AC/DC Ladepark könnten AC-Ladepunkte nach Mode 3 und geerdet betriebene DC- Ladepunkte gleichzeitig in Betrieb sein. Mit wachsender Netzausdehnung steigt die Gefahr der gegenseitigen Beeinflussung.
- ➔ Welche Risiken werden in Verbindung mit den Isolationskonzepten der Fahrzeuge gesehen?
 - Da E-Fahrzeuge gegen Erde nur Basisisolierung besitzen und mit unterschiedlichen Spannungen (zunehmend 800V DC) der Hochvoltbatterie im Markt sind, steigt mit der Anzahl von E-Fahrzeugen an einem Versorgungsnetzwerk ohne galvanische Trennung und ohne Separierung durch getrennte Schutzeinrichtungen die Wahrscheinlichkeit das komplexe Mehrfachfehler auftreten.

Abschließend zur Analyse der inneren und äußeren Sicherheit lässt sich an dieser Stelle zusammenfassen, dass nach dem derzeitigen Stand der Technik teilweise Lösungsformulierungen möglich sind, diese allerdings Limitierungen oder nachgelagert zum Projekt PVtec Charger zu beantwortende weiterführende Forschungsfragen mit sich bringen.

Insbesondere die Betrachtung der Grundlagen zur Bedeutung von Berührungsströmen spielt eine entscheidende Rolle und soll wird daher weitergehend im folgenden Kapitel dargelegt.

6.2.3 Bedeutung von Berührungsströmen und Abschaltzeiten

Während im Verbundvorhaben zunächst ein 400V DC-System betrachtet wurde, ist am Markt festzustellen, dass zunehmend Fahrzeugarchitekturen auf 800V DC-Ebene in den Markt kommen. Daher wurden im Blick auf die erforderlichen Berührungsströme und Abschaltzeiten beide Systemspannungsebenen betrachtet und ein Ausblick auf normativ zu erwartende Anforderungen herausgearbeitet.

Basierend auf dem in Kapitel 6.3.1 vorgestellten Safety-Konzept mit definiertem Safe-State = Abschaltung wurden die erforderlichen Mindestkriterien zu Abschaltzeiten anhand der Norm IEC 60479-1:2018 bestimmt (vgl. Abbildung 8, gelber Pfeil).

- ➔ Ausgehend von einem Körperwiderstand von minimal 575 Ohm (vgl. Table 10 in der IEC 60479-1:2018), dürften nach Figure 22 der IEC 60479-1:2018 max. DC 287,5 V im Fehlerfall an berührbaren leitfähigen Teilen anstehen, um nicht über die Kurve c1 in Figure 22 zu kommen.
- ➔ Mit der Annahme das der Schutzleiterquerschnitt etwa dem Querschnitt der aktiven Leiter (L+, L-) entspricht wären damit Nennspannungen bis ca. DC 575 V abgedeckt.
- ➔ Die IEC 60479-1:2018 betrachtet jedoch keine Stromflusszeiten unter 10ms.

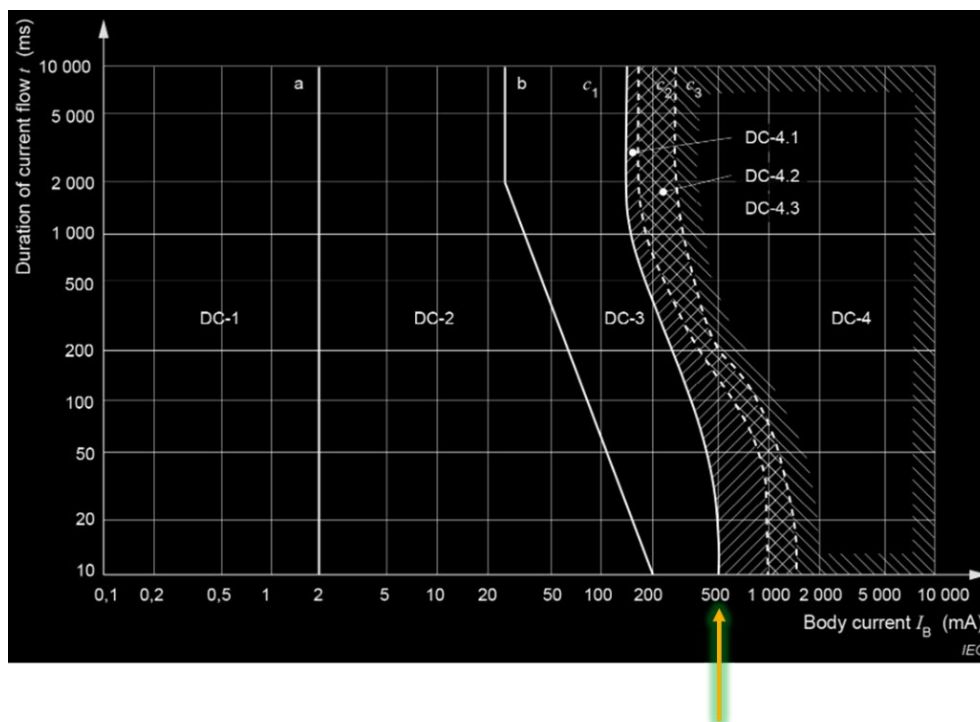


Bild 8: Auszug IEC 60479-1:2018, Figure 22

Je nach errechnetem Körperstrom und Fehlerszenario ließe sich im 400V DC-System also die c1 Kurve umsetzen, sofern es Schutzelemente gibt, welche binnen 100ms auslösen können. Ein 800V DC-System wäre mit dieser Normenlage allerdings nicht abgedeckt, da keine Zeiten <10ms definiert sind.

Um auch die Auswirkungen auf ein 800V DC-System der zukünftigen Fahrzeugarchitekturen bewerten zu können, wurden die notwendigen Abschaltzeiten aus der Norm IEC 60479-2:2019 herangezogen (vgl. Abbildung 9, gelber Pfeil).

- ➔ Mit der Annahme das der Schutzleiterquerschnitt etwa dem Querschnitt der aktiven Leiter (L+, L-) entspricht würden bei DC 800 V Nennspannung im Fehlerfall an berührbaren leitfähigen Teilen eine Berührspannung von etwa DC 400 V anstehen.
- ➔ Ausgehend von einem Körperwiderstand von minimal 575 Ohm entsteht hierdurch ein Körperstrom von ca. 700 mA.
- ➔ Entsprechend Figure 23 der IEC 60479-2:2019 müsste der Fehler unterhalb 2ms abgeschaltet werden, um nicht über die Kurve c1 zu kommen.
- ➔ Zur Abschaltzeit zählt nicht nur die Schaltzeit der Halbleiter, sondern die komplette Wirkkette aus Sensorik, Datenverarbeitung und Aktuatoren.

