

## Bericht zum Teilprojekt

Konzeptionierung und prototypischer Aufbau eines mobilen  
Messgeräts zur Prüfung von Messgeräten im Anwendungsbereich der  
Elektromobilität

verfasst von

Olga Shadkhina und

Michael Müller

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH

29. November 2021

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung .....	3
1.1	Allgemeine Projektinformationen.....	3
1.2	Motivation.....	4
1.3	Normative Anforderungen an die Energiemessung von Ladeeinrichtungen.....	5
1.4	Grundprinzip der Prüfung .....	5
1.5	Anforderungen an das Messsystem .....	7
2	Konzept der Prüfeinrichtung.....	8
2.1	Konzept der Hardware und Messverfahren.....	8
2.2	Erkenntnisse und Erweiterung der Hardware .....	13
2.3	Konzept der Software.....	15
3	Einflussfaktoren auf die Prüfung .....	16
3.1	Umgebungsbedingungen der Hardwarekomponenten laut MessEV .....	16
3.2	Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Prüfung .....	17
3.3	Einsatzbedingungen des mobilen Messsystems.....	18
4	Verifizierung der Prüfeinrichtung und Messunsicherheitsbetrachtung .....	20
5	Fazit und Ausblick.....	24
5.1	Zusammenfassung .....	24
5.2	Ausblick .....	25
6	Quellen .....	26

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeine Projektinformationen

Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die öffentliche Ausschreibung des Teilprojekts im Rahmen des Vorhabens „ELSTA – Förderung der Elektromobilität durch Standardisierung, Koordination und Stärkung der öffentlichen Wahrnehmung“ mit der Aufgabestellung „Konzeptionierung und prototypischer Aufbau eines mobilen Messgeräts zur Prüfung von Messgeräten im Anwendungsbereich der Elektromobilität“ vom 01.06.2021.

Das Projekt wurde von dem VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., Bereich DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE, Stresemannallee 15, 60596 Frankfurt, ausgeschrieben. Dieses Projekt wurde von der VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Merianstraße 28, 60596 Frankfurt, angenommen.

Geleitet wird das Projekt von:

Herr Michael Müller  
E-Mail: michael.mueller2@vde.com,  
Tel.: +49 69 8306-770.

Die Projektbearbeitung und Berichtserstellung erfolgen durch:

Frau Olga Shadkhina  
E-Mail: Olga.Shadkhina@vde.com  
Tel.: +49 69 8306-348.

Unterstützt wird das Projekt intern durch Herrn Sven Grünberg und Herrn Batur Dayani aus dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut und durch die Firma LISION GmbH.

In der Ausschreibung sind Hintergrund sowie Zielsetzung des Projekts erläutert. Eine Ladeeinrichtung ist ein wesentlicher Teil des Geschäftsmodells einer Ladeinfrastruktur und wird für den Verkauf der Energie eingesetzt. Die an das Elektrofahrzeug übertragene Energie muss gemessen und abgerechnet werden. Infolgedessen unterliegt das Messgerät für die Messung der Energie den Anforderungen aus dem Mess- und Eichgesetz. Demgemäß muss an den Ladeeinrichtungen ein Konformitätsbewertungsverfahren mit einer Reihe an metrologischen Prüfungen durchgeführt werden. Bei diesen Prüfungen wird die Bereitstellung der Energie von der Ladeeinrichtung an den Verbraucher unter Berücksichtigung aller Verluste untersucht. Die Vernachlässigung der Verluste an den Komponenten der Ladeeinrichtung kann zu einem systematischen Fehler bei der Abrechnung der Energie und somit zu der Benachteiligung einer der Geschäftsparteien führen. Dementsprechend müssen die Ladeeinrichtungen auf das Einhalten der Verkehrs- und Eichfehlergrenzen geprüft werden.

Ziel des vorliegenden Projekts ist die Konzeptionierung und der prototypische Aufbau eines mobilen Messsystems, mithilfe dessen metrologische Prüfungen an den Ladeeinrichtungen durchgeführt werden können. Zunächst müssen die Eigenschaften des Messsystems definiert und

ein Konzept erstellt werden. Anschließend muss der Prototyp des Messsystems gebaut werden, mit dem die Validierung der Ladeeinrichtungen durchgeführt werden kann.

Die Aufgaben des vorliegenden Projekts wurden in sechs Arbeitspakete aufgeteilt. Zuerst muss eine Übersicht über die existierenden Normen und Regulatorien erstellt werden. Des Weiteren müssen die Einflussfaktoren auf die Prüfung identifiziert und analysiert werden. Darüber hinaus müssen ein Konzept erstellt und die Hardwarekomponenten für den Aufbau des Prototyps ausgewählt werden. Das Messsystem muss aufgebaut und die Messgenauigkeit bewertet werden. Am Ende des Projekts müssen die Ergebnisse und Erkenntnisse zusammengeführt werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Konzeptionierung und der prototypische Aufbau eines mobilen Messsystems vorgestellt. Die durch die Normen und Regulatorien festgelegten Rahmenbedingungen für die Energiemessung an Ladeeinrichtungen werden erläutert. Aus den Rahmenbedingungen werden die Anforderungen an das Messsystem abgeleitet. Gemäß den Anforderungen wird das Konzept für den Prototypen entwickelt. Nach dem Aufbau des Prototyps und der Inbetriebnahme wird eine Betrachtung der Messunsicherheit durchgeführt. In der vorliegenden Arbeit werden die wesentlichen Aspekte des Messsystems sowie die während der Bearbeitung des Projekts gesammelten Erkenntnisse dargestellt.

## 1.2 Motivation

Die Elektromobilität ist ein wichtiger Baustein der Energiewende. Der Markt der Elektromobilität hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Anzahl der Elektroautos auf den Straßen nimmt jedes Jahr deutlich zu. Darüber hinaus wird der Kauf von Elektroautos staatlich gefördert und die Eigentümer genießen steuerliche Vorteile. Daher ist auch in den kommenden Jahren mit einem deutlichen Anstieg der Anzahl an Elektrofahrzeugen zu rechnen.

Um Elektrofahrzeuge komfortabel nutzen zu können, muss sich die Ladeinfrastruktur entsprechend weiterentwickeln. Dazu gehören eine ausreichende Anzahl von Ladeeinrichtungen im öffentlichen Straßenverkehr und im privaten Bereich, sowie Schnellladeeinrichtungen zum schnelleren Laden von Elektrofahrzeugen. Schnellladeeinrichtungen arbeiten meist mit Gleichstrom (DC) und sind in der Lage, aufgrund der hohen Ladeleistung innerhalb kurzer Zeit eine hohe Energiemenge an das Fahrzeug zu übertragen.

Die Hersteller von Ladeeinrichtungen müssen eine Reihe von Richtlinien, Vorschriften und Normen einhalten. Um die Einhaltung der normativen Vorgaben prüfen zu können, sind spezielle Prüfeinrichtungen erforderlich. Ein wesentlicher Bestandteil der Prüfung von Ladeeinrichtungen ist die Genauigkeitsprüfung der Energiemessung. Die Ladeeinrichtung misst die Energie, die während des Ladevorgangs an das Elektrofahrzeug übertragen wird. Durch die Überprüfung der Genauigkeit der Energiemessung wird sichergestellt, dass dem Kunden nur die tatsächlich bereitgestellte Energie berechnet wird.

Aufgrund der schnellen Einwicklung von Standards und Technologien sind Prüfeinrichtungen in diesem Bereich nur begrenzt am Markt verfügbar. Daher wird im Rahmen dieses Förderprojekts ein mobiles Messsystem für die Genauigkeitsüberprüfung der Energiemessung an DC-Ladeeinrichtungen entwickelt.

Bei der Entwicklung eines solchen Systems müssen alle normativen Anforderungen berücksichtigt werden, um die normgerechte Durchführung von Prüfungen an Ladeeinrichtungen gewährleisten zu können.

### 1.3 Normative Anforderungen an die Energiemessung von Ladeeinrichtungen

Die *Messgeräte Richtlinie 2014/32/EU* enthält die Rechte und Pflichten von Herstellern, Importeuren und Händlern bei der Einführung von Ladeeinrichtungen auf dem Markt der Europäischen Union. Weiterhin beinhaltet die Richtlinie die Regeln zur Marktüberwachung und die Anforderungen an die Produkte.

Das Mess- und Eichgesetz (*MessEG*) und die Mess- und Eichverordnung (*MessEV*) setzen die Messgeräte Richtlinie auf nationaler Ebene um. Das *MessEG* definiert die allgemeinen Anforderungen an Messgeräte, die im öffentlichen Verkehr eingesetzt werden. Darüber hinaus enthält Anlage 4 des *MessEG* das Konformitätsbewertungsverfahren. Dieses Verfahren überprüft, ob die grundlegenden Sicherheits- und Leistungsanforderungen erfüllt sind und kann nur von einer Konformitätsbewertungsstelle durchgeführt werden (*MessEG §6*). Das VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut ist seit April 2019 eine notifizierte Konformitätsbewertungsstelle.

Gleichstrommessgeräte, wie die in DC-Schnellladeeinrichtungen verbauten Gleichstromzähler, müssen demnach laut *MessEV* ein Konformitätsbewertungsverfahren durchlaufen. Ein solches Verfahren beinhaltet die Prüfung der Hard- und Software eines Gerätes. Gleichstromzähler bzw. Ladeeinrichtungen sind unter verschiedenen Umgebungsbedingungen zu prüfen. Die *MessEV* erläutert die verschiedenen Methoden zur Prüfung der Elektrizitätszähler. Weiterhin werden in der *MessEV* die Module beschrieben, welche die grundlegenden Anforderungen an das Produkt beinhalten. Mit dem mobilen Messsystem werden sowohl eine Genauigkeitsprüfung der Energiemessung als auch eine funktionale Prüfung durchgeführt. Die für die Prüfung relevanten Module sind Modul B mit der Beschreibung der Baumusterprüfung und Modul F mit der Konformitätsprüfung.

### 1.4 Grundprinzip der Prüfung

Die Genauigkeitsprüfung der Ladeeinrichtung erfolgt durch den Vergleich zwischen der Energie, welche laut dem Zähler der Ladeeinrichtung an den Verbraucher übergeben wurde und der von dem entwickelten Messsystem gemessenen Energie. Mit dem Messsystem wird eine Referenzmessung durchgeführt, anhand derer der tatsächliche Verbrauch ermittelt wird.

Der Prüfaufbau zur Genauigkeitsprüfung der Energiemessung ist in der folgenden Abbildung dargestellt.

