



Daniel Herbst, BSc

DC-Ladestationen für Elektrofahrzeuge

Ein Beitrag zur Entwicklung einer Prüfmethode und
Prüfeinrichtung zur Erst- und wiederkehrenden Prüfung von
DC-Ladestationen für Elektrofahrzeuge

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Elektrotechnik

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmutzer

Institut für Elektrische Anlagen und Netze

Graz, September 2018

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Graz, am 16.09.2018

Daniel Herbst, BSc

Danksagung

Es sei mir an dieser Stelle erlaubt, meinen aufrichtigen Dank all jenen auszusprechen, die mich für die gesamte Dauer meines Studiums aber auch auf dem Weg der Entstehung der vorliegenden Arbeit begleitet und unterstützt haben.

Als erstes möchte ich mich von ganzem Herzen bei meiner gesamten Familie, bei meiner Partnerin sowie bei meinen Freunden und Studienkollegen bedanken. Danke, dass ihr über die Jahre hindurch an mich geglaubt, mich immer wieder ermutigt und mich in allen Belangen unterstützt habt.

Stellvertretend Danke liebe Mama und lieber Papa
und
Danke mein Schatz

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Schmutzner welcher mich im Zuge der gesamten Arbeit mit Rat und Tat unterstützt hat, immer ein offenes Ohr für mich hatte und für keine Diskussion zu müde war. Er konnte in mir sogar ein gewisses Maß an Interesse und einen Funken Spaß am Normenwesen wecken.

Danke lieber Ernst

Des Weiteren danke ich meinem Studienkollegen Benjamin Jauk der sich in einem unbedachten Moment für mein Thema der Masterarbeit zu interessieren begann, selbst seine Bachelorarbeit im selben Bereich ansetzte und mich folglich durch meine gesamte Arbeit begleitete. Wir verbrachten gemeinsam unzählige Stunden in enger Zusammenarbeit sowie in Debatten über die unterschiedlichsten Normen und Gesetze.

Danke lieber Benni

Auch möchte ich mich bei den eigentlichen Initiatoren dieser Arbeit bedanken, die den Anstoß zum Thema gegeben und unser Institut finanziell tatkräftig unterstützt haben.

Vielen Dank an die Energie Graz GmbH & Co. KG
Vielen Dank an die Energie Steiermark Technik GmbH

Abschließend gilt mein Dank unserem Em.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Lothar Fickert, der mich durch seine gesamtpositive Ausstrahlung sofort für das Thema begeistern konnte.

Danke lieber Lothar

Kurzfassung

Mit der stetig zunehmenden Anzahl der sich im Verkehr befindlichen Elektrofahrzeuge wird die dafür erforderliche Ladeinfrastruktur immerfort erweitert. Die anhaltende Zunahme der Zahl an installierten Ladestationen führt notwendigerweise zur Betrachtung sicherheitsrelevanter Fragen wie z.B. dem Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag. Bezugnehmend auf Gleichstrom-Ladestationen für Elektrofahrzeuge werden diese hinsichtlich ihres Verhaltens im Normalbetrieb sowie im Fehlerfall im Verlauf dieser Arbeit untersucht. Daraus werden mögliche Prüfroutinen sowie ein Konzept für ein Prüfgerät zur Überprüfung der Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag abgeleitet. Ergänzend dazu werden anhand eines Ausführungsbeispiels allgemein gültige Aussagen betreffend die Errichtung von Erdungsanlagen von DC-Ladestationen getroffen. Anknüpfend daran wird die normative Berechnung des Mindestquerschnittes von Schutzerdungsleitern aufgezeigt und für unterschiedliche Erderkonfigurationen praxistauglich dokumentiert.

Schlüsselwörter: DC-Ladestation, Gleichstrom-Ladestation, Elektrofahrzeug, Personenschutz, Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen), Überprüfung, Prüfgerät, Erdungsanlagen, Schrittspannung, Berührungsspannung, Mindestquerschnitt von Schutzerdungsleitern

Abstract

Due to the increasing number of electric vehicles in traffic, the required charging infrastructure is constantly being expanded. The continuing increase in the number of installed charging stations requires the consideration of safety issues such as the protection of people against electric shock. In the course of this work DC charging stations for electric vehicles are investigated regarding to their behaviour during normal operation as well as in the event of a fault. Hence, possible testing routines as well as a concept for a testing device for checking the protective measures for the protection of people against electric shock are derived. In addition, based on an example generally valid statements regarding the construction of earthing systems of DC charging stations are made. The normative calculations of the minimum cross-section of protective earthing conductors for different earth configurations are shown and documented for use in practice.

Keywords: DC EV charging station, direct current charging station, electric vehicle, personal protection, protection against electric shock, inspection, testing device, earthing/grounding systems, step voltage, touch voltage, minimum cross-section of protective earthing conductors

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	1
1.1	Ziel	1
1.2	Methode	1
1.3	Ergebnisse	2
1.4	Ausblick	2
2	Einleitung	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Stand der Technik.....	3
2.3	Aufgabenstellung.....	4
3	Überprüfung von DC-Ladestationen.....	5
3.1	Grundlagen.....	5
3.2	Normativer Hintergrund	8
3.3	System DC-Ladestation und Elektrofahrzeug	10
3.4	Konzept für ein Prüfprotokoll.....	11
3.5	Mögliche Fehlerfälle.....	13
3.6	Konzept eines Prüfgerätes.....	14
3.7	Messverteiler	15
3.8	Messergebnisse	17
3.8.1	Fehlerfreie DC-Ladevorgänge	17
3.8.2	Fehlerbehaftete DC-Ladevorgänge.....	19
4	Erdungsanlagen von DC-Ladestationen	22
4.1	Rechtliche und normative Grundlagen	22
4.2	Definitionen.....	24
4.3	Einteilung und Arten von Erdern	26
4.3.1	Horizontalerder	26
4.3.1.1	Strahlenerder	26
4.3.1.2	Ringerder	27
4.3.1.3	Maschenerder.....	28

4.3.2	Vertikalerder	28
4.3.3	Fundamenterder	29
4.3.4	Natürliche Erder.....	30
4.4	Ausbreitungswiderstand unterschiedlicher Erder	30
4.5	Stoßerdungswiderstand vs. effektive Erderlänge	31
4.6	Spezifischer Erdwiderstand	32
4.7	Erdungsspannung, unbeeinflusste Berührungsspannung und Schrittspannung	33
4.8	Ausführungsbeispiel einer Erdungsanlage einer DC-Ladestation.....	34
4.8.1	Beispielhafte Konfiguration	34
4.8.2	Annahmen	35
4.8.3	Varianten und Fälle.....	35
4.8.4	Berechnungsergebnisse	36
4.8.5	Wirksamer Ausbreitungswiderstand der Parallelschaltung des Erders einer DC-Ladestation mit anderen Erdern von NS- und MS-Komponenten.....	42
4.8.5.1	Schematische Darstellung des Zusammenhanges der einzelnen Erder	42
4.8.5.2	Berechnungen	43
4.8.5.3	Interpretation der Berechnungsergebnisse	45
4.8.5.3.1	Allgemeines	45
4.8.5.3.2	Beurteilungskriterien.....	46
4.8.5.4	Verbundene vs. nicht verbundene NS- und MS-Erdungsanlagen	51
4.8.5.4.1	Die Erdungsanlage der DC-Ladestation ist mit der Betriebserdungsanlage einer Mittelspannungsstation verbunden.....	51
4.8.5.4.2	Die Erdungsanlage der DC-Ladestation ist nicht mit der Betriebserdungsanlage einer Mittelspannungsstation verbunden	55