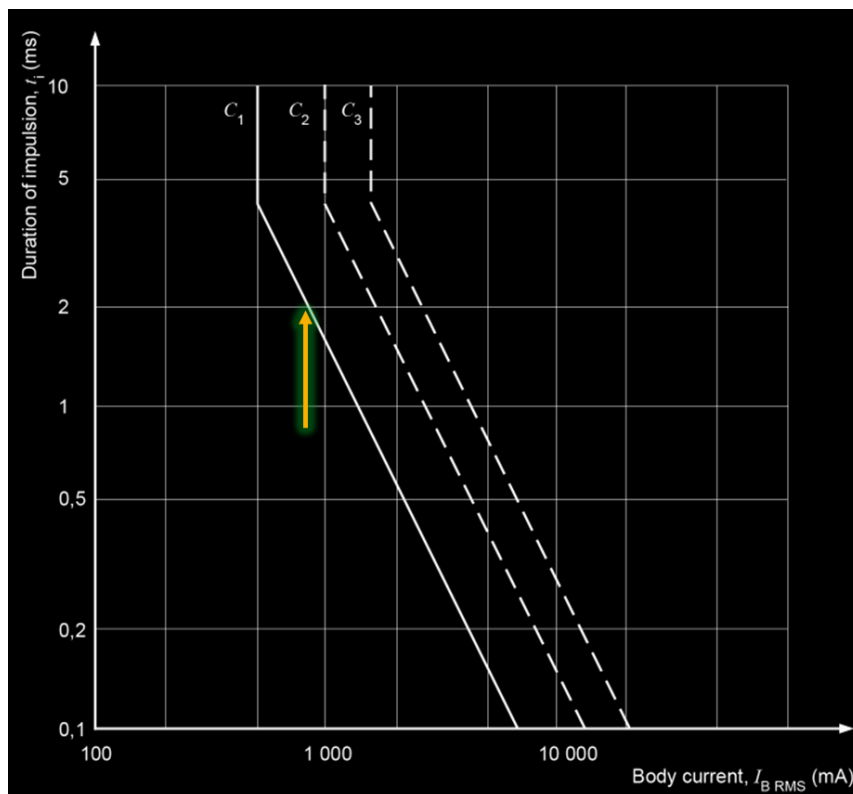


Bild 9: Auszug IEC 60479-2:2019, Figure 23

Als größte Herausforderung zur Bestimmung der Abschaltzeiten kann daher verstanden werden die Schutzkonzepte auf die jeweilig zu erwartende Spannung der Fahrzeuge auszulegen, um keine Probleme hinsichtlich der elektrischen Sicherheit beim Laden mit den Fahrzeugen im Bestand zu erhalten.

6.2.4 Zusammenfassung der Lösungsansätze und deren Limitierung

Gemäß den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Lösungsansätze sowie verbleibenden Herausforderungen und Limitierungen lässt sich zusammenfassend feststellen, dass im Rahmen des Verbundprojektes ein Funktionsmuster zum traflosen Laden nicht wie angedacht umsetzbar war. Wenngleich verbleibende Forschungsfragen für die Analyse und Entwicklung von neuen Produkten aufkamen, wurden dennoch Teilaspekte beleuchtet und der gegenwärtige Wissensstand angehoben.

Insbesondere der Blick auf Artverwandte Projekte wie DC-Industrie 2 war hilfreich bei der Beurteilung des aufgeführten Risikos der Korrosion. Weiterhin gibt es auch im Forschungsprojekt DC-Industrie 2 den Ansatz hier schnelle Schutzschalter mit Halbleiterfunktionalität einzusetzen. Hier durchgeführte Kurz- und Erdschlussversuche mit Fehlerstromspeisung aus Kapazitäten haben bei einfacheren Halbleiterschaltern und DC-Sicherungselementen zu groben Zerstörungen geführt. Selbst unter der Annahme eine technische Lösung zu finden, ist es allerdings fraglich, ob diese, dann vermutlich recht teuren Anlagenelemente, auch für einen signifikanten zusätzlichen Anteil der Systemverlustleistung verantwortlich werden würden.

Als potenzielle „Show-Stopper“ zum traflosen Laden identifizierte Themenfelder:

- ➔ Unkontrollierte Netzausdehnung kann zu Spannungsrückwirkungen führen, z.B. aus Fahrzeug heraus oder in AC/DC gemischten Ladeparks, das System muss dafür vorbereitet sein. Bestandsfahrzeuge wären unter Umständen nicht kompatibel und müssten ggf. bei traflosen DC-Wallboxen von Laden ausgeschlossen oder mit zusätzlichen Maßnahmen überwacht werden.
- ➔ DC-Streuströme können Korrosion an Gebäudestrukturen bewirken, weshalb besondere Erdungskonzepte inkl. Zusätzlichem Monitoring dessen erforderlich wäre.
- ➔ Hohe durch DC verursachte und schnell entstehende Fehlerströme in ausgedehnten Systemen können Brand, elektrischen Schlag oder eine Beeinträchtigung der Netzstabilität herbeiführen, speziell Kapazitätsumladungen können bis 1000-fache Nennströme in der Überstromschutzeinrichtung der Ladestation entstehen.
- ➔ Quereinflussung von RCDs bei Multi-Outlet oder benachbarten Stationen mit ggf. Fehlauslösungen bei höheren Ableitkapazitäten im verbundenen System. Auch zwischen Fahrzeugen benachbarter galvanisch verbundener Stationen können Wechselwirkungen auftreten.
- ➔ Potenzielle Körperströme bei DC 800V Systemen bis 700mA wurden errechnet. Abschaltungen der Anlage über eine Isolationsüberwachung innerhalb 2-10ms erforderlich um „DC-3 und C1 Kurven“ der Body Current Limits einzuhalten, heute technisch nur bis 1s machbar.

- ➔ Bei direkter Berührung von DC 800V können Körperströme deutlich über DC 1A entstehen. Hier sind, basierend auf der IEC 60479-2:2019 normative Anforderungen an Abschaltzeiten unterhalb 1ms zu erwarten.
- ➔ Eine schnelle Abschaltung würde Halbleiterschalter erfordern, die wiederum hohe Verlustleistungen einbringen und ineffizient sind.
- ➔ Halbleiterschalter sind heute nicht ausreichend robust bei Kurzschlüssen was Zerstörungen zur Folge hat.
- ➔ Die Basisisolierung in den Fahrzeugen würde bei verbundenen Systemen das Risiko von komplexen Mehrfachfehlern erhöhen.
- ➔ Eine galvanische Trennung ist strikt gefordert in aktuellen Normen.

In Anbetracht der durch eine wegfallende galvanische Trennung entstehender zusätzlichen neuen technischen Anforderungen stellt sich trotz zu Projektbeginn vermuteten theoretischen Kostenreduzierungspotentialen die Frage nach Sinnhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit einer solchen Lösung.

Mit der Aufarbeitung und dem Austausch zu den Ergebnissen im Rahmen von Projektpartnermeetings und Konsortialtreffen waren die Arbeiten zur Grundlagenanalyse und Konzepterstellung incl. deren Limitierung zum Bereich trafolose DC-Wallboxen im Förderprojekt PVtec Charger abgeschlossen.

6.3 Verbesserter Sensor zur elektrischen Sicherheit für DC-Wallboxen

Im Rahmen der im Kapitel 6.2 beschriebenen Analysen und erfolgten Betrachtungen zur elektrischen Sicherheit bei traflosen, galvanisch nicht getrennten DC-Wallboxen wurde festgestellt, dass nach derzeitigem Stand der Technik eine Umsetzung des angedachten Ziels nicht erreichbar ist. Dies allein sorgte allerdings nicht zur Aufgabe zumindest Teilziele des Scope des Verbundprojektes lag auf der Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Nutzbarkeit, Umwelteigenschaften und Nachhaltigkeit von Ladelösungen dennoch erreichen zu können.

Daher wurde der Fokus im Projekt auf die beschriebene Mindestabsicherung der AC-Zuleitung im Kontext eines Fusi-Konzeptes für eine DC-Wallbox umgelegt und Optimierungspotentiale sowie neuartige Lösungsansätze in der Messtechnik als auch in der Art der mechanischen Integration ins Gesamtsystem bearbeitet.