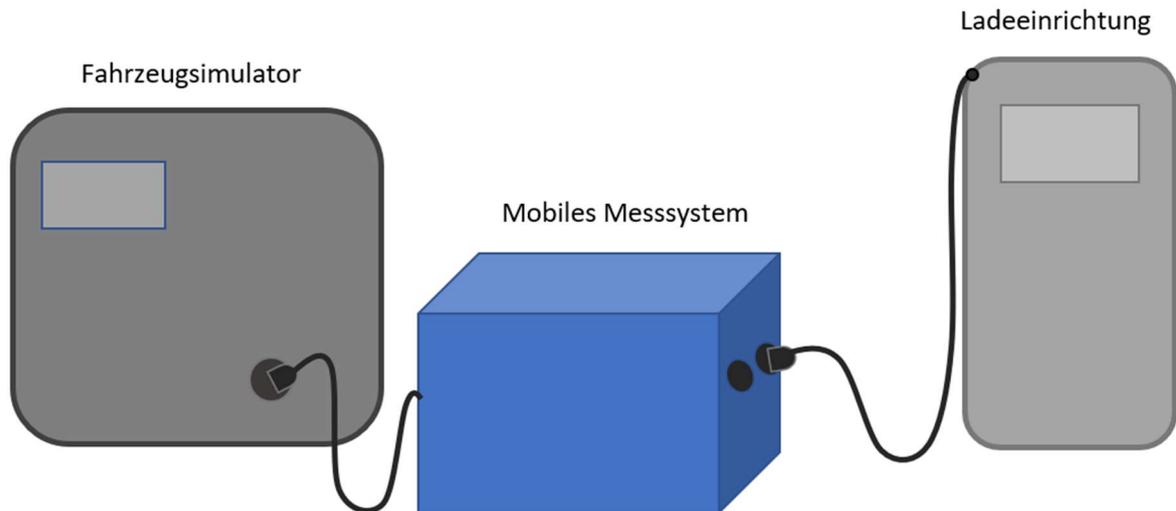


Abbildung 1: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus

Der Prüfaufbau beinhaltet dabei die folgenden Komponenten:

- Ladeeinrichtung, die geprüft werden soll (Prüfling)
- Mobiles Messsystem zur normkonformen Energiemessung
- Fahrzeugsimulator zur Simulation des Ladevorgangs

Dabei wird eine definierte Energiemenge von der Ladeeinrichtung an den Autosimulator übertragen. Dieser Prozess wird auch Energiedosierung genannt. Bei diesem Prozess wird die Differenz zwischen der Referenzenergie und der von der Ladeeinrichtung gemessenen Energie ermittelt. Diese Energiedifferenz entsteht durch die Verluste, die zwischen dem Zähler der Ladeeinrichtung und dem Energieübergabepunkt zustande kommen. Diese Verluste können unterschiedliche Ursachen haben und müssen bei der Prüfung ermittelt werden.

Zur Durchführung der Prüfung müssen folgende Schritte ausgeführt werden:

- Der Ladestecker der Ladeeinrichtung muss mit der entsprechenden  $s$  des Messsystems verbunden werden
- Es muss eine Verbindung vom Messsystem zum Fahrzeugsimulator hergestellt werden
- Mithilfe des Fahrzeugsimulators werden eine definierte Spannung und ein definierter Strom eingestellt und somit eine Energiemenge dosiert
- Die von der Ladeeinrichtung zum Fahrzeugsimulator übertragene Energie (Referenzenergie) wird mit dem mobilen Messsystem gemessen. Bei der Messung sind die normativen Anforderungen zu beachten
- Die von der Ladeeinrichtung gemessene Energie wird mit der Referenzenergie verglichen
- Die Abweichung der Ladeeinrichtung wird berechnet und abhängig von der Genauigkeitsklasse laut *DIN EN 50470-3* bewertet

Die Bewertung der Ladeeinrichtung wird nach den in der *DIN EN 50470-3* definierten Genauigkeitsklassen A, B und C durchgeführt. Die zulässige Fehlergrenze wird abhängig von der Genauigkeitsklasse des Zählers bestimmt.

## 1.5 Anforderungen an das Messsystem

Bei der Entwicklung eines mobilen Messsystems zur Genauigkeitsprüfung der Energie der Ladeeinrichtung müssen verschiedene Aspekte und Anforderungen berücksichtigt werden.

Die zentralen Anforderungen an das Messsystem der Ladeeinrichtung sind in der Anwendungsregel *VDE-AR-E 2418-3-100* erläutert. Gemäß *Kapitel 5.2.1 VME005* muss die Genauigkeitsprüfung der Energiemessung am Anschlusspunkt der Versorgungspunktmesseinrichtung (VME) durchgeführt werden. Demnach muss das mobile Messsystem so konstruiert sein, dass auch die Messung der Referenzenergie am Anschlusspunkt der VME durchgeführt wird. Auf diese Weise werden alle Verluste berücksichtigt, die innerhalb der Ladestation auftreten können, sodass die gemessene Referenzenergie der tatsächlich an das Fahrzeug übertragenen Energie entspricht.

Anhang A der Anwendungsregel *VDE-AR-E 2418-3-100* definiert die Anforderungen an Gleichstromzähler für Versorgungseinrichtungen. *Kapitel A.3.10* erläutert die Anforderungen an die Anzeige der Ladeeinrichtung. Der gemessene Energiewert muss mit zwei Nachkommastellen angezeigt und vom Display abgelesen werden können. Diese normative Vorgabe legt die Genauigkeit der Energiemessung des Gleichstromzählers und damit des Messwertes, der für die spätere Fehlerberechnung verwendet wird, fest.

Bei der Prüfung der Energiemessung von Ladeeinrichtungen ist die Messgenauigkeit der Referenzenergie ein wesentlicher Aspekt. Die allgemeinen Anforderungen an die Messgerätegenauigkeit sind in der *MessEV* definiert. In §22(2) ist vorgegeben, dass die Messgeräte eine Genauigkeit aufweisen müssen, die dem Stand der Technik entspricht und dabei die Messaufgabe erfüllt.

Um die Genauigkeit der Referenzenergiemessung nachzuweisen, muss die Messunsicherheit nach *DIN EN ISO/IEC 17025, Kapitel 7.6* bestimmt werden. Alle Variablen, die die Messung beeinflussen können, müssen berücksichtigt und dokumentiert werden. Darüber hinaus sind nach *DIN EN ISO/IEC 17025, Kapitel 7.5* die Ergebnisse und alle weiteren für die Prüfung relevanten Informationen während der Prüfung zu dokumentieren. Diese Daten müssen eindeutig einer Prüfung zugeordnet werden können. Weiterhin müssen die Aufzeichnungen sowohl das Datum als auch die Identität des für die Aufnahme der Daten Verantwortlichen enthalten.

Die Umgebungsbedingungen, unter denen das Messgerät eingesetzt werden darf, sind gemäß *MessEV, Anlage 1, Kapitel 1.2* zu berücksichtigen. Alle Einflussgrößen, welche die Genauigkeit beeinflussen können, müssen angegeben werden. Bei der Entwicklung des mobilen Messsystems ist es wichtig, die Betriebsumgebungsbedingungen aller in der Anlage verwendeten Hardwarekomponenten zu berücksichtigen. Die Einflussgrößen, welche die Messung der Referenzenergie beeinflussen können, müssen ebenfalls angegeben werden.

Die Anforderungen an Fahrzeugstecker und Fahrzeugkupplungen sind in der Norm *DIN EN 62196-3 (VDE 0623-5-3)* definiert. Diese müssen ebenfalls bei der Planung und Konstruktion des mobilen Messsystems berücksichtigt werden, um die Prüfung mit den jeweiligen Fahrzeugsteckern und Fahrzeugkupplungen durchführen zu können.

Aus den einzelnen Normen und Regulatorien werden die Anforderungen für die Prüfung abgeleitet und ein Gesamtkonzept für die Prüfeinrichtung erstellt.

## 2 Konzept der Prüfeinrichtung

Bei der Planung und Konstruktion des Messsystems müssen unterschiedliche Anforderungen berücksichtigt werden. Einige Anforderungen werden hierbei von den Normen und Regularien vorgegeben. Weitere Anforderungen ergeben sich aufgrund der im VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut vorhandenen Erfahrungen bei der Entwicklung von Prüfeinrichtungen und bei der Durchführung von Prüfungen in unterschiedlichen Bereichen der Elektrotechnik.

Das Messsystem muss so konstruiert sein, dass die Energie möglichst nah am Übergabepunkt der Energie gemessen wird, um die Messunsicherheit zu minimieren. Weiterhin muss die Messgenauigkeit der Prüfeinrichtung nachgewiesen werden. Auf dem Markt sind unterschiedliche Stecksysteme für das Laden von Elektrofahrzeugen verfügbar. Das Messsystem muss für die Prüfung mit den Steckertypen *CCS* und *CHAdeMO* ausgelegt werden. Diese Steckertypen sind in Europa am weitesten verbreitet und müssen demnach häufig geprüft werden. Die zulässige maximale Leistung des jeweiligen Steckertyps muss bei der Planung berücksichtigt werden.

Das Messsystem sollte modular aufgebaut werden, um einen einfachen Wechsel auf neue Prüfstecker zu ermöglichen. Durch den modularen Aufbau des Messsystems wird es zukünftig möglich sein, neue Steckertypen ohne Veränderung des zentralen Teils des Messsystems prüfen zu können. Das gesamte Messsystem muss für eine maximale Leistung von 600 kW (maximale Stromstärke 600 A DC und maximale Spannung 1000 V DC) ausgelegt werden. Eine sichere Durchführung der Prüfung auch bei hohen Spannungen und Strömen ist ein zentraler Aspekt des Messsystems. Die Bedienung der Prüfeinrichtung muss komfortabel sein. Dafür wird eine grafische Benutzeroberfläche benötigt. Darüber hinaus müssen die Rohdaten der Prüfung für die Auswertung der Messung automatisch gespeichert werden.

### 2.1 Konzept der Hardware und Messverfahren

Der Prüfaufbau besteht aus der zu prüfenden Ladeeinrichtung, dem entwickelten Messsystem und einem Autosimulator als Verbraucher und ist in Abbildung 2 dargestellt. Das Messsystem wird zwischen die Ladeeinrichtung und den Autosimulator geschaltet.