5 Mindestquerschnitt von Schutzerdungsleitern 60

5.1	Normative Berechnungsvorschriften	60
5.1.1	Gängige Verteiltransformatoren und deren Kurzschlussströme	60
5.1.2	Ermittlung des Faktors k	62
5.1.3	Mindestquerschnitt von Schutzleitern	65
5.2	Berechnungsbeispiel zur Ermittlung des Mindestquerschnitts von Schutzerdungsleitern.....	66
5.3	Verwendung der Tabellen.....	68

5.4	Tabellen für Mindestquerschnitte von Schutzleitern unterschiedlicher Konfigurationen (beispielhafter Auszug mit entsprechenden Annahmen).....	69
6	Diskussion.....	75
6.1	Zu Kapitel 3 – Überprüfung von DC-Ladestationen.....	75
6.2	Zu Kapitel 4 – Erdungsanlagen von DC-Ladestationen.....	75
6.3	Zu Kapitel 5 – Mindestquerschnitt von Schutzerdungsleitern	76
7	Literatur	77
8	Anhang	81
8.1	Messdaten.....	81
8.1.1	Messung Nr. 1 (CCS)	81
8.1.1.1	Fehlerfreier CCS-Ladevorgang (mit Unterbrechung der „Verriegelung“).....	82
8.1.1.2	CCS-Ladevorgang mit Unterbrechung des „CP“-Leiters.....	83
8.1.1.3	CCS-Ladevorgang mit Unterbrechung des „DC+“-Leiters	85
8.1.1.4	CCS-Ladevorgang mit Unterbrechung des „PE“-Leiters.....	87
8.1.1.5	CCS-Ladevorgang mit 100 k Ω -Erdschluss	89
8.1.1.6	CCS-Ladevorgang mit 40 k Ω -Erdschluss	91
8.1.1.7	CCS-Ladevorgang bei zuvor anliegendem 40 k Ω -Erdschluss.....	92
8.1.2	Messung Nr. 2 (CHAdeMO).....	94
8.1.2.1	Fehlerfreier CHAdeMO-Ladevorgang	95
8.1.2.2	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „connection check“-Leiters.....	97
8.1.2.3	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „charging enable/disable“-Leiters 100	
8.1.2.4	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „charging start/stop 1“-Leiters ...	103
8.1.2.5	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „charging start/stop 2“-Leiters ...	106
8.1.2.6	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „CAN-H“-Leiters	109
8.1.2.7	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „CAN-L“-Leiters.....	112
8.1.2.8	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „DC+“-Leiters	115
8.1.2.9	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „DC“-Leiters	118
8.1.2.10	CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „PE“-Leiters	121
8.1.2.11	CHAdeMO-Ladevorgang mit 100 k Ω -Erdschluss.....	124
8.1.2.12	CHAdeMO-Ladevorgang mit 40 k Ω -Erdschluss.....	127
8.1.2.13	CHAdeMO-Ladevorgang mit 100 k Ω -Kurzschluss.....	130

8.1.2.14	CHAdeMO-Ladevorgang mit 40 k Ω -Kurzschluss.....	133
8.1.2.15	CHAdeMO-Ladevorgang mit 1 k Ω -Kurzschluss.....	136



Abkürzungsverzeichnis

Lateinisches Alphabet

A	Ampere, Einheit des elektrischen Stromes
Absch.	Abschaltung
AC	engl. alternating current, Wechselstrom
CAN	engl. Controller Area Network
CCS	engl. Combined Charging System, europäischer Standard zur Gleichstromladung von Elektrofahrzeugen
CHAdeMO	Asiatischer Standard zur Gleichstromladung von Elektrofahrzeugen
COM1, COM2	Signalleitungspaar zur digitalen Kommunikation, CAN (CHAdeMO)
Combo2	Europäischer, standardisierter Steckverbinder zur Wechselstrom- bzw. Gleichstromladung von Elektrofahrzeugen nach ÖVE/ÖNORM EN 62196-3:2015-06-01 [1]
CP	engl. Control Pilot, Steuerpilotsignal (CCS und CHAdeMO)
CP2	Steuerpilot zur Anzeige des Start/Stop-Zustandes der Station (CHAdeMO)
CP3	Steuerpilot zur Bestätigung, dass das Fahrzeug bereit zum Laden ist (CHAdeMO)
CS	Pilotleitung zur Anzeige des Zustandes des Anschlusses der Fahrzeugsteckvorrichtung (CHAdeMO)
DC-	Negativer Pol (Minuspol) der Gleichstromversorgung
DC, d.c.	engl. direct current, Gleichstrom
DC+	Positiver Pol (Pluspol) der Gleichstromversorgung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
e.V.	eingetragener Verein
EMI, EMB	engl. Electromagnetic Interference, elektromagnetische Beeinflussung bzw. Elektromagnetische Störung und Gefährdung
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
engl.	Englisch, englische Sprache
EPR	engl. Earth Potential Rise, Oberflächenpotenzial, Erdungsspannung
ES	Erdschluss
et al.	et alii, lat. „und andere“
EV	engl. electric vehicle, Elektrofahrzeug
EVCS	engl. electric vehicle charging station, Ladestation für Elektrofahrzeuge



EVSE	engl. electric vehicle supply equipment, Gesamtheit der Ladeeinrichtung von Elektrofahrzeugen samt Zuleitung ab der Hausinstallation
FG	engl. functional ground, Funktionserde (FE)
hh	Stunden
I	Formelzeichen des elektrischen Stromes
idF	in der Fassung
idgF	in der geltenden Fassung
IEC	engl. International Electrotechnical Commission
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IMD	engl. insulation monitoring device, Isolationsüberwachungsgerät
ISO	International Organization for Standardization
IT-System	Netzsystem zur elektrischen Energieversorgung, Generator-Sternpunkt hochohmig mit Betriebserder verbunden oder offen, Betriebsmittel über Anlagenerder geerdet [2]
k.A.	keine Angabe
KS	Kurzschluss
lat.	Latein, lateinische Sprache
m	Meter, Einheit der geometrischen Länge
mm	Minuten
MS	Mittelspannung
N	neutral, Neutral(-leiter)
NS	Niederspannung
ÖNORM	nationale österreichische Norm
ÖVE bzw. OVE	Österreichischer Verband für Elektrotechnik
PA	Potenzialausgleich
PE	engl. protective earth, Schutzerdung(-leiter)
PEN	engl. protective earth neutral, kombinierter Neutral- und Schutzerdungsleiter im TN-C-System
PP	engl. Proximity Pilot, Annäherungserkennung (CCS)
R	Formelzeichen des elektrischen Widerstandes
RE	Reiheneinbau
SAE	SAE International, Society of Automobile Engineers
sic	lat. „so“, „wirklich so“; weist in der Arbeit auf in Zitaten übernommene Rechtschreib- bzw. Grammatikfehler hin
SLB	Störlichtbogen