6.3.1 Fusi-Konzept für Basisschutz zur elektrischen Sicherheit

Die Nutzung einer elektrischen Anlage muss immer so geschaffen sein, dass im normalen Betrieb und Nutzung ohne vorliegende Fehlerzustände keine Gefahr für Lebewesen oder die Anlage bzw. verbundene Betriebsmittel selbst ausgehen kann. Da durch Einflüsse wie unter anderem Alterung, Korrosion, Verschmutzung, mechanische Fremdeinwirkung, Feuchte, falsche Temperaturen, Fehlbedienung und insbesondere mangelnde Wartung dennoch gefährliche Zustände mit den hier untersuchten Gefahren des elektrischen Schlags im Sinne der elektrischen Sicherheit auftreten können, bedarf es technischer Maßnahmen zur Vermeidung oder sicheren Handhabung dieser Situationen. Dabei wurde im Rahmen des Verbundprojektes ein entsprechendes Konzept zur Funktionalen Sicherheit (FuSi-Konzept) erarbeitet, welches abhängig von der erstellten HARA (Hazard Analysis and Risk Assessment) auch bekannte Hersteller Anforderungen und Merkmale von TÜV-Prüfungen widerspiegeln sollte.

Auf Basis der in Abbildung 7 (vgl. Kap. 6.2) skizzierten Architektur wurde ein Blockschaltbild bestehend aus den Komponentenclustern Input/Sensorik, Steuereinheit/Logik und Aktuatoren entworfen, dies ist in Abbildung 10 ersichtlich.

Die beteiligten Firmen des Arbeitspaketes definierten gemäß HARA die Festlegung des sicheren Zustandes (Rückfallebene des Gesamtsystems) als abgeschaltete und somit stromlose Anlage. Hierbei galt es folgende Fragestellung zu beantworten:

- ➔ Welche Sensoren / Arten von Sensoren werden benötigt?
- ➔ Welche Sensorsignale führen zur Abschaltung und wie werden die Signale verarbeitet?
- ➔ Gibt es vergleichbare Sensoren aus artverwandten Applikationen, die man auf die Nutzung in DC-Wallboxen anpassen und verbessern kann?

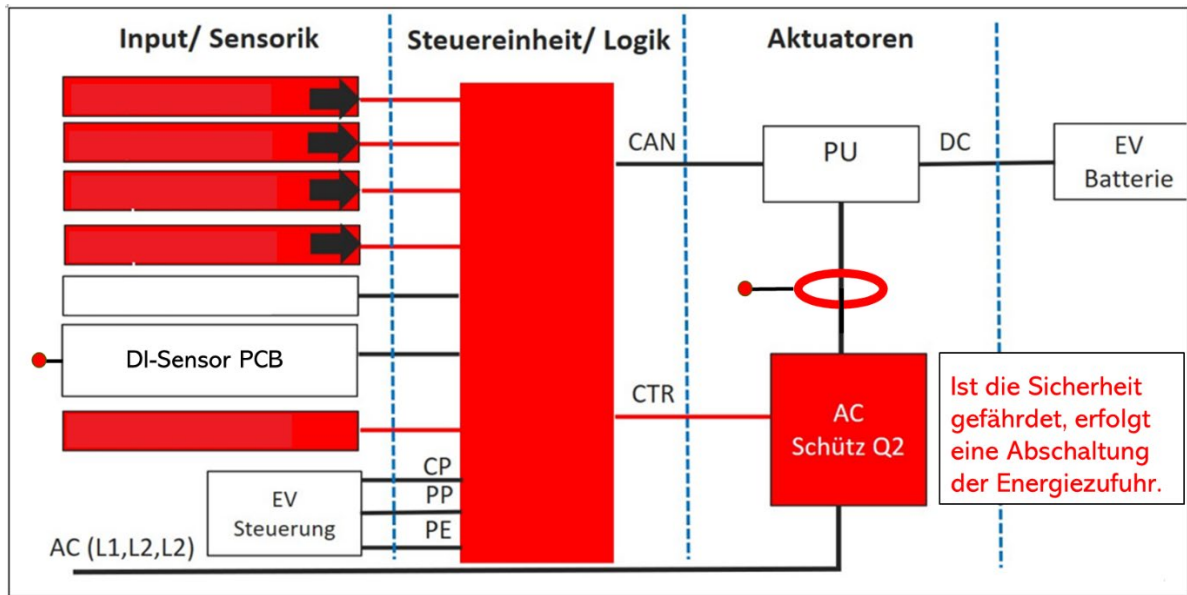


Bild 10: Safety Mess- und Steuereinheit für hochintegrierte DC Lader, hier Sensorkonzept und Aktuatoren

Grundsätzlich gehören über den Arbeitsbereich der elektrischen Sicherheit die Themenfelder Überspannungen, Überströme, Fehlerströme in den Analysebereich der Fa. Bender für die Umsetzung der Arbeitspakete im Verbundprojekt. Themenfelder wie Feuchte, Temperatur, sowie Datenkommunikation zum Fahrzeug hingegen entfielen in die Arbeitsgebiete der Konsortialpartner. Die Arbeit an der Safety Einheit bzw. Steuereinheit/Logik, welche die ermittelten DI-Sensor Daten empfängt und bei Überschreitung von Grenzwerten das AC-Schütz Q2 und somit die Stromzufuhr innerhalb der DC-Wallbox abschaltet, erfolgte ebenfalls über die Arbeitspaketdefinition bei den Konsortialpartnern.

Da im Projekt die Themenfelder Überspannungen und Überströme mittels verbau von marktüblichen Schutzorganen gelöst wurden, konzentrierte sich Bender auf die Betrachtung der Fehlerströme und den Umgang damit. Im Zuge der Erfahrungen von gemischten AC- und DC-Netzen ist hinreichend bekannt, dass eine Sensorik zum Fehlerstromschutz mit AC- und DC-Fehlerströmen umgehen können muss. Als Analogie hierzu zeigte sich die Betrachtung der Sensoren zur elektrischen Sicherheit von AC-Wallboxen als erfolgsversprechend.

In AC-Wallboxen erfolgt die Verwendung von sogenannten DC-6mA Fehlerstromsensoren, welche zum einen 3-phasige Wechselstrom-Lasten bis 22kW, aber auch AC/DC gemischte Fehlerströme erfassen und gemäß der Norm IEC62955 binnen 10sec die Wallboxen abschalten, also in den sicheren Zustand versetzen können. Konkret werden hierbei Sensoren bestehend aus einem magnetischen Differenzstromwandler und einer entsprechenden Elektronikeinheit verwendet, wobei die Kabel der Lastleitung durch den Wandler geführt werden (vgl. Bilder 7+10).

Das Grundprinzip einer solchen Sensorik beruht auf dem korrekten und schnellen um-magnetisieren der Differenzstromwandlers, damit im Falle von DC-Fehlerströmen die Messsignale zur Auslösung der Schaltorgane (hier: AC-Schütz Q2) nicht durch magnetische Sättigung verzerrt werden, siehe Abbildung 11. Eine nicht kompensierte Verzerrung kann zu einer verspäteten oder im Extremfall zu einer nicht mehr gegebenen Abschaltung führen, was die Erreichung des zuvor definierten sicheren Zustandes verhindern würde. Die elektrische Sicherheit der Anlage wäre dann auf Grund dieses „Blinding-Effektes“ nicht mehr gegeben.