Abbildung 2: Prüfaufbau bestehend aus der Ladeeinrichtung (rechts), dem Messsystem (Mitte) und dem Autosimulator (links)

Die Energie, die von der Ladeeinrichtung in den Autosimulator eingespeist wird, fließt über das Messsystem und kann somit abgegriffen und gemessen werden. Alle für die Übertragung der Energie und für die Kommunikation benötigten Leitungen werden in dem Messsystem von der Ladeeinrichtung bis zum Autosimulator weitergeführt. Somit werden sowohl der Energieübertragungsprozess als auch der Kommunikationsprozess durch das Messsystem nicht beeinflusst. Das Messsystem mit entfernter Seitenblende ist in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Messsystem mit entfernter Seitenblende

Die in Kapitel 1 erläuterten Anforderungen müssen bei der Konstruktion des Messsystems beachtet werden. Die zentrale Anforderung ist die Messung der Energie im Übergabepunkt der Ladeeinrichtung zum Elektroauto. Analog zum realen Ladevorgang wird bei der Prüfung der Anschlusspunkt der Ladeeinrichtung an das Messsystem als Übergabepunkt der Energie definiert. Die Energiemessung im Übergabepunkt ermöglicht es, die Energie, die tatsächlich von der Ladestation an das Elektrofahrzeug geliefert wird, festzustellen. Diese gemessene Energie ist die Referenzenergie, die mit der vom Zähler der Ladeeinrichtung gemessenen Energie verglichen wird. Bei der Messung der Referenzenergie werden alle Fehler, die durch die Erwärmung, die interne Verdrahtung, den Spannungsfall und weiteren Faktoren innerhalb der Ladeeinrichtung entstehen können, berücksichtigt.

Die Messung der Energie wird mit dem Präzisions-Leistungsmessgerät *LMG671* der Firma ZES-Zimmer durchgeführt. Die Energie berechnet sich aus Spannung, Strom und Zeit. Mit oben genanntem Messgerät ist die direkte Messung der Spannung mit ausreichender Genauigkeit bis 1000 V möglich. Bei der Spannungsmessung muss berücksichtigt werden, dass der Messpunkt der Spannung möglichst nah am Energieübergabepunkt der Ladeeinrichtung liegen muss, um die Messunsicherheiten zu minimieren. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Anschlusspins der in das Messsystem eingebauten Steckerbuchse isoliert sind. Um das Verhalten der Ladeeinrichtung während der Prüfung nicht zu beeinflussen, dürfen die Steckerbuchse und Anschlusspins nicht beschädigt werden. Aus diesem Grund wird die Spannung unmittelbar nach der Steckerbuchse gemessen. Die Leitung zwischen dem Energieübergabepunkt und dem Spannungsmesspunkt verursacht einen minimalen Spannungsfall. Die dadurch verursachte Messunsicherheit der Spannungsmessung hat nahezu keine Auswirkung auf die Ergebnisse der Prüfung, wird dennoch bei der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt.

Für die Berechnung der Energie muss neben der anliegenden Spannung auch der Strom gemessen werden. Das Messsystem muss so ausgelegt werden, dass ein Strom bis 600 A mit ausreichender Genauigkeit über den gesamten Messbereich gemessen werden kann. Die direkte Messung des

Stroms ist bei den meisten Labormessgeräten auf 40 A begrenzt. Um den Strom über den gesamten Messbereich zu messen, können Präzisions-Stromumsetzer eingesetzt werden. Mit Präzisions-Stromumsetzern, auch Nullfluss-Messwandler genannt, können bei Bedarf Ströme bis zu 2000 A gemessen werden. Diese arbeiten nach dem Prinzip der Stromkompensation. Durch den Primärstrom wird ein Magnetfluss erzeugt. Dieser Magnetfluss wird mit einem Sekundärstrom kompensiert. Diese Methode ermöglicht es, hohe Ströme mit einem geringen Messfehler zu messen. Bei der Wahl der Stromsensoren muss die benötigte Genauigkeit der Messung berücksichtigt werden.

Nullfluss-Messwandler weisen bei der Messung niedriger Ströme eine niedrigere Genauigkeit auf. Um eine ausreichende Genauigkeit der Strommessung im gesamten Messbereich zu gewährleisten, muss eine Kaskadierung der Sensoren für die jeweiligen Messbereiche vorgenommen werden. Der gesamte Strombereich wird in drei separate Messbereiche unterteilt. Der größte Strommessbereich liegt zwischen 200 und 600 A und wird mithilfe des Präzisions-Stromumsetzers *PCT600* und dem Präzisions-Leistungsmessgerät *LMG671* der Firma ZES-Zimmer gemessen. Der mittlere Strommessbereich liegt zwischen 32 und 200 A und wird mit dem Präzisions-Stromumsetzer *PCT200* und dem Präzisions-Leistungsmessgerät *LMG671* gemessen. Für die Messung des niedrigen Strommessbereichs bis zu 32 A wird der direkte Strommesseingang des Präzisions-Leistungsmessgeräts *LMG671* verwendet. Um die Präzisions-Stromumsetzer an die Leitung des Messsystems anzubringen, wird ein Stromschienensystem in das Messsystem eingebaut. Das Stromschienensystem ist für Ströme bis zu 600 A ausgelegt und ermöglicht das einfache Umschalten zwischen den unterschiedlichen Messbereichen und Steckertypen. Der Wechsel zwischen den Steckertypen sowie den Messbereichen wird mithilfe von Stromschienenlaschen realisiert. Dies sind Kupferschienen, die abhängig vom zu prüfenden Steckertypen und dem benötigten Strommessbereich an die entsprechende Stelle des Stromschienensystems geschraubt werden. Das Stromschienensystem ist mit Positionssensoren ausgestattet, um die Position der Stromschienenlaschen zu detektieren. Somit wird die korrekte Einstellung des Messbereichs und des gewählten Steckertyps für die Prüfung kontrolliert. Der Zugang zu dem Stromschienensystem erfolgt durch die seitlichen Türen des Messsystemgehäuses. Diese sind mit Endschaltern ausgestattet, sodass beim Öffnen der Tür die Spannungsversorgung unterbrochen wird. Auf diese Weise wird die Sicherheit des prüfenden Personals gewährleistet. Abbildung 4 zeigt das Stromschienensystem der Prüfeinrichtung.

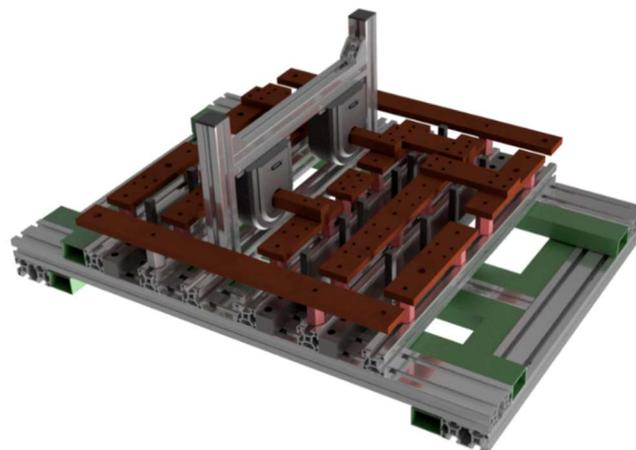


Abbildung 4: Stromschienensystem der Prüfeinrichtung

Für die Berechnung der Energie müssen ebenfalls die Zeitpunkte der Strom- und Spannungsmessung gespeichert werden. Die Zeitbasis des Leistungsmessgeräts ist für die Messung der Energie geeignet und weist eine hohe Genauigkeit auf. Die Messwerte werden mit einem Takt von 10 Millisekunden aktualisiert. Der Fehler, der durch die Zeitbasis des Leistungsmessgeräts entstehen kann, wird in der Messunsicherheitsbetrachtung berücksichtigt.

Neben dem Strom, der Spannung und der Zeit, die für die Messung der Energie relevant sind, werden weitere Größen gemessen, welche bei der Auswertung der Prüfung behilflich sein können. Die Temperatur, die unmittelbar am Übergabepunkt der Energie entsteht, wird ebenso gemessen wie die Umgebungstemperatur und die Temperatur im Innenraum des Messsystems. Die Messung der Umgebungstemperatur dient zur Kontrolle der äußeren Prüfbedingungen. Die Messung der Temperatur des Innenraums des Messsystems hilft dabei, die Betriebstemperatur der eingebauten Hardwarekomponenten zu überwachen, um die zulässigen Temperaturen nicht zu überschreiten. Die Überschreitung der zulässigen Betriebstemperatur kann einen Einfluss auf die Genauigkeit der Messtechnik haben und somit die Prüfungsergebnisse beeinflussen. Um die Innenraumtemperatur des Messsystems zu senken, werden mehrere Lüfter eingebaut. Die Temperatur an dem Energieübergabepunkt wird mit Thermoelementen und entsprechenden Temperaturmessumformern erfasst. Für die Erfassung der Raumtemperatur und der Temperatur innerhalb des Messsystems werden *PT100*-Sensoren eingesetzt.

Das Leistungsmessgerät berechnet intern die Energie im Energieübergabepunkt, welche als Referenzenergie verwendet wird. Um die Richtigkeit der Prüfung zu validieren, werden zusätzlich die Rohdaten der Spannungs- und Stromwerte gespeichert. Diese Größen müssen laut Norm nicht gemessen werden, können den Prüfern jedoch bei der Auswertung der Messdaten einen hohen Mehrwert bringen.

Die Sicherheit beim Betrieb des Messsystems muss jederzeit gewährleistet sein. Das Messsystem kann jederzeit über den Not-Aus Schalter abgeschaltet werden. Beim Öffnen einer der Türen des Messsystems wird die Spannungsversorgung ebenfalls unterbrochen. Neben der Versorgung des Messsystems muss ebenso die von der Ladeeinrichtung eingespeiste Spannung abgeschaltet werden. Aus diesem Grund werden die CP-Kontakte der Kommunikationsleitungen über entsprechende Relais geführt. Bei Unterbrechung der Kommunikationsleitung schaltet die Ladeeinrichtung automatisch die Einspeisung der Energie ab. Somit wird ein sicherer Zustand des Messsystems hergestellt.

Die Relais und Schütze werden mithilfe einer Steuerung der Firma KUNBUS GmbH geschaltet. Für die Ein- und Ausgabe der Signale werden mehrere digitale Steuerungsmodule verwendet. Weiterhin werden analoge Steuerungsmodule zur Temperaturerfassung während der Prüfung verwendet. Bei den Steuerungen der Firma KUNBUS handelt es sich um industrietaugliche Steuerungen, die alle Anforderungen der Norm *EN 61131-2* bzw. *IEC 61131-2* erfüllen.