SNT-Vorschriften	Elektrotechnische Sicherheitsvorschriften und Vorschriften über Normalisierung und Typisierung
ss	Sekunden
StF	Stammfassung
t	Formelzeichen für die Zeit
TN-System	Netzsystem zur elektrischen Energieversorgung, Generator-Sternpunkt über Betriebsleiter geerdet, Betriebsmittel mittels PE- oder PEN-Leiter mit Betriebsleiter verbunden [2]
TS	Technische Spezifikation
TT-System	Netzsystem zur elektrischen Energieversorgung, Generator-Sternpunkt über Betriebsleiter geerdet, Betriebsmittel über Anlagenerdleiter geerdet [2]
ttt	Tausendstel Sekunden
Typ2	Europäischer, standardisierter Steckverbinder zur Wechselstromladung von Elektrofahrzeugen nach ÖVE/ÖNORM EN 62196-2:2017-12-01 [3]
U	Formelzeichen der elektrischen Spannung
V	Volt, Einheit der elektrischen Spannung
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
vs.	versus, lat. „gegen“, „im Vergleich zu“
W	Watt, Einheit der elektrischen Leistung

Griechisches Alphabet

ρ_E	Formelzeichen des spezifischen elektrischen Widerstandes
Ω	Ohm, Einheit des elektrischen Widerstandes



1 Kurzfassung

1.1 Ziel

Im Zuge der rasanten Entwicklung der Elektromobilität wird auch der Ausbau einer leistungsstarken Ladeinfrastruktur (z.B. DC-Ladestationen für Elektrofahrzeuge) stark forciert. Da es sich bei DC-Ladestationen oft um öffentliche sowie freistehende Einrichtungen zur elektrischen Energieumwandlung mit hohem Leistungsumsatz handelt, muss dabei der Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag höchste Priorität erfahren und dieser regelmäßig durch geeignete Prüfverfahren neu überprüft und damit sichergestellt werden. Eine essentielle Rolle bei den Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag nimmt dabei die normen- und vorschriftenkonforme Dimensionierung und Errichtung der Erdungs- und Potenzialausgleichsanlage samt den zugehörigen Schutzerdungsleitern ein.

Ziel dieser Arbeit soll nun primär die Entwicklung eines Konzepts zur Überprüfung der genannten Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag bei DC-Ladestationen für Elektrofahrzeuge darstellen. Des Weiteren soll ein grundsätzlicher Überblick zum Thema Erdungsanlagen geboten werden und im Detail auf ein Ausführungsbeispiel einer Erdungsanlage für eine DC-Ladestation eingegangen werden. Ergänzend dazu soll die normenkonforme Dimensionierung von Erdungsanlagen von Ladestation sowie deren Potenzialausgleichs- und Schutzerdungsleitern erläutert werden.

1.2 Methode

Hinsichtlich des Konzepts zur Überprüfung der Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag gilt es sich eingangs mit einschlägigen Normen- und Vorschriften vertraut zu machen, um danach mögliche theoretische Fehlerfälle im Gesamtsystem DC-Ladestation und Elektrofahrzeug aufzuzeigen. Diese Fehlerfälle sind anschließend mittels geeigneter Messtechnik und entsprechender Hardware in Form von Fehlersimulationen zu analysieren, um daraus in weiterer Folge Vorschläge für Prüfroutinen ableiten zu können. Bezugnehmend auf Erdungsanlagen von DC-Ladestationen ist eine anfängliche Normen- und Vorschriften-Recherche zur Thematik ebenfalls unumgänglich. Aufbauend darauf sollen nach softwaregestützten Berechnungen zu einem Ausführungsbeispiel aus der Praxis allgemeingültige Aussagen bezüglich Errichtung und Dimensionierung von Erdungsanlagen von DC-Ladestationen getroffen werden.



1.3 Ergebnisse

Es zeigt sich, dass das umfassende Normenwerk zum Thema DC-Ladestationen sehr schnell wächst und folglich noch nicht bis ins letzte Detail erarbeitet bzw. ausgereift ist. Erste Messungen am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz an einer Ladestation haben zu wesentlichen Erkenntnissen zu deren Verhalten im Fehlerfall im Bereich des Ladesystems geführt. Aufbauend auf der Analyse der Messergebnisse und der Normenrecherche ist ein entsprechender Entwurf eines Prüfkonzepts bzw. Prüfgeräts angefertigt worden. Mit Hilfe der Ergebnisse zu den Berechnungen der möglichen, maximal auftretenden Berührungs- bzw. Schrittspannungen anhand eines konkreten Beispiels einer Erdungsanlage einer DC-Schnellladestation aus der Praxis können fundierte Aussagen zu einer Vielzahl an unterschiedlichen Konfigurationen von Erdungsanlagen hinsichtlich deren Wirksamkeit getätigt werden. Zusätzlich gibt ein Abschnitt dieser Arbeit einen Überblick zur normenkonformen Berechnung des Mindestquerschnitts von PA- und Schutzerdungsleitern.

1.4 Ausblick

Das Betätigungsfeld rund um die Gesamtheit der Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge bleibt in nächster Zukunft ein Spannendes. Bis dato sind noch eine Vielzahl an Fragen hinsichtlich Normung und Standardisierung, Errichtung und Betrieb sowie der Personensicherheit unbeantwortet. Das Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz ist jedoch weiterhin bestrebt, sich im Zuge von Folgeprojekten umfassend mit der Thematik zu beschäftigen um das bereits fundierte Knowhow auf diesem Gebiet noch weiter auszubauen. Eines dieser Projekte in Kooperation mit einem lokalen, international etablierten, Hersteller von Prüfständen ist bereits genehmigt worden und befindet sich zum Zeitpunkt des Erscheinens dieser Arbeit gerade in der Anfangsphase.¹

¹ Projekt im FFG-Basisprogramm: „Mobiles und stationäres Prüfgerät für DC-Schnellladesäulen“ (Projekt-Nr. 868294) in Kooperation mit der Firma Kristl, Seibt & Co Gesellschaft m.b.H., 8052 Graz und dem Institut für Elektrische Anlagen der Technischen Universität Graz (Daniel Herbst), vgl. [25]

2 Einleitung

2.1 Allgemeines

Mit dem Aufschwung der Elektromobilität und der damit einhergehenden Nachfrage an Elektrofahrzeugen (EV, electric vehicle) wächst auch der Bedarf an Ladeinfrastruktur. Die Industrie bietet mittlerweile eine Vielzahl von Ladestationen für Elektrofahrzeuge (EVCS, electric vehicle charging station) in unterschiedlichen Funktions- und Leistungsklassen an. Mit der stetig steigenden Anzahl an installierten Ladestationen wächst jedoch die Notwendigkeit von praxistauglichen Lösungen betreffend Errichtung, Montage, Betriebsführung aber insbesondere auch der Überprüfung von Ladestationen hinsichtlich der Gewähr der Sicherheit von Betriebsmitteln, Anlagen, benachbarten Bauten und im speziellen von Personen. Die hierbei wichtigen, aktuell jedoch noch nicht gänzlich und umfassend beantworteten Fragestellungen, beschäftigen sich mit den baulichen sowie mit den elektrotechnischen Voraussetzungen im Zuge der Errichtung und des Betriebs von Ladestationen sowie die damit eng zusammenhängenden Fragestellungen hinsichtlich des Einhaltens und der Wirksamkeit der Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag.