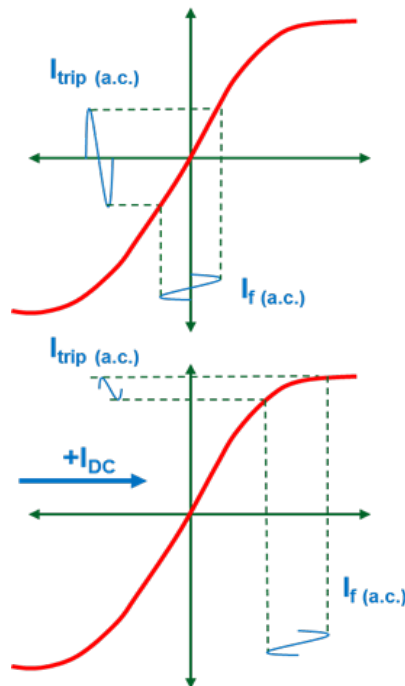


Bild 11: Grundprinzip (Blinding Effekt) eines allstrom-sensitiven DI-Sensors

Neben der Messtechnik im DI-Sensor selbst kann ein zu großer DC-Fehlerstrom auch die im Gebäude vorgelagerte Installation an z.B. einem typischen RCD (ugs. FI-Schutzschalter) entsprechend negativ beeinflussen da DC-Fehlerströme überlagert zu AC-Fehlerströmen auftreten können und ein Fehlerbild in gegenseitiger Abhängigkeit erzeugen. Daher ist die Nutzung eines sogenannten Allstromsensitiven Sensors in der weiteren Betrachtung (über das Verbundprojekt hinaus) von Sensoren zur Verwendung in DC-Wallboxen zwingend erforderlich, um folgende Themenfelder zu adressieren:

- ➔ Schutz vor gefährlicher Körperdurchströmung
- ➔ Schutz der vorgelagerten Gebäudeinstallation
- ➔ Schutz von elektrischen Komponenten der DC-Wallbox
- ➔ Schutz verbundener Betriebsmittel (hier z.B. das Elektrofahrzeug selbst)

6.3.2 Umsetzung optimierter Sensorik

Als Ausgangsposition für eine verbesserte Sensorik wurde den seitens Bender Produkte zur Überwachung von AC-Wallboxen herangezogen, im Speziellen die Auswerteeinheit RCMB104 sowie der Messwandler W15BS. Diese Produkte zeichnen sich dadurch aus, dass der Wandler über ein bereits verbundenes Kabel verfügt, was die Einbauposition und somit die Verlegeart der Kabelbaumstruktur innerhalb einer Wallbox flexibel gestaltet. Die Auswerteeinheit besteht aus einer 2-seitig bestückten Leiterplatte, welche z.B. in einem DC-Laderegler oder einer wie im Konzept unter Kap. 6.3.1. definierten Steuereinheit integriert werden kann.



Bild 12: Messwandler W15BS mit Elektronik RCMB104

Da allerdings der Trend in Wallboxen hin zu einer immer höheren Integrationsdichte der Leistungsmodule zeigt, wünschen sich Hersteller vermehrt das möglichst vollständige Entfallen von Kabelbäumen. Favorisiert wird zunehmend die Nutzung von vorkonfektionierten Kupferschienen, welche die Leistungselektronik direkt mit den Anschlüssen der DC-Schütze verbinden. Zum AC-Netzanschluss hin werden diese Power-Leiterplatten mit PFC-Stufen (Power Factor Correction, Maßnahmen zur EMV-Verbesserung) versehen und über das AC-Schütz auf einen Anschlussblock verbunden.

Entscheidend ist hier zu beachten, dass das AC-Netzanschlusskabel während der Wallbox-Installation korrekt durch den Messwandler gefädelt werden müsste, was die Hersteller aus Gründen der klaren Verantwortlichkeits-Systemgrenzen in Hinblick auf Gewährleistung sowie dem Testen der Sensorfunktion bei der Herstellung der Wallbox nicht sicherstellen könnten. Eine möglichst automatisierte Fertigung incl. Testbarkeit aller Sensorfunktion und unter Erfüllung der Anforderung keine Kabelbäume mehr zu haben, kann über den Verbau des DI-Sensors vor oder hinter dem ebenfalls auf der Power-Leiterplatte verbauten AC-Schütz erfolgen. Dies zeigt in Summe auf welche Verbesserungen die Sensorik für eine noch höhere Integration erfahren müsste:

- ➔ Entfallen des Sensorkabels
- ➔ Kombination der Elektronik und des Wandlers in einer Einheit
- ➔ Senkrechte Montagemöglichkeit des Sensors direkt auf der Power-Leiterplatte, um Kupferschienen automatisiert hindurchfädeln zu können
- ➔ Reduzierung der Herstellkosten des Sensors

Insbesondere die ersten 3 genannten Verbesserungen zielen auf adressierbare Kostenoptimierungen ab, welche durch die Vorteile eines mechanisch-optimierten Aufbau des Sensors während der Fertigung einer Wallbox erreicht werden können. Die folgenden Abbildungen zeigen den Messwandler W15BS mit dessen Innenteil der Messspule sowie die beiden Seiten des Elektronikmoduls RCMB104.



Bild 13: W15BS + RCMB104 (beide Seiten bestückt)



Bild 14: Innenteil des Wandlers

Im Rahmen der mechanischen Optimierung wurde zunächst ein Funktionsmuster der Elektronik erstellt, welches sich 90° gewinkelt direkt mit dem Wandler verbinden lässt. Um diese Kombination mechanisch robust und gegen direktes Berühren geschützt aufzubauen, wurde anschließend ein Gehäuse konstruiert und im 3D STL-Druckverfahren hergestellt.



Bild 15: Kombination von Elektronik und Wandler im senkrecht stehenden Gehäuse

Um allerdings auch den Sensor selbst günstiger fertigen zu können, wurde darüber hinaus an einem anderen Messverfahren und einem damit verbunden, günstiger zu fertigenden Messwandler gearbeitet. Hier lag der Fokus auf der Reduzierung der Messschaltung, sodass die Schaltung auf nur einer Seite der gegebenen kleinen Leiterplatte Platz findet. Dies wurde durch die Änderung der Schaltung auf ein einfacheres analoges Frontend und einen kleineren Mikro-Controller erreicht. Weiterhin bot die neue Schaltung auch die Möglichkeit der Verwendung von deutlich reduzierten Wicklungen auf dem Magnetkern des Wandlers. Beide Optimierungen sind in folgender Abbildung zwecks direkten Vergleiches ersichtlich.

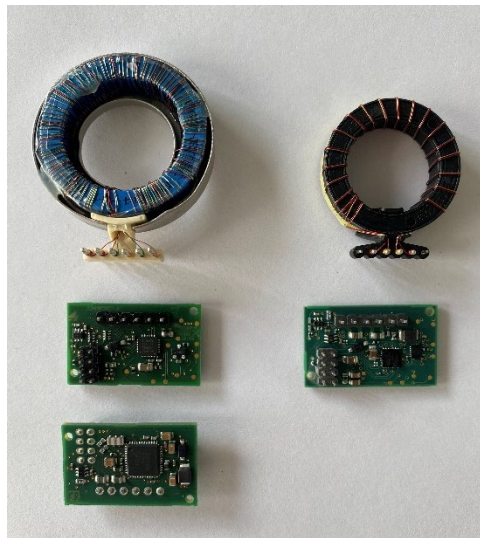


Bild 16: Optimierte Wandler-Bewicklungen und einseitig bestückte Leiterplatte

Rechnerisch würden die beiden neuen Lösungsansätze die Herstellkosten des Sensors ca. 30% reduzieren, sofern das Setup in zukünftigen Prototypen einer DC-Wallbox ausreichende Robustheit in Bezug auf mögliche Wechselwirkungen zum Gesamtsystem und EMV-Festigkeit keine weitere Beschaltung oder sonstige größere Änderungen erforderlich machen würde. Die Durchgeführten Messungen am optimierten Funktionsmuster zeigten im Vergleich zur bisherigen Lösung ähnliche Sensoreigenschaften auf, jedoch auch verbleibende Schwächen bzgl. zu überwachenden Frequenzbereichen oberhalb 2kHz, gemessen an den Anforderungen eines Sensors für AC-Wallboxen.