Des Weiteren wird ein Erdanschluss für das Messsystem vorgesehen. Die energieführenden Leitungen aus der Ladeeinrichtung haben keine Verbindung zum Erdpotential, da die Ladeeinrichtung ähnlich dem IT-Netz verschaltet ist. In IT-Netzen sind alle aktive Leiter vom Erdpotential getrennt und somit kann ein Isolationsfehler nur zu sehr kleinem Fehlerstrom führen. Weiterhin werden die Ladeeinrichtungen einer elektrischen Sicherheitsprüfung unterzogen. Diese wird durch eine Isolationsüberwachung realisiert. Im Falle eines Isolationsfehlers schaltet die Ladeeinrichtung die Einspeisung der Energie ab. Aus diesem Grund müssen lediglich die einzelnen Hardwarekomponenten des Messsystems, gegenüber der einspeisenden Hilfsenergie (230V), geerdet werden.

Die Prüfung der Ladeeinrichtungen mit CCS-Stecker wird mit Strömen bis 500 A durchgeführt. Aufgrund des hohen Stroms muss die Leitung zwischen Messsystem und Autosimulator gekühlt werden. Dafür wird ein Kühlsystem der Firma Phoenix Contact GmbH in das Messsystem eingebaut. Dieses wird von der Steuerung der Anlage überwacht und muss bei jedem Ladevorgang mit einer CCS-Steckvorrichtung verwendet werden. Die CHAdeMO-Steckvorrichtung ist auf Ströme bis 200 A begrenzt. Somit wird keine Kühlung der Zuleitung zwischen dem Messsystem und dem Autosimulator benötigt.

Falls neue Stecksysteme geprüft werden sollen, können die Front- und die Rückblenden der Anlage ausgetauscht werden. Das Messsystem ist so aufgebaut, dass die Frontblende mit den eingebauten Buchsen sowie die Rückblende mit der Zuleitung zum Autosimulator, einfach vom Messsystem abmontiert werden können. Die Verschaltung mit den Sensoren sowie mit der Mess- und Steuerungstechnik bleiben dabei unverändert. Somit kann die Prüfeinrichtung einfach an die Bedürfnisse der Kunden oder an durch Normenänderungen veränderte Anforderungen angepasst und für Prüfungen von beliebigen Steckertypen mit Strömen bis zu 600 A und Spannungen bis zu 1000 V eingesetzt werden. Die Front- und die Rückblenden des Messsystems sind in Abbildung 5 dargestellt.



Abbildung 5: Vorder- und Rückseite des Messsystems

Der Gesamtaufbau des Messsystems ist in Abbildung 6 dargestellt. Ein beliebiger Computer kann über ein Ethernet-Kabel an das Messsystem angeschlossen werden. Auf dem Computer muss einmalig die entwickelte Steuerungssoftware installiert werden. Die Verbindung mit dem Messsystem wird automatisch hergestellt. Zur komfortablen Bedienung der Prüfeinrichtung wird eine grafische Benutzeroberfläche verwendet. Die grafische Benutzeroberfläche dient zur Eingabe der Prüfparameter und zur Ausgabe des Prüfstatus.

Das Leistungsmessgerät *LMG671* der Firma ZES-Zimmer wird auf dem Messsystem platziert. Die Messleitungen und der Ethernet-Anschluss werden an das Messsystem angeschlossen.



Abbildung 6: Gesamtaufbau des Messsystems

## 2.2 Erkenntnisse und Erweiterung der Hardware

Bei der Entwicklung und den anschließenden Tests des Messsystems wurden diverse Erkenntnisse gesammelt, die nachfolgend erläutert werden. Abbildung 7 zeigt den schematischen Aufbau der Prüfung.

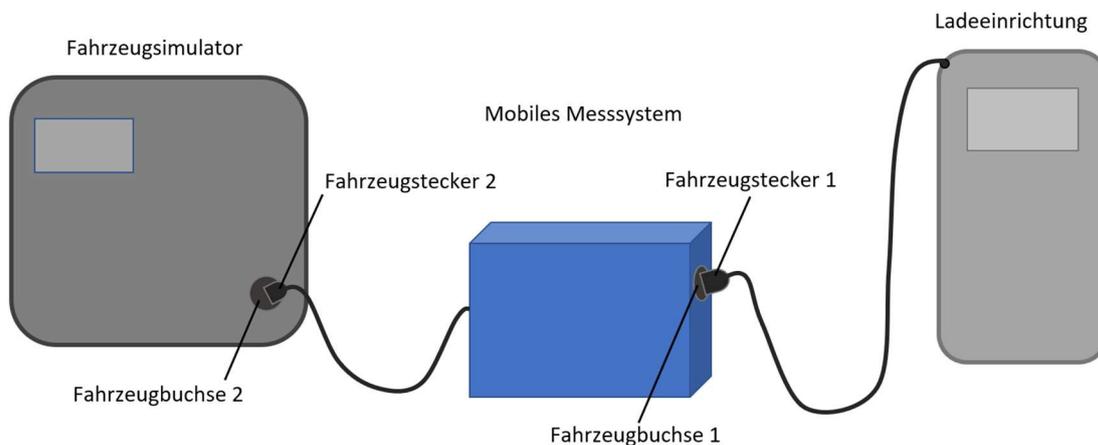


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Prüfaufbaus

Bei der Entwicklung des Messsystems wurde der Fokus auf die normkonforme Erfassung der Referenzenergie im Übergabepunkt zwischen der Ladeeinrichtung und dem Messsystem gelegt. Somit wurde bei der Entwicklung das physikalische Verhalten des Prüfsteckers (Fahrzeugstecker 1) und der Steckerbuchse (Fahrzeugbuchse 1) genauer betrachtet. Der Energieübergabepunkt ist der Punkt zwischen Fahrzeugbuchse 1 und Fahrzeugstecker 1, an dem die Energie bei einem realen Ladevorgang von der Ladesäule an das Fahrzeug übergeben wird. Somit werden während des Ladevorgangs die Spannungs- und Temperaturverläufe an dieser Stelle erfasst und in dem Rohdatenprotokoll gespeichert. Während der Entwicklung des Messsystems wurde der

Spannungsfall, welcher zwischen Fahrzeugbuchse 1 und Fahrzeugbuchse 2 auftritt zunächst nicht betrachtet, da diese Energieverluste auf die Messung der Referenzenergie keinen Einfluss haben. Im Gesamtaufbau müssen diese Energieverluste jedoch betrachtet werden, da folglich nicht die gesamte Energie, die in die Fahrzeugbuchse 1 eingespeist wird, an dem Autosimulator (Fahrzeugbuchse 2) ankommt. Um einen Gesamteindruck über das Verhalten des Messsystem zu erhalten und den genauen Spannungsfall zwischen Fahrzeugbuchse 1 und Fahrzeugstecker 2 festzustellen, wird zusätzlich die Spannung am Fahrzeugstecker 2 gemessen. Für die Messung dieser Spannung werden die Messleitungen (*HV Measuring DC+* und *HV Measuring DC-*), die in dem Fahrzeugstecker 2 verbaut sind, verwendet. Somit wird der Spannungsfall im gesamten Prüfaufbau überwacht.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Temperaturentwicklung im gesamten Prüfaufbau. Die höchste Erwärmung ist an den Anschlussstellen zu erwarten. Dabei ist zu beachten, dass an den Fahrzeugsteckern 1 und 2 eine Temperatur von 90 °C nicht überschritten werden darf. Die Temperaturentwicklung an Fahrzeugstecker 1 wird von der Ladeeinrichtung überwacht. Falls die Temperatur an Fahrzeugstecker 1 einen kritischen Wert erreicht, wird der Stromfluss von der Ladeeinrichtung reduziert. Somit wird ein unkontrollierter Anstieg der Temperatur verhindert. Die Temperatur der Fahrzeugbuchse 1 und des gesamten Messsystems wird von der internen Steuerung des Messsystem überwacht. Die Steuerung schaltet den Ladevorgang durch Unterbrechung der Kommunikationskontakte ab, wenn die Temperatur einen kritischen Wert erreicht.

Die Ladeleitung wird beim Ladevorgang mithilfe eines Kühlsystems gekühlt. Fahrzeugbuchse 2 des Autosimulators wird von der Steuerung des Autosimulators überwacht. Der Hersteller gibt eine Kurve für die Temperaturentwicklung am Fahrzeugstecker 2 an. Laut diesen Angaben steigt die Temperatur am Fahrzeugstecker bei einem maximalen Strom von 500 A innerhalb von zehn Minuten von 23 °C auf die maximal zulässige Temperatur von 90 °C an. Dies muss im Zusammenhang mit der Prüfdauer betrachtet werden. Die Dauer einer Prüfung hängt von den Eigenschaften der Ladestation ab, überschreitet diese Zeit aber nicht.

Bei einem idealen Aufbau kann vorausgesetzt werden, dass die Ladeeinrichtung die Temperatur des Fahrzeugsteckers 1 kontrolliert und somit die Energiezufuhr regelt. Innerhalb des Messsystems findet ein Spannungsfall statt, somit hat der Fahrzeugstecker 2 eine niedrigere Temperatur als der Fahrzeugstecker 1. Allerdings kann dies bei einem realen Aufbau mit einem beliebigen Autosimulator und einer beliebigen Ladeeinrichtung nicht vorausgesetzt werden. Die Verwendung eines Autosimulators mit einer älteren Fahrzeugbuchse kann zu einem hohen Übergangswiderstand führen. Somit kann an Fahrzeugstecker 2 eine wesentlich höhere Erwärmung als an Fahrzeugstecker 1 auftreten. Weiterhin kann der Fahrzeugstecker 1 der Ladeeinrichtung für höhere Temperaturen ausgelegt sein oder aus einem anderen, temperaturbeständigeren Material hergestellt werden. Dies kann zum Überhitzen des Fahrzeugsteckers 2 führen. Um das zu vermeiden, wird die Temperatur an Fahrzeugstecker 2 derzeit mit einem zusätzlichen Temperaturmessschreiber überwacht. Infolgedessen muss der Prüfvorgang entweder auf die maximale Prüfdauer oder auf die maximale Temperatur des Fahrzeugsteckers 2 begrenzt werden. Der Fahrzeugstecker 2 besitzt eine CAN-BUS Schnittstelle, die unter anderem Informationen über die Temperatur des Fahrzeugsteckers liefert. Damit keine zusätzliche Messtechnik innerhalb des Prüfaufbaus benötigt wird, kann zukünftig das CAN-Protokoll von Fahrzeugstecker 2 ausgewertet und die Temperatur überwacht werden. Somit wird die Temperatur in dem gesamten Prüfaufbau kontrolliert.