2.2 Stand der Technik

Da Wechselstromladestationen im weitesten Sinne als leistungsstarke, „normale“ Wechselstromanschlüsse bzw. -steckdosen angesehen werden können, bieten verschiedenste handelsübliche Installationstester (vgl. Abbildung 1) mit entsprechenden Adapterlösungen (vgl. Abbildung 2) bereits Funktionen zur Überprüfung hinsichtlich Schutz gegen elektrischen Schlag von Personen. Diese Installationstester sind in der Lage, mit Hilfe spezieller Prüfroutinen, in Verbindung mit den genannten Adapterboxen sämtliche Fahrzeug-Betriebszustände nach ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4] zu überprüfen und zu dokumentieren.



Abbildung 2:
Adapterbox aus [43]



Abbildung 1:
Handelsüblicher
Installationstester
(aus [42])

Im Vergleich dazu fehlt es hingegen zurzeit noch an normativen Vorgaben zur Überprüfung von DC-Ladestationen und folglich an entsprechenden Prüfgeräten. Auch das mit dem Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag einhergehende Thema der Erdungs- und Potenzialausgleichsanlage ist bisher nicht vollständig erarbeitet.



2.3 Aufgabenstellung

Im Zuge der vorliegenden Arbeit sollen DC-Ladestationen hinsichtlich der Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag untersucht werden, um in weiterer Folge ein Konzept für ein dahingehend geeignetes Prüfgerät zu erarbeiten. Des Weiteren soll ein theoretischer, aber praxisnaher, Überblick zum Thema Erdungsanlagen vermittelt werden. Darüber hinaus sollen, ausgehend von einem konkreten Ausführungsbeispiel einer Erdungsanlage einer DC-Ladestation – unter gewissen Voraussetzungen allgemein anwendbare – Aussagen über verschiedene Erderkonfigurationen getroffen werden. Ergänzend dazu soll die mit dem Themengebiet Erdung eng verknüpfte Problematik der Ermittlung des Mindestquerschnittes von PA- und Schutzerdungsleitern betrachtet sowie die normative Berechnung erörtert werden.

3 Überprüfung von DC-Ladestationen

3.1 Grundlagen

Das folgende Kapitel dient dem besseren Verständnis sowie der Vermeidung von fälschlich oder uneinheitlich interpretierten Begriffen.

Im Zuge dieser Arbeit wird grundsätzlich zwischen Wechselstrom-Ladestationen (AC-EVCS) und Gleichstrom-Ladestationen (DC-EVCS) unterschieden.

- Wechselstrom-Ladestationen (AC-Ladestation, AC-EVCS):

Ladestationen für Elektrofahrzeuge, welche primärseitig vom 230/400 V, 50-Hz-Wechsel- bzw. Drehstromnetz versorgt werden und sekundärseitig ein Elektrofahrzeug mit Ladeenergie in Form von 230/400 V, 50 Hz Wechsel- bzw. Drehstrom versorgen. Die gesamte Ladeelektronik (Gleichrichter, Laderegler, etc.) befindet sich in diesem Fall im Elektrofahrzeug. Dabei ist ein Ladevorgang abhängig vom entsprechenden System entweder mit Kommunikation oder ohne Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation möglich. (vgl. [5])

Definition gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4]:

„Wechselstrom-Ladestation für das EV

(en: a.c. EV charging station)

gesamte in (ein) Gehäuse(n) eingebaute und mit speziellen Steuerfunktionen ausgestattete Einrichtung zur Lieferung von Wechselstrom an Elektrofahrzeuge“ [4]

- Gleichstrom-Ladestationen (DC-Ladestation, DC-EVCS):

Ladestationen für Elektrofahrzeuge, welche primärseitig vom 230/400 V, 50-Hz-Wechsel- bzw. Drehstromnetz versorgt werden und sekundärseitig ein Elektrofahrzeug mit Ladeenergie in Form von Gleichstrom versorgen. Dabei ist für einen Ladevorgang Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation unbedingt erforderlich. (vgl. [5])

Definition gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4]:

„Gleichstrom-Ladestation für das EV

(en: d.c. EV charging station)

gesamte in (ein) Gehäuse(n) eingebaute und mit speziellen Steuer- und Kommunikationsfunktionen ausgestattete und außerhalb des EV befindliche Einrichtung zur Lieferung von Gleichstrom an Elektrofahrzeuge

ANMERKUNG Das Laden mit Gleichstrom schließt das Laden mit Impulstechnologie ein.“ [4]

Ergänzend dazu definiert die ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4] noch die Gesamtheit der Ladeeinrichtung von Elektrofahrzeugen samt Zuleitung ab der Hausinstallation zu einer Stromversorgungseinrichtung für ein Elektrofahrzeug welche wie folgt definiert ist:

„Stromversorgungseinrichtung für das Elektrofahrzeug

(en: EV supply equipment)

EVSE

Leiter, einschließlich Außenleiter, Neutralleiter, Schutzerdungsleiter (PE-Leiter), Elektrofahrzeug-Steckvorrichtungen, Anschlussstecker und sämtliches andere Zubehör, Steckdosen oder Einrichtungen, die speziell zum Zweck der Energielieferung von der Hausverkabelung zum EV installiert wurden und die die Kommunikation zwischen diesen gestatten, falls erforderlich“ [4]

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der derzeit am Häufigsten verwendeten Ladesteckverbinder bzw. Ladesysteme sowie deren Kenndaten.