Da die Leistungsstufen für eine galvanisch nicht getrennte DC-Wallbox allerdings gemäß den Analysen in Kapitel 6.2 direkt mit der Fahrzeugbatterie und deren parasitären und diskret verbauten EMV-Komponenten in Wechselwirkung stehen würden, muss von verstärkten Störströmen ausgegangen werden. Aus Forschungssicht verbleibt damit die Analyse von Wechselwirkungen mit angeschlossenem DC-System bis hinein in das Batteriesystem des Elektrofahrzeugs Gegenstand von Arbeiten nach Beendigung des Verbundprojektes PVTec Charger.

6.4 Sensoren für DC-Lader größerer Leistung mit Multi-Outlet

Im Rahmen der Projektarbeitspakete um DC-Ladestationen größerer Leistung hatte Bender die Aufgabe Analysen und Konzepte, um die Kostenreduzierung und Systemvereinfachung aus Sicht der elektrischen Sicherheit zu erarbeiten. Um Ansatzpunkte für Kostenreduzierungen zu erarbeiten wurden die Normenanforderungen sowie typischen Gemeinsamkeiten der am Markt etablierten Architekturen von DC-Ladestationen analysiert.

Aus Sicht der elektrischen Sicherheit werden DC-Ladestationen auf der DC-Ausgangsseite (Fahrzeugseite) gemäß der Anwendungsnorm IEC61851-23 sowohl vor als auch während des Ladevorgangs und getrennt je Ladepunkt über je ein Isolationsüberwachungsgerät (IMD, engl. Insulation Monitoring Device) überwacht. Grundsätzlich darf je galvanisch verbundenem System immer nur 1 Isolationsüberwachungsgerät verbaut sein, damit es keine gegenseitigen Störungen oder Fehlalarme als Wechselwirkung zwischen mehreren Isolationsüberwachungsgeräten gibt. Da die heute am Markt befindlichen Isolationsüberwachungsgeräte für DC-Ladestationen mit deren Messkreis immer fest mit den Potentialen DC+ und DC- sowie Erde (Schutzerde) verbunden sind, würden sich bei einem Multi-Outlet System und zusammenschalteten Leistungsstufen auf einen Ladepunkt allerdings ungewollt bzw. unzulässig 2 Isolationsüberwachungsgeräte im gleichen galvanisch verbundenen Systemabschnitt befinden. Um dies zu vermeiden, schalten die Hersteller der DC-Ladestationen separate Trennrelais zwischen die DC+ bzw. DC- Pfade und die Isolationsüberwachungsgeräte. Dies wird in Schaubild 17 über den rot markierten Bereich entsprechend verdeutlicht.

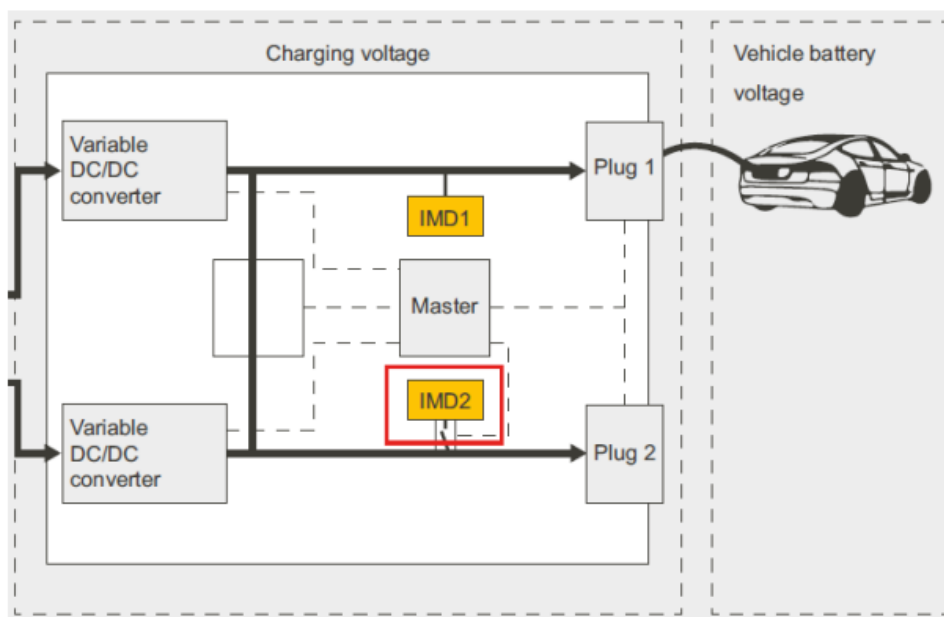


Bild 17: Dual-Outlet Architektur DC-Ladestation

Die Master-Steuereinheit kontrolliert somit nicht nur die Leistungsmodule und deren DC-Schütze, sondern auch die zur Isolationsüberwachung vorgeschalteten Trennrelais. Daher wurde hierzu im Projekt ein Schwerpunkt in der Vermeidung dieser offenbar vorliegenden Mehrkosten gelegt. Es galt die Kosten und somit ggf. vorhandene Einsparpotentiale zu beziffern und entsprechende Lösungsansätze zu erarbeiten.

Um die Auswirkungen der Problemstellung auf verschiedene typische Architekturen von DC-Ladestationen größerer Leistung abzubilden, wurden wesentliche im Markt genutzte Architekturen identifiziert und verglichen. Als Typendefinition wurden die Begriffe **Single-Outlet** und **Multi-Outlet** herangezogen, wodurch sich folgende Auflistung ergibt:

- ➔ DC-Lader mit integrierter Leistungselektronik und einem Ladepunkt (**Single-Outlet**)
- ➔ DC-Lader mit integrierter Leistungselektronik und mindestens 2 Ladepunkten (**Multi-Outlet**)
- ➔ DC-Lader mit externer Leistungselektronik und Ladepunktauslegung als „Satelliten-Outlet“ sowie mindestens 2 Ladepunkten (**Multi-Outlet**)

Vergleicht man die beiden Architekturen mit mindestens 2 Ladepunkten, so sind beim „Satelliten-Outlet“ sowie bei der Ladestation mit integrierter Leistungselektronik gemäß marktüblicher Umsetzung ebenfalls mindestens 2 Leistungselektronikmodule vorhanden, welche jeweils einzeln oder im parallelen Betrieb den beiden bzw. nur einem der Ladepunkte zugeschaltet werden können. Als Betriebsmodus des Herstellers kann man somit eine z.B. mit 150kW bemessene Ladestation als Single-Outlet mit 150kW (100% Zuordnung) oder als Dual-Outlet mit je 75kW (50% Zuordnung) je Ladepunkt betreiben. Die Zuordnung der Leistungsstufen an die Ladepunkte erfolgt dabei über eine Schaltmatrix an DC-Schützen, welche über eine Master-Steuereinheit angesteuert werden (vgl. Bild 10).

In der Praxis resultiert dies projiziert auf die notwendige Beschaltung zur Isolationsüberwachung wie vermutet in einer aufwendigen Verdrahtung, Steuerungsentwicklung und den Kosten für die externen Trennrelais. Die etwaigen Kosten für diese zusätzliche Verschaltung je Ladepunkt wurden im Projekt über Interviews mit DC-Ladestationsherstellern ermittelt und mit einem Bereich 20-30€ an reinen Materialkosten beziffert. In Kombination mit R&D Umlagen und im Falle eines Multi-Outlet Systems mit 4 Ausgängen entstehen somit Kosten von 80-120€ für die komplette Station.