## 2.3 Konzept der Software

Die Software des Messsystems ist ein wesentlicher Bestandteil der Prüfeinrichtung. Eine Reihe an Anforderungen wurden zu Beginn des Projekts definiert, um einen sicheren und komfortablen Betrieb der Anlage zu realisieren. Die Software des Messsystems muss die automatische Konfiguration und Abfrage des Leistungsmessgerätes sicherstellen, um die Prüfung automatisiert durchführen zu können. Weiterhin müssen mehrere Schütze und Relais bei der Prüfung geschaltet werden. Die Messdaten müssen automatisch in einem geeigneten Format gespeichert und einer Prüfung eindeutig zugeordnet werden können. Zusätzlich muss eine grafische Benutzeroberfläche erstellt werden, um die komfortable Bedienung des Messsystems zu gewährleisten. Diese und weitere Anforderungen wurden bei der Entwicklung der Software für das Messsystem berücksichtigt und umgesetzt.

Ein beliebiger Computer mit dem entsprechenden Programm kann über ein Ethernet-Kabel an das Messsystem angeschlossen werden. Dieser Rechner wird für die Steuerung des Messsystems und zur Speicherung der Prüfdaten verwendet. Die Kommunikation zwischen allen Komponenten der Prüfeinrichtung erfolgt über die Ethernet-Schnittstellen der einzelnen Komponenten. Um die Kommunikation zwischen dem Computer und den weiteren Komponenten des Messsystems zu realisieren, wird ein selbstentwickeltes DHCP-Servermodul eingesetzt. Das DHCP-Servermodul fragt automatisch die Messdaten vom Leistungsmessgerät sowie die Temperturmesswerte von der Steuerung ab und übergibt diese an den angeschlossenen Computer. Die Rohdaten werden zunächst in Form einer Excel-Datei gespeichert.

Wie in *Kapitel 2.1 Konzept der Hardware und Messverfahren* erläutert, wird ein Stromschienensystem mit Stromschienenlaschen verwendet. Der Strommessbereich sowie der zu prüfende Steckertyp sind von der Position der Stromschienenlaschen abhängig. Das Stromschienensystem ist mit Sensoren ausgestattet, welche abhängig von den Positionen der Stromschienenlaschen ein Signal an die Steuerung übergeben. Weiterhin werden die Endschalter der Türen mit der Steuerung überwacht. Alle Signale werden mithilfe der Steuerungssoftware analysiert. Im Fehlerfall werden die Kommunikationsleitungen der Ladestation unterbrochen. Die Unterbrechung der Kommunikationsleitungen zwischen der Ladeeinrichtung und dem Autosimulator führt zur automatischen Abschaltung der Ladeeinrichtung.

Zur komfortablen Bedienung des Messsystem wird eine grafische Benutzeroberfläche benötigt. Die grafische Benutzeroberfläche ermöglicht die Eingabe der Prüfparameter und zeigt den Status der Prüfung sowie die Prüfergebnisse an. Weiterhin besteht die Möglichkeit den Speicherort des Prüfprotokolls sowie des Rohdatenprotokolls zu wählen. Prüfprotokoll und Rohdatenprotokoll enthalten die Messergebnisse sowie die Rohdaten der Prüfung. Die Speicherung der Rohdaten wird zur Validierung der Prüfungsergebnisse verwendet. Das Rohdatenprotokoll enthält die Informationen über die Prüfung, Merkmale der zu prüfenden Ladeeinrichtung sowie die Messdaten der Prüfung. Somit kann jedes Rohdatenprotokoll der zugehörigen Prüfung eindeutig zugeordnet werden. Als Messdaten werden während der Prüfung Strom, Spannung und alle relevanten Temperaturen aufgenommen und gespeichert. Die Aktualisierung erfolgt dabei jede Sekunde. Aus den Rohdaten wird automatisch ein Prüfprotokoll erstellt, welches die Rahmenbedingungen und die Ergebnisse der Prüfung beinhaltet.

Die gesamte Software wurde in der Programmiersprache *Python* erstellt und ist objektorientiert aufgebaut. Durch die umfangreiche Software werden alle Anforderungen vollumfänglich erfüllt.

## 3 Einflussfaktoren auf die Prüfung

Für die Durchführung der Prüfung müssen die Einflussfaktoren sowie die Betriebsbedingungen des Messsystems genauer betrachtet werden. Das Missachten der Betriebsbedingungen und der Einflussfaktoren kann zur Verfälschung der Messergebnisse führen. Die Betriebsbedingungen der Hardwarekomponenten des Messsystems sind klar definiert und können den Datenblättern der Hardwarekomponenten entnommen werden. Die Einflussfaktoren der Umgebung können jedoch unterschiedlich sein. Es muss zwischen Prüfungen unter Laborbedingungen und Prüfungen im Feld unterschieden werden. Dabei sind die Laborbedingungen fest definiert und können über den gesamten Prüfzeitraum nachgewiesen werden. Bei der Prüfung im Feld werden Messsystem, Ladeeinrichtung und somit die gesamte Prüfung wesentlich beeinflusst. Außerhalb der Laborumgebung können die Umgebungsbedingungen detektiert, aber nicht korrigiert werden. Somit ist die Prüfung im Feld wesentlich komplizierter und fehleranfälliger als die Prüfung unter Laborbedingungen.

### 3.1 Umgebungsbedingungen der Hardwarekomponenten laut MessEV

Die *MessEV* schreibt vor, welche Umgebungsbedingungen bei Messgeräten beachtet werden müssen. Die klimatischen, mechanischen und elektromagnetischen Umgebungsbedingungen sowie die Bedingungen des Einsatzes sind in *Abschnitt 1.2, MessEV Anlage 2* erläutert.

Diese Umgebungsbedingungen können die Genauigkeit oder Funktion der Geräte beeinflussen, und sind somit vom Hersteller anzugeben.

Bei der Entwicklung des mobilen Messsystems müssen die Betriebsbedingungen der Hardwarekomponenten berücksichtigt werden. Die relevanten Hardwarekomponenten sind hierbei das verwendete Messgerät mit den dazugehörigen Stromsensoren sowie die eingesetzte Steuerung mit den dazugehörigen Erweiterungsmodulen. Anhand dieser Komponenten können die zulässigen Umgebungsbedingungen des gesamten Messsystems abgeleitet werden.

Die klimatischen Umgebungsbedingungen werden durch die Angabe der zulässigen Temperatur sowie der zulässigen Umgebungsfeuchte berücksichtigt. Das für die Prüfung ausgewählte Messgerät *LMG671* kann bei einer Umgebungstemperatur von 5 °C bis 40 °C eingesetzt werden. Die relative Luftfeuchte darf bei Temperaturen bis 31 °C nicht mehr als 80 % betragen. Bei Temperaturen bis 40 °C nimmt die zulässige Luftfeuchte linear bis auf 50 % ab.

Die Stromsensoren *PCT600* und *PCT200* dürfen bei Temperaturen zwischen +5 °C und +40 °C eingesetzt werden. Die zulässige Umgebungsfeuchte der Stromsensoren entspricht der zulässigen Luftfeuchte des Messgerätes.

Die zulässige Betriebstemperatur der zentralen Steuerung liegt zwischen -40 °C und +55 °C. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit (bei 40 °C) beträgt 93 %. Die Betriebsbedingungen des digitalen Steuerungsmodul stimmen mit den Betriebsbedingungen der zentralen Steuerung überein. Bei dem analogen Steuerungsmodul muss beachtet werden, dass die zulässige Betriebstemperatur zwischen -30 °C und +55 °C liegt.

Für die Messung der Temperatur werden Temperatursensoren mit entsprechenden Temperaturmessumformern an verschiedenen Stellen eingesetzt. Die Temperaturmessumformer können bei einer Betriebstemperatur zwischen -40 °C und 85 °C sowie bei einer Umgebungsfeuchte von kleiner gleich 95 % eingesetzt werden.

Somit liegt für das mobile Messsystem die zulässige Betriebstemperatur zwischen 5 °C und 40 °C und die zulässige relative Luftfeuchte unter 80 % bei Temperaturen bis 31 °C. Bei Temperaturen bis 40°C nimmt die zulässige Luftfeuchte linear bis auf 50 % ab.

In der *MessEV* werden ebenso die mechanischen Umgebungsbedingungen wie Schwingungen und Erschütterungen genannt. Bei der Prüfung unter Laborbedingungen können die mechanischen Einflüsse auf die Prüfung minimal gehalten werden. Bei der Prüfung im Feld hingegen können die mechanischen Umgebungsbedingungen einen größeren Einfluss auf das mobile Messsystem haben. In diesem Fall kann die Messung beispielsweise durch vorbeifahrende Fahrzeuge oder durch von benachbarten Anlagen herbeigeführte Erschütterungen beeinflusst werden. Somit müssen diese bei der Prüfung im Feld genauer betrachtet werden.

Bei der Auslegung des mobilen Messsystems muss ebenso die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) berücksichtigt werden. Hierbei muss zwischen internen und externen elektromagnetischen Störungen unterschieden werden. Interne Störungen entstehen durch die gegenseitige Beeinflussung der intern verbauten Hardwarekomponenten wie Sensoren zur Strommessung, Steuerungskomponenten oder Leitungen. Externe Störungen werden durch elektromagnetische Felder anderer, sich in der Nähe befindlicher, Gerätschaften verursacht.

Bei der Konstruktion des mobilen Messsystems müssen die internen elektromagnetischen Störungen so gering wie möglich gehalten werden, um den Prüfablauf sowie die Ergebnisse der Prüfungen nicht zu beeinflussen. Um die gegenseitige Beeinflussung der Hardwarekomponenten zu begrenzen, muss eine räumliche Trennung der Komponenten erfolgen. Bei der Verdrahtung des Messsystems muss auf die richtige Anordnung der Signalleitungen und Lastkabel geachtet werden. Falls notwendig, können die Leitungen mit einer entsprechenden Abschirmung ausgestattet werden. Die Störfestigkeit einzelner Hardwarekomponenten ist gemäß der entsprechenden Datenblättern zu beachten. Die Sensoren und die Steuerungskomponenten müssen gemäß der vorgeschriebenen Einbaulage montiert werden.

### 3.2 Einfluss der Umgebungsbedingungen auf die Prüfung

Neben den Umgebungsbedingungen der *MessEV*, die die Richtigkeit der Energiemessung beeinflussen können, gibt es eine Reihe von Einflussfaktoren, die den Prüfling beeinflussen und somit Einfluss auf das Prüfergebnis haben können.