Tabelle 1: Steckverbinder Elektromobilität [5]

Steckverbinder/ Ladesysteme	Schuko	Typ 1	Typ 2	CHAdeMO	Combo2
Spannung	230 V	230 V	400 V	500 V	500 V
Strom	10 A – 16 A	≤ 32 A	≤ 63 A	≤ 125 A	≤ 125 A
Phase	1-phasig AC	1-phasig AC	3-phasig AC	DC	DC
Leistung	≤ 3,7 kW ²	≤ 7,4 kW	≤ 22 kW	≤ 50 kW	≤ 50 kW
Kommunikation mit Fahrzeug	nicht vorhanden	CP, CS	CP, PP	CP, CP2, CS, CP3, CAN-H, CAN-L	CP, PP

² für Dauerladen nicht geeignet

Ausgehend von der konventionellen Schutzkontaktsteckdose steigert sich die Ladeleistung in Tabelle 1 von links nach rechts. Man erkennt, dass die ersten drei linken Spalten AC-Ladesysteme und die rechten beiden Spalten die in dieser Arbeit vorwiegend betrachteten DC-Ladesysteme repräsentieren. Bei DC-Ladesystemen liegt die Ladespannung im Bereich ≤ 500 VDC, der Ladestrom im Bereich ≤ 125 A und die entsprechende Ladeleistung im Bereich ≤ 50 kW. Dabei handelt es sich um Werte von zurzeit handelsüblichen Ladestationen. Die Entwicklungen streben jedoch bereits heutzutage in Richtung 150 kW und mehr bei Gleichspannungen bis knapp unter 1000 VDC. Beim sogenannten CHAdeMO-Steckverbinder bzw. bei dem damit einhergehenden CHAdeMO-System handelt es sich um den vorwiegend von asiatischen Herstellern von Elektrofahrzeugen verwendeten Ladestandard. Der Combo2 Steckverbinder wird hauptsächlich von europäischen Herstellern von Elektrofahrzeugen verwendet, das entsprechend zugehörige Ladesystem ist das Combined Charging System (CCS). Das Fahrzeug-Inlet ist dabei für eine elektrische Ladung einerseits mit Wechselstrom (Typ2-Steckverbinder), andererseits mit Gleichstrom geeignet. Der Typ2-, der Combo2- und der CHAdeMO-Steckverbinder sind in der ÖVE/ÖNORM EN 62196-Reihe ([1], [3], [6]) normativ festgehalten. Die zugehörigen Ladesysteme finden sich hingegen in der Reihe ÖVE/ÖNORM EN 61851 ([4], [7], [8]).

Auszugsweise werden in Tabelle 2 die in Tabelle 1 genannten Kommunikations- bzw. Signalleitungen (für Typ2, Combo2 und CHAdeMO) aufgelistet.

Tabelle 2: Kommunikations- bzw. Signalleitungen von Ladesystemen für Elektrofahrzeuge

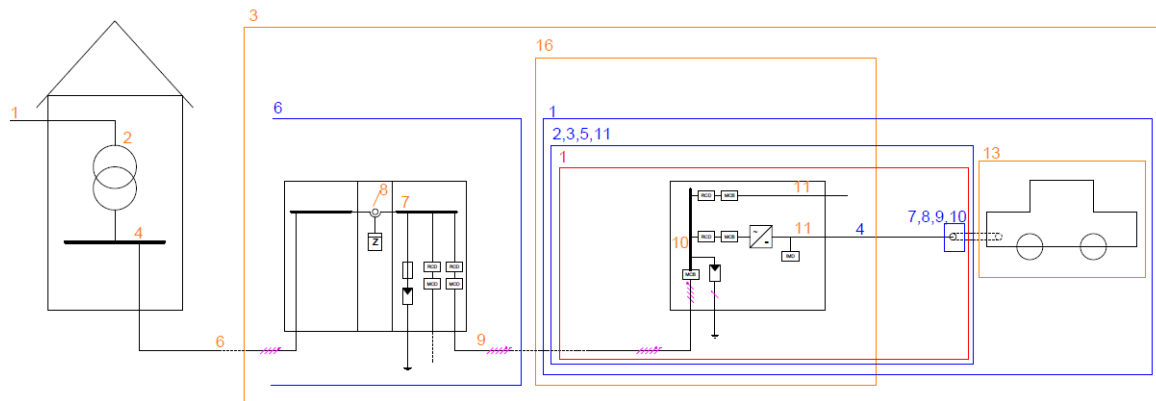
Abkürzung	Bezeichnung	Bezeichnung alternativ	Steckverbinder/ Ladesystem	Norm
CP	Control Pilot, Steuerpilot mit Funktionen nach EN 61851-1 [4]	-	Combo2/CCS & Typ2	EN 61851-22 [7] & EN 61851-23 [8]
PP	Annäherungserkennung, allgemeine Funktionen nach EN 61851-1 [4]	-	Combo2/CCS & Typ2	EN 61851-22 [7] & EN 61851-23 [8]
CP	Steuerpilot zur Anzeige des Start/Stop-Zustandes der Station	charger start/stop 1	CHAdeMO	EN 61851-23 [8]
CP2	Steuerpilot zur Anzeige des Start/Stop-Zustandes der Station	charger start/stop 2	CHAdeMO	EN 61851-23 [8]
CS	Pilotleitung zur Anzeige des Zustandes des Anschlusses der Fahrzeugsteckvorrichtung	connectivity check	CHAdeMO	EN 61851-23 [8]
CP3	Steuerpilot zur Bestätigung, dass das Fahrzeug bereit zum Laden ist	charging enable/disable	CHAdeMO	EN 61851-23 [8]
COM1	Signalleitungspaar zur digitalen Kommunikation	CAN-H	CHAdeMO	EN 61851-23 [8]
COM2	Signalleitungspaar zur digitalen Kommunikation	CAN-L	CHAdeMO	EN 61851-23 [8]

3.2 Normativer Hintergrund

Zu Beginn ist eine umfangreiche Recherche hinsichtlich der für diese Arbeit maßgebenden rechtlich verbindlichen Vorschriften aber auch normativen Bestimmungen erforderlich. Die folgende Auflistung soll einen auszugsweisen Überblick von einschlägigen Gesetzen, Normen und Vorschriften, die den Stand der Technik repräsentieren, und die dabei zur Anwendung kommen können, vermitteln.

- Elektrotechnikgesetz 1992 (ETG 1992) idF BGBl. I Nr. 27/2017 [9]
- Elektroschutzverordnung 2012 (ESV 2012) StF BGBl. II Nr. 33/2012 [10]
- Elektrotechnikverordnung 2002 (ETV 2002) idF BGBl. II Nr. 229/2014 [11]
- ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2]
„Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen \leq AC 1000 V und DC 1500 V [...]“
- EN 60364 (VDE 0100)-Reihe
„Errichten von Niederspannungsanlagen [...]“
- ÖVE/ÖNORM EN 62196-1:2015-07-01 [6]
„Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen“
- ÖVE/ÖNORM EN 62196-2:2017-12-01 [3]
„Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen – Teil 2: Anforderungen und Hauptmaße für die Kompatibilität und Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvorrichtungen für Wechselstrom“
- ÖVE/ÖNORM EN 62196-3:2015-06-01 [1]
„Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen – Teil 3: Anforderungen an und Hauptmaße für Stifte und Buchsen für die Austauschbarkeit von Fahrzeugsteckvorrichtungen zum dedizierten Laden mit Gleichstrom und als kombinierte Ausführung“
- ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4]
„Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 1: Allgemeine Anforderungen“
- ÖVE/ÖNORM EN 61851-22:2002-12-01 [7]
„Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 22: Wechselstrom-Ladestation für Elektrofahrzeuge“
- ÖVE/ÖNORM EN 61851-23:2014-12-01 [8]
„Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Teil 23: Gleichstromladestationen für Elektrofahrzeuge“
- DIN VDE V 0122-2-300:2016-04 (ENTWURF) [12]
„Spezifikation zur Konformitätsprüfung zu IEC 61851-23“
- ISO 15118-Reihe
„Straßenfahrzeuge - Kommunikationsschnittstelle zwischen Fahrzeug und Ladestation“
- SAE J 2293 idgF
„Energy Transfer System for Electric Vehicles“
- ÖVE/ÖNORM EN 61439-1:2012-07-01 [13]
„Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen – Teil 1: Allgemeine Festlegungen“
- IEC 60245-6:1994-07 [14]
„Elektrodenkabel für Lichtbogenschweißgeräte“
- IEC 60950-1:2005-12 [15]
„Information technology equipment – Safety“
- ÖVE/ÖNORM EN 61557-8:2016-01-01 [16]
„Isolationsüberwachungsgeräte für IT-Systeme“
- uvm.