Zur Reduzierung dieser Kosten wurden bei Bender Überlegungen und Konzepte zur Vermeidung bzw. Reduzierung dieser Kosten erarbeitet und 2 wesentliche Ansätze gefunden.

- ➔ **Synchronisierung** der Isolationsüberwachungsgeräte
- ➔ **Integration der Schaltelemente** in die Baugruppe der Isolationsüberwachung

Im Falle einer Synchronisierung der Isolationsüberwachungsgeräte wäre eine Art Handshake zwischen den IMDs notwendig, sowie die Information darüber, in welchem State sich die verschiedenen DC-Schütze der Schaltmatrix befinden. Hierin wurde eine je nach Anzahl der Ladepunkte eines Multi-Outlet Systems komplexe Wechselwirkung koordiniert werden müssen. Weiterhin würden die Innenwiderstände der jeweils parallel im Netz befindlichen Isolationsüberwachungsgeräten in Summe gemäß der bekannten Formel zu Berechnung paralleler Widerstände einen so kleinen Gesamtwiderstand ergeben, dass dieser zum einen den tatsächlichen Isolationswert des eigentlich zu überwachenden Fahrzeugs kaschieren und zum anderen bereits einen normativ unzulässig hohen Ableitstrom gegen Erde erzeugen. Daher wurde dieser Lösungsansatz als nicht umsetzbar verworfen.

Anders dagegen stellte sich der Ansatz einer Integration der Schaltelemente in die Baugruppe der Isolationsüberwachung als normativ umsetzbar und elektrisch sicher dar. Entgegen der Vermutung, dass damit nur die zuvor genannten Kosten an eine andere Stelle wandern lassen sich auf Leiterplatten bestückbare Trennbausteine deutlich günstiger beziehen und fertigen. Das folgende Schaubild zeigt die vereinfachte Darstellung (Bild 18) von Trennbausteinen in Reihe zu den Ankopplungswiderständen der Isolationsüberwachung.

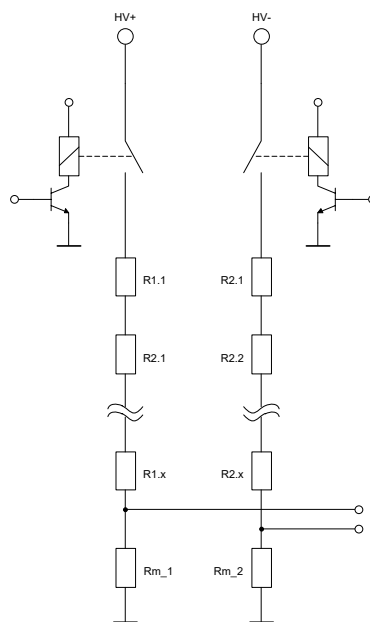


Bild 18: Symbolisierte Darstellung einer im IMD integrierten Netztrennung

Da die Ansteuerung der nun integrierten Trennrelais nun nicht mehr über separate Steuerleitungen der Master-Steuereinheit koordiniert werden muss, entfallen der Verdrahtungsaufwand für den Anschluss und die Steuerung der zuvor extern platzierten Trennrelais, die externen Trennrelais selbst und es steht damit ein im Zuge von geforderter kompakterer Bauweise benötigter Bauraum zur Verfügung. Die Steuerung der integrierten Trennfunktion im Single-Outlet Betriebszustand erfolgt über die bereits vorhandene Datenkommunikations-Schnittstelle (typ. Modbus RTU) zwischen Isolationsüberwachung und Master-Steuereinheit bzw. mit dem DC-Ladecontroller. Die Bewertung der Kostenvorteile wurden je Ladepunkt mit ca. 20-25€ ermittelt.

Die im Rahmen des Forschungsprojektes aufgezeigten Kostenreduzierungspotentiale bilden eine gute Basis für die Entwicklung neuer Produkte und günstigeren Architekturen von DC-Ladestationen größerer Leistung und können einen signifikanten Beitrag zur wie im Scope des Verbundforschungsprojektes bezeichneten Zielen beim Ausrollen von zukunftssicherer Ladeinfrastruktur beitragen.

6.5 Innovation im Projekt

Im Rahmen des Verbundvorhaben PVtec Charger wurden folgende Innovationen im Sinne von Konzepten, Lösungen und Komponenten erarbeitet, welche es als solches bislang nicht im Marktsegment der Ladeinfrastruktur gibt.

- ➔ Konzept der Sensordatenkommunikation in Korrelation mit Metadaten des Ladevorgangs zur Verbesserung der Wartungskonzepte und Dienstleistungen.
- ➔ Umfassende Grundlagenarbeit zu Fragestellungen sowie Auflistung von Show-Stoppers nach heutigem Stand der Technik für trafolose DC-Wallboxen.
- ➔ Technologische Funktionsmuster als Basis für zukünftige Kosten- sowie Mechanik-optimierte Sensoren zur Sicherstellung der elektrischen Sicherheit, dies für:
 - Differenzstromsensorik in der AC-Stromversorgung / -Zuleitung von DC-Wallboxen.
 - Isolationsüberwachung in Multi-Outlet DC-Ladestationen größerer Leistung.

Die gewonnene Know-How Basis stellt eine gute Grundlage für zukünftige Produktentwicklungen und neuartige Konzepte dar.

6.6 Forschungsbereiche für die Weiterentwicklung

Neu erhaltene und verbleibende Forschungsfragen für die Analyse und Weiterentwicklung in den behandelten Themengebieten zeigen sich vor allem in den System- und Gewerke-übergreifenden Schnittstellen auf. Firmen als Hersteller von Ladeinfrastruktur und dessen Zuliefererkette allein können ohne die enge Abstimmung und Zuarbeit der Fahrzeughersteller, der Verteilnetzbetreiber und der Charge-Point Operator kaum ein neues System erstellen, da die gegenseitigen Wechselwirkungen und Eigenheiten (insbesondere mit Blick auf den Bestand im Feld) nicht ausreichend zu bewerten sind. Die Fachgebiet-übergreifende Normung incl. der Systemschnittstellen bildet hier eine gute Verbindung. Beispielsweise wird eine verbesserte Wartung auf Basis gewonnener Sensordaten nur mit einer Weiterentwicklung des OCPP-Standards möglich sein. Insbesondere erwartete und aufgezeigte Wechselwirkungen in galvanisch verbundenen Systemen bedingen einer ganzheitlichen Betrachtung.

Nachgelagerte Forschungsprojekte und Arbeitsgruppen können auf dem gewonnenen technisch-wissenschaftlichen Stand aufbauen und nächste Schritte zu einer gemäß den Zielen des Verbundvorhabens Verbesserung der Wirtschaftlichkeit, Nutzbarkeit, Umwelteigenschaften und Nachhaltigkeit von Ladelösungen in einem zukünftig vollständig aus Erneuerbaren Energien gespeisten Energiesystem beitragen.

7. Bekanntgewordener Fortschritt von anderen Stellen

Im Rahmen der Durchführung des Projektes wurden, mit Bezug auf die Teilvorhaben seitens Bender, neben der für das Projekt notwendige Recherchen und Analysen auch diverse Veröffentlichungen, Technologieentwicklungen, Positionspapiere, öffentliche Normenentwürfe sowie Landes- und EU-Vorgaben wie z.B. AFIR, Ladesäulenverordnung bewertet und auf Relevant zum Forschungsvorhaben beurteilt.