Hierbei sind besonders die klimatischen Faktoren zu beachten. Die Erwärmung bzw. Abkühlung der gesamten Ladeeinrichtung inklusive Verkabelung und Leitung kann zu einem Wärmeaustausch führen. Bei der Prüfung unter Laborbedingungen beträgt die Umgebungstemperatur  $23,0\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$  und die Umgebungsfeuchte  $50,0\% \pm 4\%$ . Laut *DIN EN ISO/IEC 17025 Kapitel 6.3.3* müssen die Laborbedingungen überwacht und aufgezeichnet werden. Dadurch ist die Erwärmung bzw. Abkühlung der Leitung unter Laborbedingungen eingeschränkt. Im Gegensatz dazu, kann der Wärmeaustausch im Feld einen wesentlich höheren Einfluss haben. Durch die höhere Temperaturdifferenz zwischen dem Prüfling und der nicht klimatisierten Umgebung findet während des Ladevorgangs ein höherer Wärmeaustausch statt. Erwärmt sich das Kabel des Prüflings während des Ladevorgangs, können Wind und niedrigere Umgebungstemperaturen die Abkühlung des Kabels beschleunigen. Darüber hinaus kann die Leitung durch Berühren von kalten

Oberflächen oder Wasser gekühlt werden. Neben der hohen Umgebungstemperatur im Feld kann auch die Sonneneinstrahlung zu einer Erwärmung der Leitung und der Ladeeinrichtung führen.

Daraus folgt, dass die klimatischen Umgebungsbedingungen während der Prüfung im Feld durch den Wärmeaustausch einen größeren Einfluss auf die Prüfergebnisse haben können. Die Prüfungen unter Laborbedingungen hingegen sind davon kaum betroffen.

Um die klimatischen Umgebungsbedingungen während der Prüfung zu berücksichtigen, wird die Temperatur an allen relevanten Stellen während der Prüfung überwacht. Während der Prüfung werden beispielsweise die Umgebungstemperatur und die Temperatur an der Energieübergabestelle erfasst. Zusätzlich wird die Innenraumtemperatur des Messsystems überwacht, um ein Überschreiten der Betriebstemperatur der Hardwarekomponenten während der Prüfung zu detektieren. Bei Bedarf kann während der Prüfung auch die Temperatur der Leitung überwacht werden. Die Möglichkeit der Temperaturerfassung an allen relevanten Stellen wurde bei der Konstruktion des mobilen Messsystems berücksichtigt.

Bei der Auslegung des Messsystems wurde ebenso berücksichtigt, dass beim Transport Erschütterungen auftreten können. Starke Erschütterungen können zu einer Beschädigung der Messtechnik und zum Lösen interner Verbindungen führen. Daher müssen Kabel, Stromschienen sowie die Sensoren und andere Komponenten des Messsystems entsprechend befestigt werden. Um das Messgerät *LMG671* von ZES-Zimmer bei dem Transport vor Erschütterungen zu schützen, wird das Messgerät nicht fest in das Messsystem eingebaut, sondern kann in der mitgelieferten Verpackung sicher transportiert werden.

Im Gegensatz zu den Prüfungen unter Laborbedingungen gibt es eine Reihe weiterer Einflussfaktoren, die bei den Prüfungen im Feld Einfluss auf die Prüfung haben können. Staub kann sich beispielsweise ebenfalls auf die Messtechnik auswirken. In Verbindung mit der Umgebungsfeuchte kann Staub zu Kriechströmen führen, was die Messtechnik beschädigen kann. Aufgrund der zusätzlichen Einflussfaktoren durch die Umgebung ist das Messsystem nur bedingt für die Feldmessung einsetzbar.

### 3.3 Einsatzbedingungen des mobilen Messsystems

Aufgrund der Betriebsbedingungen der Hardwarekomponenten kann das Messsystem nur unter Berücksichtigung der im Kapitel 3.1 erläuterten Rahmenbedingungen eingesetzt werden. Der Einsatz des Messsystems unter Laborbedingungen garantiert einen Normalbetrieb aller Hardwarekomponenten. Darüber hinaus können die Messergebnisse der Prüfung unter Laborbedingungen nicht durch äußerliche Einflüsse manipuliert werden. Mit der Dokumentation der Umgebungsbedingungen (Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit) und der relevanten Temperaturen innerhalb des Messsystems können die Prüfbedingungen über gesamte Prüfdauer nachgewiesen werden.

Beim Einsatz des Messsystems im Feld müssen Faktoren, wie Umgebungstemperatur, Luftfeuchte, Staub, Wärmetausch etc. berücksichtigt werden. Die Messtechnik wie Leistungsmessgeräte oder Messsensoren sind im Regelfall nicht für den Einsatz im Feld konstruiert. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass beim Einsatz des mobilen Messsystems bei Feldprüfungen die externen elektromagnetischen Störungen wesentlich höher sein können als beim Einsatz unter Laborbedingungen. Werden die Prüfungen unter Laborbedingungen durchgeführt, kann die Umgebung auf elektromagnetische Störungen untersucht und somit die Prüfung unter

kontrollierbaren Bedingungen durchgeführt werden. Demnach sind für die Prüfung im Feld zusätzliche Maßnahmen erforderlich, um das Messsystem vor äußeren Einflüssen zu schützen. Eine Abschirmung gegen Staub muss vorgesehen werden. Weiterhin muss die Umgebungstemperatur zwischen 5 und 40 °C liegen.

Unter Berücksichtigung dieser Punkte ist eine Prüfung sowohl unter Laborbedingungen als auch im Feld möglich. Allerdings ist eine Prüfung im Feld aufgrund der genannten Anforderungen sehr aufwändig.

## 4 Verifizierung der Prüfeinrichtung und Messunsicherheitsbetrachtung

Das Messsystem muss auf seine Funktion und seine Messgenauigkeit untersucht werden. Zur Verifizierung des Gesamtsystems müssen sowohl die einzelnen Softwaremodule getestet als auch das Verhalten des gesamten Messsystems untersucht werden.

Mithilfe des Messsystems wird eine Referenzmessung durchgeführt, mit der die Messabweichung der Ladeeinrichtung ermittelt wird. Dabei muss berücksichtigt werden, dass das Messsystem ebenso eine gewisse Messabweichung aufweist.

Für die Prüfung der Energiemessung der Ladeeinrichtungen wird eine hohe Genauigkeit des Messsystems vorausgesetzt. Das Leistungsmessgerät sowie die Stromsensoren werden zum Nachweis der Messgenauigkeit jährlich kalibriert. Für die Messunsicherheitsbetrachtung des Messsystems können entweder die Daten der Kalibrierung herangezogen oder eine Berechnung mithilfe der vom Hersteller angegebenen Messunsicherheiten der einzelnen Komponenten durchgeführt werden. Weiterhin werden bei der Messunsicherheitsbetrachtung alle Einflussgrößen, welche die Messergebnisse der Energie verfälschen können, berücksichtigt. Die Berechnung der Messunsicherheit auf Basis der Angaben der Hersteller stellt eine kritischere Betrachtungsweise dar und stellt sicher, dass die reale Messunsicherheit stets unter dem berechneten Wert liegt.

Für die Ermittlung der Messunsicherheit des gesamten Systems müssen die Standardabweichungen der einzelnen Komponenten definiert werden. Die Energie setzt sich aus Spannung, Strom, Zeit und Phasenverschiebung zusammen, somit gilt  $E=U*I*\cos(\varphi)*t$  [ $V*A*s$ ]. Aufgrund der Gleichspannung ist  $\cos(\varphi)=1$ . Daraus folgt, dass die Modelgleichung der Energiemessung durch  $\delta E = \delta P + \delta t = \delta U + \delta I + \delta t$  definiert ist. Dabei sind  $\delta U$  die Unsicherheit der Spannungsmessung,  $\delta I$  die Unsicherheit der Strommessung und  $\delta t$  die Unsicherheit der Zeitmessung. Die Einflüsse auf die Unsicherheiten der Spannungs-, Strom- und Zeitmessung werden nachfolgend genauer betrachtet.

Zunächst wird die Unsicherheit der Spannung betrachtet. Die Spannung wird möglichst nah am Energieübergabepunkt gemessen. Die Messleitung der Spannung wird direkt an das Leistungsmessgerät *LMG671* angeschlossen. Somit setzt sich die Unsicherheit der Spannungsmessung aus der Unsicherheit des Leistungsmessgeräts ( $\delta U_{LMG671}$ ), der Unsicherheit der Messleitung ( $\delta U_{Messleitung}$ ), der Unsicherheit der Leitung zwischen dem Energieübergabepunkt und dem Messpunkt ( $\delta U_{Messpunkt}$ ) und der Unsicherheit durch thermische Einflüsse des Systems ( $\delta U_{\theta}$ ) zusammen. Die Modelgleichung der Unsicherheit der Spannung lautet:  $\delta U = \delta U_{LMG671} + \delta U_{Messleitung} + \delta U_{Messpunkt} + \delta U_{\theta}$ .

Der Spannungsmessbereich des Messsystems liegt zwischen 2 und 1000 V. Die Unsicherheit des Leistungsmessgeräts *LMG671* für die Spannungsmessung ist vom Hersteller wie folgt definiert:  $\pm(0,02 \% * \text{Messwert} + 0,09 \% * \text{Messbereichsendwert}) = \pm(0,02 \% + 0,09 \% * \text{Messbereichsendwert} / \text{Messwert})$ . Dabei entspricht der Messbereichsendwert dem Spannungsmessbereich. Die möglichen Spannungsmessbereiche sind 3, 6, 12,5, 25, 60, 130, 250, 400, 600 und 1000 V. Um den maximalen Fehler festzustellen, muss jeder Spannungsmessbereich des Leistungsmessgeräts betrachtet werden. Die höchste Messunsicherheit tritt bei der Messung einer Spannung von 25 V im Messbereich 60 V auf. Der Fehler beträgt dabei  $\pm(0,02 \% + 0,09 \% * 60 \text{ V} / 25 \text{ V}) = \pm 0,236 \%$ .

Ein weiterer Fehler kann aufgrund der Verbindungsleitung zwischen dem Eingang des Leistungsmessgeräts und dem Spannungsmesspunkt auftreten. Zur Spannungsmessung wird eine spezielle Sicherheitsverbindungsleitung der Firma ZES-Zimmer mit der Bezeichnung *LMG-Z308U* verwendet. Diese besitzt eine normierte Länge von 1,5 m. Die Sicherheitsverbindungsleitung ist so ausgelegt, dass die Messunsicherheit minimiert wird. Der Widerstand der Leitung liegt im Milliohm-Bereich. Laut Angaben des Herstellers beträgt die Eingangsimpedanz des Leistungsmessgeräts 4.59 MΩ und 3 pF. Im Vergleich zum Eingangswiderstand des Messgeräts für die Spannungsmessung ist der Widerstand der Verbindungsleitung zwischen dem Spannungsmesspunkt und dem Messgeräteanschluss vernachlässigbar gering. Um diese Unsicherheit dennoch in der Rechnung zu berücksichtigen, wird ein Fehler ( $\delta U_{\text{Messleitung}}$ ) von 0,0001 % angenommen.