In Anlehnung an Bild 3-6a aus der ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] kann hinsichtlich der Abgrenzung zwischen Verteilungsnetz und einer (DC-)Ladestation für Elektrofahrzeuge die folgende Abbildung 3 als Systemgrafik etabliert werden.



Bezeichnungen nach ÖVE E 8001-1:2010-03-01

- 1 Hochspannungsanschluss
- 2 Stromquelle (Transformator, Generator)
- 3 elektrisch versorgtes Objekt (3.1.7 und 3.1.10)
- 4 Hauptverteilung des Verteilungsnetzes (3.1.3), mit Betriebserdung
- 6 Niederspannungs-Verteilnetz (3.1.3) öffentlich oder betrieblich
- 7 Verteilung mit Anschlusspunkt der Nullungsverbindung (3.3.3.3 und 3.3.3.3.1), mit Anlagenerde und Hauptpotentialausgleich
- 8 technische Grenze des Verteilungsnetzes (3.1.3) zur Verbraucheranlage (3.1.10), unabhängig vom Eigentum an den Anlagen und unabhängig von der örtlichen Situierung
- 9 Verteilungsleitung (3.1.9)
- 10 Unterverteilung der Verbraucheranlage
- 11 Endstromkreis (3.1.11.3) mit Nennstromstärke > 32 A
- 13 elektrisches Verbrauchsmittel (3.2.2) mit Überstromschutz mit Nennstromstärke > 32 A
- 16 Einzelverbraucheranlage (3.1.10.1)

Bezeichnungen nach IEC 61851-1:2017

- 1 EV charging system
- 2 EV charging station
- 3 EV supply equipment
- 4 cable assembly
- 5 permanently connected EV supply equipment
- 6 supply network
- 7 EV plug
- 8 vehicle connector
- 9 connecting point
- 10 vehicle inlet
- 11 ACSEV (OVE TS 61439-7)

Bezeichnungen nach ÖVE/ÖNORM EN 61439-1:2012-07-01 und OVE TS 61439-7:2016-07-01

- 1 low voltage switchgear and controlgear ASSEMBLY for electric vehicles charging stations ACSEV

Normative Einteilung elektrischer Anlagen mit DC-Schnellladestation

gezeichnet: Benjamin Jauk, 30.08.2018, Rev. 6
 Status: Entwurf
 Technische Universität Graz, IEAN

Abbildung 3: Systemgrenzen aus [17]

Grundsätzlich erkennt man in Abbildung 3 die Systemgrenzen zwischen einer elektrischen Anlage, einer DC-Ladestation und einem Elektrofahrzeug. Dabei beziehen sich die verschiedenen Layer-Farben auf die jeweils anzuwendenden Normen:

Orange

ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2]

sowie gegebenenfalls ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [18] bzw. ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] und ÖVE/ÖNORM EN 62305 Reihe

Blau

ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4]

Siehe auch ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2017-02

Rot

ÖVE/ÖNORM EN 61439-1:2012-07-01 [13]

Siehe auch OVE IEC TS 61439-7:2016-07-01

Eine detaillierte Ausarbeitung zu der Thematik findet sich in [17].

Anmerkung: Die vorliegende Arbeit behandelt vorwiegend den roten Bereich der Systemgrafik in Abbildung 3.

Trotz dieser Vielzahl an Regelwerken sind die derzeitigen Normen und Vorschriften bezugnehmend auf die Überprüfung von DC-Ladestationen hinsichtlich der Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag noch nicht ganzheitlich erarbeitet.

3.3 System DC-Ladestation und Elektrofahrzeug

Das Gesamtsystem einer an das Verteilnetz (Niederspannungsnetz) angeschlossenen Gleichstrom-Ladestation und einem davon gespeisten Elektrofahrzeug ist in Abbildung 4 dargestellt.

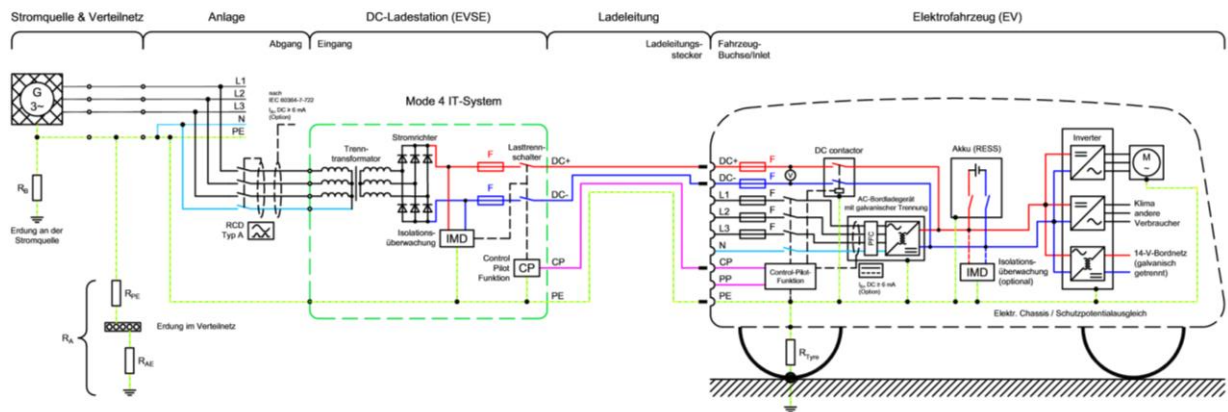


Abbildung 4: Gesamtsystem DC-Ladestation und Elektrofahrzeug (ähnlich [20])

Man erkennt links in der Grafik die Stromquelle sowie deren Erdungsanlage samt dem speisenden Niederspannungsverteilstromnetz und den Anschlusspunkt der elektrischen Anlage wiederum mit deren Erdungsanlage. In der Mitte der Abbildung ist die DC-Ladestation ersichtlich. Diese wird schematisch durch einen Trenntransformator, einen Stromrichter (welcher die eingangsseitige Wechselspannung in die für die elektrische Beladung des Elektrofahrzeuges erforderliche Gleichspannung umwandelt), Abgangssicherungselemente, einen Lasttrennschalter, Steuerelektronik (CP) sowie ein Isolationsüberwachungsgerät (IMD) dargestellt. Im Falle einer DC-Ladestation (Ladebetriebsart 4 gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4]) ist die Ladeleitung fest an der Station angeschlossen und nur auf der Fahrzeug-Seite steckbar ausgeführt. Rechts in der Grafik ist das an die DC-Ladestation angeschlossene Elektrofahrzeug dargestellt. Der grundsätzliche Aufbau des elektrofahrzeuginternen Stromversorgungssystems wird in diesem rudimentären Schaltbild durch den Ladesteckverbinder, eingangsseitige Sicherungselemente, Steuerlogik, zwei DC-Trenner, ein Boardladegerät zur möglichen Beladung mit Wechselstrom, den Akkumulator, ein Isolationsüberwachungsgerät (IMD) sowie Invertereinheiten zur Versorgung der unterschiedlichen Verbraucher dargestellt.