Es erfolgte die Betrachtung von u.a.:

- Allgemeines Marktumfeld und Marktentwicklung mit Zulassungszahlen des KBA, der EU
- Patente (z.B. galvanisch nicht getrennte OnBoard-Charger)
- Technische Entwicklung der Fahrzeughersteller und Wallboxhersteller hinsichtlich V2G, V2L, V2H
- Normenupdates (z.B. IEC61581-23 ED 2)
- ICCT Studie zur Erzeugung von Treibhausgasen im Vergleich von Verbrenner-Fahrzeugen vs. Elektrofahrzeugen über die Lebensdauer

In Summe kann man zusammenfassend feststellen, dass es in der Industrie immer wieder Bestrebungen und auch Patente zur Beseitigung der galvanischen Trennung in DC-Ladern und On-Board-Chargern gibt, dies allerdings für bisher vorhandene Technologie neue Hürden aufbringt und negative Abhängigkeiten an anderen Teilbereichen wie der elektrischen Sicherheit, EMV oder der Kompatibilität zur im Bestand befindlichen Technologie erzeugt.

Eine weitergehende Beobachtung ist dennoch erforderlich.

8. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse

Hintergrund der gemeinsamen Motivation zum Verbundforschungsvorhaben PVtec-Charger war der Grund, dass Ladelösungen für die Elektromobilität und entsprechende Ladestationen derzeit noch durch zu hohe Kosten und eine noch unzureichende Integrierbarkeit in das sich dynamisch wandelnde Energiesystem geprägt sind. Für die Verbesserung von der Wirtschaftlichkeit, der Nutzbarkeit sowie Umwelteigenschaften und Nachhaltigkeit von Ladelösungen in einem zukünftig vollständig aus Erneuerbaren Energien gespeisten Energiesystem bedurfte es der eingehenden Analyse, Erforschung und Erprobung. Erreicht werden sollen diese Ziele durch einen neuartigen Lösungsansatz mit einer Reihe technologischer Innovationen aus der Wechselrichter- und Digitalisierungstechnik sowie einer ganzheitlichen Betrachtung von der Leistungselektronik auf Baugruppenebene, incl. der Sensorik für elektrische Sicherheit bis hin zur optimalen Integration ins Energiesystem. Bender befasste sich im Zuge des Teilvorhabens mit dem Anteil der Verbesserung und Erforschung von neuen Methoden, Messtechniken und Lösungsansätzen zur elektrischen Sicherheit.

Konkret wurden dabei Lösungsansätze zur Ermöglichung von transformatorlosen DC-Wallboxen kleiner Leistung erarbeitet und deren Limitierungen diskutiert. Die Analysen zeigen, dass trotz innovativer Ansätze und mehrfacher Patentanmeldungen insbesondere bei DC-Ladern weiterhin offene technische und regulatorische Fragestellungen bestehen. In Summe mit der Erkenntnis, dass DC-Ladestationen auch zukünftig eine galvanische Trennung benötigen um problematische Wechselwirkungen mit angeschlossenen Systemen (Netz und Fahrzeug sowie weitere Stationen) sowie nicht umsetzbare Abschaltzeiten zu vermeiden.

Weiterhin wurde die Verbesserung der Sensordaten für eine zukunftssichere und optimierte Instandhaltung betrachtet, wodurch sich speziell für die Betreiber von Ladeinfrastruktur neue Geschäftsmodelle wie eine Prognose zu Ausfallzeitpunkten, Fehlerzuweisung zu Fahrzeugen und Koordination von geplanten Wertstattterminen ergeben können. Darüber hinaus wurden verbesserte Lösungsansätze von Sensoren der elektrischen Sicherheit zur Verwendung in Multi-Outlet DC-Ladestationen gewonnen, wodurch vor allem die Herstellkosten einer DC-Ladestation großer Leistung signifikant gesenkt werden könnten.

Hierbei konnten erste Funktionsmuster und Ansätze für Datenpunkte erzeugt und im Rahmen des Verbundvorhaben bei den Partnern integriert und getestet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse sowie das erschlossene Grundlagenwissen werden in den Ausbau der Ladeinfrastruktur bzgl. der Nutzung in neuen Sensoren, Komponenten und Konzepten der elektrischen Sicherheit sowie deren Datenverarbeitung und Weiterentwicklungen der branchenspezifischen Normen über deren zugeordneten technischen Arbeitskreise einfließen.

9. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Relevanz der Elektromobilität stellt eine der größten Veränderungen in der Mobilität des Menschen der heutigen Zeit dar. Anforderungen aus Umwelt- und Klimaschutzzielen, getrieben durch CO₂-Einsparungen, befeuern mit Emissionsgrenzwerten und Flottenverbrauchskennzahlen sowohl den Ausbau der erneuerbaren Energien als auch die Art der Nutzung von Energiespeichern im Kontext dessen. Mit der Elektromobilität wird nicht nur die Art der Fortbewegung verändert, sondern auf Grund der verbundenen Systeme auch die Art der Stromversorgung neu gedacht. Sofern ein Elektrofahrzeug vorhanden ist, benötigt man auch eine entsprechende Ladeinfrastruktur und hat damit einen Verbindungspunkt in die lokalen Verteilnetze. Basierend auf den Zulassungszahlen von 2024 sieht man einen Weltmarkt von ca. 17 Mio Fahrzeugen als Elektro- oder Plug-In Fahrzeug als gegeben, welcher mit vermutlich 10-20% Wachstum pro Jahr voranschreiten wird. Ein solcher Massenmarkt erfordert von Herstellern und Lösungsanbieter auch auf Grund sich noch immer verändernder Normen und Anforderungen sich kontinuierlich mit Innovation und Kostenreduzierungen gegen den Wettbewerb durchzusetzen, um gute Perspektiven zu erhalten.

Die gewonnenen Erkenntnisse des Verbundforschungsprojektes PVtec Charger bieten eine entscheidende Grundlage für die Ableitung neuer Produktanforderungen und zukünftiger Systemlösungen im Bereich der Elektromobilität, insbesondere im durch Bender aufgezeigten Feld der elektrischen Sicherheit. Denn eines darf der Umgang mit Strömen bis 1000A und Spannungen bis 800V DC im Rahmen der Elektromobilität nicht sein, unsicher. Auch im größten Markt steht die Sicherheit des Menschen und der Anlagen im Vordergrund und darf nicht durch Kostendruck vernachlässigt werden.

Neben den Ansätzen für die Ladestationen und Wallboxen selbst zeigen die Ergebnisse eine Nutzbarkeit vom Betreiber eines Ladeparks, über den Verteilnetzbetreiber oder Privatkunden, den Normengremien bis hin zu den Fahrzeugherstellern auf. Dies wird ein nachhaltigeres Betreiben und einen effizienteren Hochlauf sowie verbesserte Nutzerakzeptanz im Hochlauf der Elektromobilität stützen.

Aus wirtschaftlicher Sicht des Nutzens und der Verwertung findet sich beispielsweise die im Projekt geschaffene Grundlage zu integrierten Trennrelais in Isolationsüberwachungsgräten bereits als technische Basis in der Überleitung zu einer anschließend außerhalb des Forschungsprojektes laufenden Serienproduktentwicklung wieder. Teile des Konzeptes zur Sensordatenübertragung für verbesserte Instandhaltung wurden in die Normengremien um OCPP eingebracht. Hier sind die Vorteile der Lösungsansätze zunehmend bei den CPOs (Ladeparkbetreibern) zu vermitteln um diesen Akteuren die Möglichkeiten über den gewohnten Stand der Technik hinaus aufzuzeigen.