Analog dazu kann der Fehler der Spannungsmessung im Spannungsmesspunkt ( $\delta U_{\text{Messpunkt}}$ ) betrachtet werden. Die Spannung wird nicht exakt im Energieübergabepunkt, sondern außerhalb der Fahrzeugbuchse gemessen. Der Abstand zwischen dem Spannungsmesspunkt und dem Energieübergabepunkt beträgt 0,1 m. Somit liegt der Widerstand der Leitung im mΩ-Bereich, was im Vergleich zur Eingangsimpedanz des Messgeräts vernachlässigbar gering ist. Um thermische Einflüsse sowie Übergangswiderstände zu berücksichtigen, wird ein Fehler ( $\delta U_{\text{Messpunkt}}$ ) von 0,0001 % abgeschätzt.

Die Veränderung der Umgebungstemperatur hat ebenso einen Einfluss auf die Genauigkeit des Leistungsmessgeräts. Das Messsystem ist so konstruiert, dass sich das Leistungsmessgerät außerhalb des Messsystems befindet. Unter der Voraussetzung, dass die Prüfung unter Laborbedingungen durchgeführt und das Messgerät nicht in das Messsystem eingebaut wird, hat eine Veränderung der Innenraumtemperatur des Messsystems keine Auswirkung auf die Genauigkeit des Leistungsmessgeräts. Der Fehler ( $\delta U_{\theta}$ ) kann als Null angenommen werden. Falls die Prüfung im Feld durchgeführt wird, muss der umgebungstemperaturabhängige Fehler zusätzlich berücksichtigt werden. Dieser ist vom Hersteller als  $\pm(0,01 \% \text{ vom Messwert})/K$  definiert.

Um die Messung des Stroms für einen Messbereich zwischen 5 mA und 600 A zu realisieren, wird die Strommessung kaskadiert. Ströme bis 32 A werden direkt mit dem Leistungsmessgerät gemessen. Für Ströme größer 32 A bis 200 A wird der Sensor *PTC200* und für Ströme größer 200 A bis 600 A wird der Stromsensor *PTC600* verwendet. Aus diesem Grund muss die Messunsicherheitsbetrachtung in drei unterschiedlichen Bereichen separat durchgeführt werden.

Zunächst wird die Messung der Ströme bis 32 A betrachtet. Die Unsicherheit setzt sich aus der Unsicherheit der Strommessung mit dem Leistungsmessgerät ( $\delta_{\text{LMG671}}$ ), der Unsicherheit der Messleitung ( $\delta_{\text{Kabel\_LMG671}}$ ) und der Messunsicherheit durch die Temperatureinflüsse ( $\delta_{\theta\_LMG671}$ ) zusammen. Die Modelgleichung der Messunsicherheit der Strommessung für den Messbereich 5 mA und 32 A lautet:  $\delta_{32} = \delta_{\text{LMG671}} + \delta_{\text{Kabel\_LMG671}} + \delta_{\theta\_LMG671}$ .

Der Messfehler der direkten Strommessung ist vom Messbereich des Messgeräts abhängig. Somit muss der Strom, der direkt mit dem Leistungsmessgerät gemessen wird, für die Berechnung der Messunsicherheit in zwei Bereiche aufgeteilt werden. Laut den Herstellerangaben ist die Unsicherheit für den Messbereich zwischen 5 mA und 5 A wie folgt definiert:  $\pm(0,02 \% + 0,01 \% \text{ Messbereichsendwert/Messwert})$ . Die Unsicherheit für die Messung des Stromes zwischen 5 A und 32 A beträgt:  $\pm(0,02 \% + 0,01 \% \text{ Messbereichsendwert/Messwert} + 50 \mu\text{A/A} * I_{\text{trms}})$ . Dabei ist  $I_{\text{trms}}$  der Effektivwert des Stroms. Der Messbereichsendwert entspricht dem Strommessbereich. Mögliche Strommessbereiche sind 0.005, 0.01, 0.02, 0.04, 0.08, 0.15, 0.3, 0.6, 1.2, 2.5, 5, 10, 20 und 32 A. Die höchste Messunsicherheit tritt bei einer Messung von 5 A mit dem Messbereich bis 10 A auf und beträgt  $\pm(0,02 \% + 0,01 \% * 10 \text{ A}/5 \text{ A} + 50 \mu\text{A/A} * 5 \text{ A}) = \pm 0,04025 \%$ .

Für die direkte Strommessung werden Sicherheitsverbindungsleitungen *LMG-Z308I* mit einer Länge von 1,5 m eingesetzt. Der Messfehler ( $\delta_{\text{Kabel\_LMG671}}$ ), der durch die Verbindungsleitung verursacht wird, kann aufgrund der geringen Impedanz der Verbindungsleitung bei der Strommessung vernachlässigt werden.

Die von der Temperatur verursachte Messunsicherheit ( $\delta_{\vartheta\_LMG671}$ ) des Leistungsmessgeräts beträgt  $\pm(0,01 \% \text{ vom Messwert})/K$ . Da sich das Messgerät außerhalb des Messsystems befindet, kann die Änderung der Umgebungstemperatur beim Betrieb der Prüfeinrichtung unter Laborbedingungen und die dazugehörige Messunsicherheit vernachlässigt werden. Im Falle des Feldbetriebs muss dieser Fehler zusätzlich berücksichtigt werden.

Die Messunsicherheit der Strommessung mit den Sensoren setzt sich aus der Unsicherheit des Leistungsmessgeräts ( $\delta_{\text{LMG671\_PCT200}}/\delta_{\text{LMG671\_PCT600}}$ ) und der Unsicherheit des Sensors ( $\delta_{\text{PCT200}}/\delta_{\text{PCT600}}$ ) zusammen. Zusätzlich müssen die durch die Montage des Sensors ( $\delta_{\text{Orth\_PCT200}}/\delta_{\text{Orth\_PCT600}}$ ) und durch die Veränderung der Umgebungstemperatur des Messgeräts ( $\delta_{\vartheta\_LMG671}$ ) entstehenden Unsicherheiten betrachtet werden.

Die Messunsicherheit durch die Anschlussleitung ( $\delta_{\text{Kabel\_PCT200}}/\delta_{\text{Kabel\_PCT600}}$ ) hat bei der Strommessung eine vernachlässigbare Wirkung und kann daher auf null gesetzt werden. Ebenso wird durch die orthogonale Durchführung der Stromleitung durch die Sensoren der Positionierungsfehler ( $\delta_{\text{Orth\_PCT200}}/\delta_{\text{Orth\_PCT600}}$ ) auf null gesetzt. Die Modelgleichungen für die Messunsicherheit der Strommessung mittels Sensoren lauten:  $\delta_{600} = \delta_{\text{LMG671\_PCT600}} + \delta_{\text{PCT600}} + \delta_{\text{Kabel\_PCT600}} + \delta_{\text{Orth\_PCT600}} + \delta_{\vartheta\_LMG671}$  und  $\delta_{200} = \delta_{\text{LMG671\_PCT200}} + \delta_{\text{PCT200}} + \delta_{\text{Kabel\_PCT200}} + \delta_{\text{Orth\_PCT200}} + \delta_{\vartheta\_LMG671}$ .

Der Strommessfehler der Sensoren *PCT200* und *PCT600* und dem Leistungsmessgerät *LMG671* wird nach Angaben des Herstellers wie folgt berechnet:  $\pm(0,02 \% * \text{Nominalwert} + 0,1 \% * \text{Spitzenwert}) = \pm(0,02 \% * + 0,1 \% * \text{Spitzenwert} / \text{Nominalwert})$ . Nominalwert und Spitzenwert werden aus dem Datenblatt des jeweiligen Sensors entnommen. Der maximale Fehler ( $\delta_{\text{LMG671\_PCT600}}$ ) für den *PCT600*-Sensor beträgt dabei  $\delta_{\text{LMG671\_PCT600}} = 0,02 \% + 0,1 \% * (2812,5 \text{ A} / 600 \text{ A}) = 0,48875 \%$  und tritt bei der Messung des maximalen Stroms von 600 A auf. Der maximale Messfehler für den *PCT200*-Sensor tritt bei der Messung des maximalen Stroms von 200 A auf und beträgt  $\delta_{\text{LMG671\_PCT200}} = 0,02 \% + 0,1 \% * (937,7 \text{ A} / 200 \text{ A}) = 0,48885 \%$ .

Die Messfehler der Sensoren müssen separat betrachtet werden. Der Fehler des Stromsensors setzt sich aus dem temperaturverursachten Offsetfehler ( $\delta_{\text{PCT200}\vartheta}/\delta_{\text{PCT600}\vartheta}$ ), der Messunsicherheit der DC-Strommessung ( $\delta_{\text{PCT200Overall}}/\delta_{\text{PCT600Overall}}$ ) und dem Noise-Fehler ( $\delta_{\text{PCT200Noise}}/\delta_{\text{PCT600Noise}}$ ) zusammen. Somit lauten die Modelgleichungen des sensorabhängigen Fehlers für den *PCT200*-Sensor  $\delta_{\text{PCT200}} = \delta_{\text{PCT200}\vartheta} + \delta_{\text{PCT200Overall}} + \delta_{\text{PCT200Noise}}$  und für den *PCT600*-Sensor  $\delta_{\text{PCT600}} = \delta_{\text{PCT600}\vartheta} + \delta_{\text{PCT600Overall}} + \delta_{\text{PCT600Noise}}$ .

Der Fehler, der durch die Gleichstrommessung entsteht, ist vom Hersteller definiert und beträgt für den *PCT600*-Sensor ( $\delta_{\text{PCT600Overall}}$ ) 0,0013 % und für den *PCT200*-Sensor ( $\delta_{\text{PCT200Overall}}$ ) 0,0022 %. Dieser Fehler beinhaltet den Offsetstrom-Fehler und den Linearitätsfehler der DC-Strommessung.

Weiterhin wird der Noise-Fehler ( $\delta_{\text{PCT200Noise}}/\delta_{\text{PCT600Noise}}$ ) betrachtet, der durch das Rauschen des Stromsignals verursacht wird. Vom Hersteller wird dieser für den *PCT600*-Sensor mit 0,000001 % und für den *PCT200*-Sensor mit 0,000002 % angegeben.