Im Allgemeinen kann ein Elektrofahrzeug netztopologisch als IT-System angesehen werden. Das Fahrzeug überwacht während des normalen Fahrbetriebes ständig den Isolationswiderstand des Hochvolt-DC-Akkumulatorsystems (jeweils DC+ und DC-) gegen das Chassis bzw. die Karosserie. Sobald das EV an eine DC-Ladestation angeschlossen und der Ladevorgang initiiert wird, übernimmt das Isolationsüberwachungssystem der Ladestation die Isolationsüberwachung des entstandenen Gesamtsystems (EVCS samt angeschlossenem EV) und das IMD des Fahrzeugs wird deaktiviert.



3.4 Konzept für ein Prüfprotokoll

Im Verlauf der Arbeit ist ein Messprotokoll zur Dokumentation der Messungen mit dem in Kapitel 3.7 beschriebenen Messverteiler entstanden (siehe Abbildung 5 und Abbildung 6).

Allgemeine Daten				
Art der Steckverbindung	<input type="checkbox"/> Typ2-AC	<input type="checkbox"/> CCS-DC	<input type="checkbox"/> CHAdeMO	<input type="checkbox"/> Messinstrumente verb.
Datum:		Ort:	Uhrzeit:	<input type="checkbox"/> Fahrzeug verb.
Standard Ladevorgang				
Prüfpunkt	Zeitpunkt	Erliegt	Bemerkung	
Ladevorgang aufzeichnen				
Verriegelung schließen				
Ladevorgang durch Fahrzeug beenden				
Unterbrochener Ladevorgang				
Prüfpunkt	Zeitpunkt	Erliegt	Bemerkung	
Ladevorgang aufzeichnen				
Verriegelung schließen				
Unterbrechung schalten				
Art der Unterbrechung	Ladung stoppt	Autom. Start	Bemerkung	
Typ2-AC	Verriegelung			
	Controlpilot (CP)			
	(PP)			
	Phase (L1, L2, L3)			
	Neutralleiter (N)			
	Erde (PE)			
CCS-DC	Verriegelung			
	Controlpilot (CP)			
	(PP)			
	DC+			
	DC-			
	Erde (PE)			
CHAdeMO	Connection check			
	Charging enable/disable			
	charger start/stop 1			
	charger start/stop 2			
	CAN-H			
	CAN-L			
	DC+			
	DC-			
	Erde (PE)			

erstellt: Benjamin Jauk, 06.11.2017, geprüft: Daniel Herbst, 06.11.2017
E:\1_Bachelor-ET\11_WS17\#Bachelorarbeit\01_Arbeit\pruefprotokolle\Pruefablauf.xlsx

Seite 1/2

Abbildung 5: Prüfablauf DC-EVSU Messverteiler (Seite 1 von 2) (aus [17])



Fehlerhafter Ladevorgang			
Prüfpunkt	Zeitpunkt	Erledigt	Bemerkung
Ladevorgang aufzeichnen			
Verriegelung schließen			
Fehler schalten			

Art des Fehlers	Ladung stoppt	Autom. Start	Bemerkung
Erdschluss 100 kOhm			
Erdschluss 40 kOhm			
Erdschluss 1 kOhm			
Erdschluss 0 Ohm			
Kurzschluss 100 kOhm			
Kurzschluss 40 kOhm			
Kurzschluss 1 kOhm			
Kurzschluss 0 Ohm			

Systemdaten			
Hersteller Ladestation:		Type:	
Seriennummer:		Anschluss:	
Standort:			
Hersteller Fahrzeug:		Type:	
Seriennummer:		Kennzeichen:	
Hersteller Messgerät:		Type:	
Seriennummer:			

Personen			
Name	Vorname	Unternehmen	Unterschrift

erstellt: Benjamin Jauk, 06.11.2017, geprüft: Daniel Herbst, 06.11.2017
 E:\1_Bachelor-ET\11_WS17\#Bachelorarbeit\01_Arbeit\pruefprotokolle\Pruefablauf.xlsx

Seite 2/2

Abbildung 6: Prüfablauf DC-EVSU Messverteiler (Seite 2 von 2) (aus [17])

In Anlehnung an dieses tabellarische Protokoll sowie an allgemein bekannte Prüfbefunde (vgl. [21]) bzw. an die in den Normen ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61:2001-07-01 [22], ÖVE/ÖNORM E 8001-6-62:2003-01-01 [23] und ÖVE/ÖNORM E 8001-6-63:2003-01-01 [24] aufgelisteten Mindestanforderungen für Erstprüfungen bzw. wiederkehrende Überprüfungen wird im Zuge einer, am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz parallel durchgeführten Bachelorarbeit ein Entwurf eines entsprechenden Prüfprotokolls erarbeitet [17].

3.5 Mögliche Fehlerfälle

Um ein Konzept für ein Prüfgerät zur Überprüfung der Einhaltung der Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag bzw. sämtlicher Normen und Sicherheitsvorschriften erstellen zu können, müssen eingangs mögliche Betriebszustände, aber insbesondere auch mögliche Fehlerfälle erörtert werden.

Folgende Fehlerzustände sind hierbei von besonderer Bedeutung:

a) *Unterbrechung sämtlicher Signalleitungen*

Im Falle einer Signalleitungsunterbrechung zwischen Elektrofahrzeug und DC-Ladestation kann die Kommunikation zwischen diesen nicht mehr ordnungsgemäß erfolgen und die Ladestation muss den Ladevorgang nach [4] bzw. [8] beenden.

b) *Unterbrechung der DC-Leistungsverbindungen*

Um die Gefahr des Auftretens von unzulässigen Berührungsspannungen sowie eines Elektrobrandes zu minimieren muss die DC-Ladestation bei einer Leitungsunterbrechung eines DC-Leistungsleiters oder der beiden DC-Leistungsleiter die DC-Ladespannung umgehend abregeln und den Ladevorgang beenden.

c) *Unterbrechung des PE-Leiters*

Das Gesamtsystem bestehend aus einer DC-Ladestation verbunden mit einem Elektrofahrzeug stellt grundsätzlich ein IT-System mit Isolationsüberwachung und Abschaltung dar (siehe Kapitel 3.3). Zur Gewährleistung der Funktion der Isolationsüberwachung des Systems sowie zum Potenzialausgleich zwischen EVCS und EV muss eine (während des Ladevorganges) ständige Verbindung mittels Schutzpotenzialausgleichsleiter sichergestellt werden. Demzufolge bzw. gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4] muss eine Ladestation einen Ladevorgang im Falle einer PE-Leiterunterbrechung umgehend abbrechen.