Auch wenn die Ergebnisse der Analyse zu traflosen DC-Wallboxen nach derzeitigem Stand der Technik keine Umsetzung eines solchen Systems aufzeigen, werden die Ergebnisse in den allgemeinen Diskussionen industrieller DC-Netze nutzbar sein und über entsprechende Arbeitsgruppen sowie technisch Arbeitskreise von Normengremien seitens Bender weitergeführt. Weiterhin stößt der Ansatz einer Differenzstrom-Lösung für zu Zuleitung von trafo-gebundenen DC-Wallboxen auf gutes wirtschaftliches Interesse bei ersten Herstellern, da hierdurch das Anlagenmonitoring und die Verfügbarkeit verbessert werden kann.

Die folgende Tabelle soll die konkrete Nutzung und Verwertung der Ergebnisse seitens Bender mit Bezug auf die zu Projektbeginn erwarteten Gesamtvorhabenbeschreibung (Nr.-Angabe) als Überblick darstellen. Nicht umsetzbare Zeilen wurden entfernt.

Tabelle 5: Verwertungsplan und -Aktivitäten

Nr.	Projekt-Ergebnis	Verwertung / Nutzen	Zeithorizont
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten			
1	Technologie- und Funktionsmusterlösungen sowie Technologieerkenntnisse für Sensoren zur Sicherstellung der elektrischen Sicherheit zum Einsatz in Trafo-losen DC-Ladeeinheiten bzw. DC-Ladestationen größerer Leistung.	Auf Basis der Ergebnisse entwickelte Sensoren erlauben die Nutzung weiterentwickelter und kostenreduzierter Technologien für DC-Ladeeinrichtungen von Elektrofahrzeugen. Bender kann auch in diesem Marktsegment ein signifikantes und nachhaltiges Umsatzwachstum und den Ausbau von Arbeitsplätzen sicherstellen. Die Analyse zu traflosen Systemen kann artverwandte Marktfelder mit Know-How versorgen und Basis für zukünftige Forschung darstellen, jedoch keine direkte Nutzung weiterentwickelter Trafo-loser PV Umrichter Technologien.	Ab 2026 größere Arbeitsplatz- & Umsatzrelevanz
2		Durch die zu erwartende deutliche Systemkostenreduktion unter Beibehaltung der elektrischen Sicherheit werden DC-Ladeeinrichtungen vor allem für den privaten Gebrauch erschwinglich, wodurch zum einen die Energiewende beschleunigt aber auch die Einbindung regenerativer Energien zur Stromverwertung gefördert wird. Die Ansiedlung von relevantem Know-How zur Ladetechnologie in Deutschland festigt die Bedeutung der heimischen Industrie aus Sicht des globalen Wettbewerbs.	Ab 2026 signifikanter volkswirtschaftlicher & ökologischer Nutzen. Speziell bei Einbeziehung von DC-Micro-Grids.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten			
3	Erkenntnisse zu Systemarchitekturen und Sicherheitskonzepten.	Mitarbeit und Einbringung von Ansätzen/Erkenntnissen in Arbeitsgruppen z.B. Normengremien, CharIn e.V., Fachpublikationen.	2022-2026
Wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Anschlussfähigkeit			
4	Technologieerkenntnisse zu Sensoren für Trafo-lose Ladestationen und Eignung von PV-WR-Technik für Ladestations-Leistungselektronik.	Nur Nutzung für Forschungs-Folgeprojekte, aber auf Grund der aufgezeigten Limitierungen auf unbestimmte Zeit nicht als Basis für Produktentwicklungen	Ab 2026 (Nur Forschung)
5	Erprobung und Evaluation von Sensordaten zum erweiterten Anlagenmonitoring.	Umsetzung von Prädiktive Maintenance Ansätzen in Serienprodukten zur Vermeidung von Systemausfällen und Ermöglichung von Datendienstleistungen.	Ab 2024
6	Funktionsmuster von integrierbarer Sensorik für DC-Ladestationen großer Leistung	Weiterentwicklung zu Serienprodukt-lösung bei deutlicher Kostenreduktion.	Ab 2024 Marktreife 2026

Die gewonnenen Erkenntnisse im Projekt zu Ladelösungen und Integration der Elektromobilität in die Verteilnetze, insbesondere aber die Anforderungen, Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zu Fahrzeugen im Bestand sowie neue Fahrzeugplattformen mit 800V DC-Systemen wurden und werden durch das Verbundprojektkonsortium in die Fachöffentlichkeit getragen und darüber je Konsortialpartner auch für die Entscheidungsfindung zur Festlegung der zukünftigen Produkt- und R&D-Roadmap genutzt.

10. Erfolgte oder geplante Veröffentlichung der Ergebnisse

Die im Rahmen des Projektes gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse sowie Konzepte werden in erster Instanz über diesen seitens Fa. Bender erstellen Abschlussbericht, aber auch über die jeweiligen Teilvorhaben-Abschlussberichte der Konsortialpartner veröffentlicht. Darüber hinaus sollen die Resultate in kommende Bender Produkte und Systemlösungen zur Unterstützung des Ausbaus der Elektromobilität einfließen, sofern eine entsprechende Weiterentwicklung oberhalb des TRL 8 (Technology Readiness Level) außerhalb des Forschungsprojektes einen kommerziellen Einsatz ermöglicht.

Um dies zu ermöglichen, werden und teilweise wurden die Erkenntnisse und abgeleiteten neu-definierten Anforderungen an neue Produkte und Lösungen zielgruppenorientiert aufbereitet, in Gremien wie technischen Arbeitskreisen von Normengremien diskutiert und als Basis für z.B. das Vorantreiben der Normenanforderungen an zukünftige Ladeinfrastruktur und deren Positionierung im Verteilnetz herangezogen.

Zusätzlich ist die Publikation der wesentlichen Elemente über Vorträge auf Fachkongressen und über Artikel in Fachzeitschriften und Bender Publikationen wie z.B. die Zeitschrift Monitor geplant und soll so der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden.

Sofern die Ergebnisse, nach entsprechender Weiterentwicklung zur Serienreife außerhalb dieses Forschungsprojektes, in neue Produkte und Dienstleistungen einfließen und somit der geplanten Verwertung zugeleitet sind, werden und wurden die Erkenntnisse mit Zulieferern und potenziellen Kunden besprochen. Hierbei erfolgt die Veröffentlichung entsprechend zusätzlich über die marktüblichen Vertriebswege, Messen und Marketingaktivitäten hin zu den späteren Nutzern, Kunden, Installateuren und Betreibern von Ladeinfrastruktur.

Darüber hinaus laufen Untersuchungen und Bewertungen von Konzepten zu Erfindungsmeldungen, welche zu abgeleiteten Schutzrechtsanmeldungen führen könnten.

11. Literaturverzeichnis

Übersicht verwendete online-Literatur:

https://odca.zvei.org/fileadmin/user_upload/Themen/Industrie/DC-Industrie/DC-INDUSTRIE2_Project-presentation_en_E.pdf (10.07.2025)

<https://sheffield.ac.uk/highreliabilitydrives/projects/imitaes> (10.07.2025)

<https://spectrum.ieee.org/ev-charging-2671242103> (10.07.2025)

[Electric cars are the cleanest—and getting cleaner faster than expected - International Council on Clean Transportation](#) (08.07.2025)

Übersicht verwendete Normen:

- ➔ IEC 60479-1:2018: Effects of current on human beings and livestock - Part 1: General aspects
- ➔ IEC 60479-2:2019: Effects of current on human beings and livestock - Part 2: Special aspects
- ➔ IEC 62955:2018: Residual direct current detecting device (RDC-DD) to be used for mode 3 charging of electric vehicles
- ➔ DIN EN 61851-23: VDE 0122-2-3:2014-11: Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge, Teil 23: Gleichstromladestationen für Elektrofahrzeuge (IEC 61851-23:2014); Deutsche Fassung EN 61851-23:2014