Anschließend muss der temperaturabhängige Fehler des Leistungsmessgeräts für die Strommessung betrachtet werden. Der Messfehler des Leistungsmessgeräts ( $\delta_{\vartheta\_LMG671}$ ), der durch die Veränderung der Umgebungstemperatur entsteht, kann bei der Prüfung unter Laborbedingungen, analog zu dem temperaturabhängigen Messfehler der Spannung ( $\delta U_{\vartheta}$ ), vernachlässigt werden. Im Gegensatz dazu muss der temperaturabhängige Fehler der

Stromsensoren berücksichtigt werden, da die Stromsensoren im Messsystem verbaut sind. Die Spezifikation der Genauigkeit gilt für den Betrieb der Stromsensoren bei 23 °C. Der Temperaturkoeffizient für die Stromsensoren *PCT200* und *PCT600* beträgt laut Angaben des Herstellers  $\pm 0,1 \text{ ppm/K}$ . Die maximale Betriebstemperatur der Sensoren beträgt 40 °C. Dabei wird die Innenraumtemperatur des Messsystem auf 40 °C begrenzt. Somit beträgt die maximale Temperaturdifferenz 17 K und der maximale temperaturabhängige Fehler ( $\delta_{PCT200\text{S}}/\delta_{PCT600\text{S}}$ ) für beide Sensoren  $\pm 1,7 \text{ ppm} = \pm 0,00017 \%$ .

Eine weitere für die Berechnung der Energie relevante Komponente ist die Zeit. Das Leistungsmessgerät *LMG671* misst die Referenzenergie während der Prüfung. Somit muss die Zeitbasis des Leistungsmessgeräts bei der Energiemessung genauer betrachtet werden. Der Hersteller gibt zwei unterschiedliche Zeitbasisfehler an, die bei der Messung berücksichtigt werden müssen. Einerseits wird der Fehler der Zeitbasis ( $\delta t_{\text{Zeitbasis}}$ ) betrachtet. Dieser ist in dem Kapitel 4.9.2 *Zeitbasis der Energiemessung* für Gerätefamilie *LMG600* der Firma ZES-Zimmer erläutert. Dieser Fehler beträgt  $\pm 50 \text{ ppm}$  der gemessenen Zeitspanne. Andererseits muss der Summationsfehler ( $\delta t_{\text{Summation}}$ ) aus dem Kapitel 4.9.2 *Summation der Energie* des Benutzerhandbuchs des Leistungsmessgeräts berücksichtigt werden. Dieser Fehler entsteht durch die Summation über den gesamten Zeitraum der Energiemessung und beträgt maximal  $\pm 50 \text{ ppm}$  des Messwerts. Somit ist der Zeitfehler ( $\delta t$ ) wie folgt definiert:  $\delta t = \delta t_{\text{Zeitbasis}} + \delta t_{\text{Summation}} = 0,005 \% + 0,005 \% = 0,01 \%$ .

Der Gesamtfehler der Energiemessung wird separat für jeden Strommessbereich berechnet. Der jeweilige Fehler wird mithilfe der Software *GUM Workbench* unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren ermittelt. Somit ergeben sich folgende Messunsicherheiten und Modelgleichungen für die Energiemessung:

- Für den Strombereich zwischen 200 A und 600 A lautet die Modelgleichung  $\delta E_{LMG671PCT600} = \delta U + \delta I_{600} + \delta t$ . Die maximale Unsicherheit der Energiemessung beträgt dabei 0,63 %.
- Für den Strombereich zwischen 32 A und 200 A lautet die Modelgleichung  $\delta E_{LMG671PCT200} = \delta U + \delta I_{200} + \delta t$ . Die maximale Unsicherheit der Energiemessung beträgt 0,63 %.
- Für den Strombereich zwischen 5 mA und 32 A lautet die Modelgleichung  $\delta E_{LMG671} = \delta U + \delta I_{32} + \delta t$ . Die maximale Unsicherheit der Energiemessung beträgt 0,28 %.

Die Unsicherheit des Messsystems entspricht somit den Anforderungen an die Messung der Referenzenergie von DC-Ladeeinrichtungen. Die angegebene Messunsicherheit des Messsystems stellt dabei die maximal mögliche Messunsicherheit dar. Bei der Kalibrierung des Leistungsmessgeräts, der Stromsensoren und der Messleitung wurde festgestellt, dass sich der reale Messfehler von diesem theoretischen Wert unterscheidet. Der reale Messfehler ist deutlich kleiner. Somit kann der theoretische Fehler als maximaler Grenzfehler festgelegt und muss dementsprechend bei den Prüfungen berücksichtigt werden.

## 5 Fazit und Ausblick

In diesem Kapitel werden zunächst die Ergebnisse des Projekts vorgestellt. Anschließend werden die im Projekt gesammelten Erkenntnisse aufgeführt. Abschließend erfolgt ein Ausblick auf die zukünftige Verwendung und die Möglichkeiten der Erweiterung des Messsystems.

### 5.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein mobiles Messsystem für die Messung der Referenzenergie an DC-Ladeeinrichtungen entsprechend den gestellten Anforderungen entwickelt und eine Prüfeinrichtung in Form eines Prototyps gebaut. Die Energiemessung erfolgt dabei annähernd am Energieübergabepunkt der Ladeeinrichtung. Durch die automatisierte Durchführung, Überwachung und Auswertung der Prüfung können Ladeeinrichtungen mit geringem Aufwand validiert werden. Durch das Speichern und Auswerten der geforderten Daten wird eine Rückverfolgbarkeit der Prüfergebnisse gesichert. Da das Messsystem für die Validierung der Energiemessung an Ladeeinrichtungen eingesetzt wird, muss die Messgenauigkeit des Messsystems genauer betrachtet werden. Infolgedessen wurde eine Messunsicherheitsbetrachtung durchgeführt. Der maximale Fehler des Messsystems beträgt 0,63 %. Dies stellt eine für die Prüfung ausreichende Genauigkeit dar, muss jedoch bei der Auswertung der Messergebnisse berücksichtigt werden.

Das Messsystem wurde entsprechend der gestellten Anforderungen spezifiziert und demnach für die Prüfung von Ladeeinrichtungen mit Spannungen bis 1000 V DC und Strömen bis 600 A DC ausgelegt. Dies übersteigt die Anforderungen der auf dem Markt verfügbaren Stecksysteme. Die aktuell in dem Messsystem eingebauten Stecksysteme ermöglichen Prüfungen mit Strömen bis zu 500 A (*CCS*) bzw. 200 A (*CHAdeMO*). Aufgrund des modularen Aufbaus des Messsystems können die verbauten Stecksysteme mit geringem Aufwand durch neue Stecksysteme ersetzt werden. Durch die Kaskadierung der Strommessung konnte über den gesamten Messbereich eine ausreichende Messgenauigkeit erreicht werden.

Das Messsystem ermöglicht die normenkonforme Durchführung metrologischer Prüfungen bezogen auf die Energievalidierung von DC-Ladeeinrichtungen. Mithilfe des Messsystems kann die Prüfung nicht nur in den Prüflaboren eines unabhängigen Instituts, sondern auch bei den entsprechenden Laboren des Herstellers der Ladeeinrichtungen vor Ort durchgeführt werden. Das Messsystem automatisiert und vereinfacht den Prüfprozess, erlaubt die Prüfdatenspeicherung und die automatische Auswertung der Prüfung. Auch im Umfeld des dynamischen E-Mobility Marktes ist es aufgrund des modularen Aufbaus des Messsystems möglich, auf veränderte Anforderungen zu reagieren und metrologische Prüfungen von DC-Ladeeinrichtungen durchzuführen.

## 5.2 Ausblick

Die im vorliegenden Bericht erläuterten Entwicklungsschritte und die damit verbundenen Erfahrungen können bei der zukünftigen Entwicklung von Prüfsystemen im Bereich der Elektromobilität verwendet werden. Weiterhin können die gewonnenen Erkenntnisse bei der Durchführung von metrologischen Prüfungen berücksichtigt werden.

Die Entwicklung des Messsystems erfolgte für die Prüfung von Ladeeinrichtungen unter Laborbedingungen. Um künftig auch Prüfungen im Feld durchführen zu können, muss das Messsystem vor äußeren Umwelteinflüssen geschützt werden.

Das Messsystem ist so konstruiert, dass alle Leitungen des Ladekabels inklusive der Kommunikationsleitungen der Ladesäule in das Messsystem geführt werden. Somit können die Kommunikationsleitungen zukünftig an einer zusätzlichen Hardware mit entsprechender Software angeschlossen werden. Das Kommunikationssignal kann somit analysiert und alle relevanten Informationen über den Ladevorgang erfasst werden. Wird ein Autosimulator oder ein reales Auto an das Messsystem angeschlossen, kann durch die Überwachung und Analyse der Kommunikation ein Gesamtbild des Ladevorgangs erstellt werden. Dies ermöglicht eine Überwachung des gesamten Ladevorgangs und eine Analyse der Kommunikation im Fehlerfall. Der Fahrzeugstecker, der die Verbindung zwischen dem Messsystem und dem Autosimulator herstellt, kann ebenso zukünftig über die CAN-Bus Schnittstelle überwacht werden. Unter anderem werden über die CAN-Bus Schnittstelle die Messwerte des im Stecker verbauten Temperatursensors übergeben. Dies ermöglicht eine Temperaturüberwachung des gesamten Messsystems und löst die in Kapitel 2.2 erläuterten Herausforderungen.

Der entwickelte Prototyp kann nun für die Prüfung unterschiedlicher Ladeeinrichtungen eingesetzt werden. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse können zu einer stetigen Entwicklung und Verbesserung des Systems beitragen. Hierbei können die Praxiserfahrungen in den entsprechenden Normengremien eingebracht werden und durch den Austausch mit den Herstellern der Ladeeinrichtungen zu einer Weiterentwicklung der Technologien führen.

## 6 Quellen

- Elektronik Praxis: Hochgenaue Leistungsmessungen:  
<https://www.zes.com/de/Aktuelles/News/AR-UK-praesentiert-LMG640-auf-Advanced-Engineering-UK/Elektronik-Praxis-Hochgenaue-Leistungsmessungen>, Stand 11.04.2014
- DS200ID, Datenblatt des PCT200-Sensors, Stand 07.01.2018
- PCT200 Precision current transducer 200 A, User Manual des PCT200-Sensors, Stand 06.11.2018
- DS600ID, Datenblatt des PCT600-Sensors, Stand 24.06.2020
- PCT600 Precision current transducer 600 A, User Manual des PCT600-Sensors, Stand 19.11.2019
- Gerätefamilie LMG600 Präzisions-Leistungsmessgeräte mit 1 bis 7 Kanälen, Benutzerhandbuch ZES-Zimmer, Stand: 22. 01.2020 V3.009 R52179
- Datenblatt HPC CCS (Combined Charging System) Typ 2-DC-Ladekabel mit gekühltem Fahrzeug-Ladestecker, gekühlter Leitung, Wanddurchführung(PFT), MNR 1068250 – 06, Stand 08.10.2021
- Datenblatt CCS vehicle charging inlet, type 2, MNR 1222642 – 01, Stand 28.10.2020