d) *Erdschluss (ES)*

Zur Vermeidung gefährlicher Berührungs- bzw. Schrittspannungen ist eine Beendigung eines Ladevorganges im Falle eines Erdschlusses (PE gegen DC+ oder DC-) zwingend erforderlich.

e) *Kurzschluss (KS)*

Ein Kurzschluss zwischen DC+ und DC- muss umgehend erkannt bzw. abgeschaltet werden. Einerseits, um Elektrobrände zu verhindern und andererseits, um eine Beschädigung der Ladestation sowie des Elektrofahrzeuges, im Speziellen des Hochvolt-Akkumulators (aufgrund sehr hoher Kurzschlussströme kann es zum Auslösen der im Akkupack verbauten DC-Sicherungselemente kommen), zu vermeiden.

f) *Simulationen eines Störlichtbogens (SLB) in einer fehlerhaften Leitung*

Ein Längslichtbogen in einer DC-Leitung sowie ein Querlichtbogen zwischen beiden DC-Leitungen muss erkannt werden und zu einer umgehenden Beendigung des Ladevorganges führen, um einen möglichen Elektrobrand verhindern zu können.

Anmerkung: Weitere Ausführung hinsichtlich zu erwartender Fehlerfälle findet man in [25].

Die folgende Abbildung 7 gibt einen Überblick über die zuvor erläuterten Fehlerfälle.

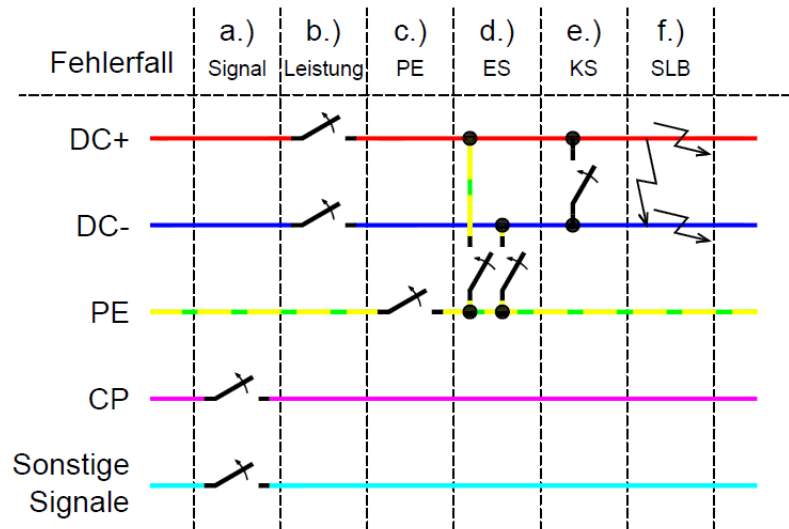


Abbildung 7: Übersicht Fehlerfälle DC-Ladestation

3.6 Konzept eines Prüfgerätes

Die im vorigen Abschnitt 3.5 erläuterten Betriebs- bzw. Fehlerzustände dienen als Basis zur Entwicklung eines Konzepts eines Prüfgerätes zur Durchführung von Überprüfungen von DC-Ladestationen. Unter Berücksichtigung einschlägiger Normen und Vorschriften zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag sollen mit einem solchen Prüfgerät verschiedene Prüfroutinen hinsichtlich Fehlerspannungen, Leitungsunterbrechungen, maximal zulässigen Abschaltzeiten, auftretenden Strömen, Spannungen bzw. Leistungen sowie Funktionalität etc. ermöglicht werden.

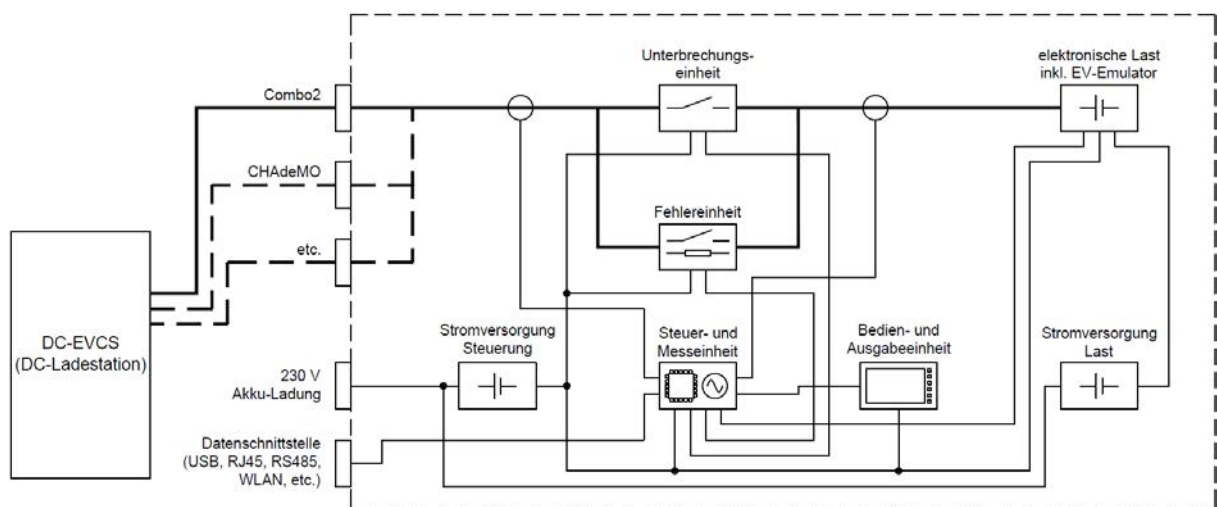


Abbildung 8: Schema eines Prüfgerätes für DC-Ladestationen [5]

Abbildung 8 zeigt ein mögliches Schema eines solchen Prüfgerätes. Links erkennt man eine zu überprüfende DC-Ladestation (DC-EVCS), rechts (großes, strichliertes Rechteck) das Übersichtsschema des Prüfgerätes an sich. Zwischen EVCS und Prüfgerät sind die sich derzeit vorwiegend am Markt befindenden Ladesteckverbinder (CCS/Combo2 und CHAdeMO) dargestellt. Das Konzept des Prüfgerätes lässt jedoch Raum für eine mögliche Weiterentwicklung der Steckverbinder-Technologien.

Im Schema erkennt man des Weiteren folgende Blöcke:

- *Unterbrechungseinheit*
Simulation von Unterbrechungen sämtlicher elektrischer Verbindungen (Signalleitungen, Leistungsleitungen, PE-Leiter).
- *Fehlereinheit*
Simulation von Erdschlüssen bzw. eines Kurzschlusses.
- *Elektronische Last inkl. EV-Emulator*
Simulation des Hochvolt-Akkumulators eines Elektrofahrzeuges sowie der gesamten Kommunikation zwischen Fahrzeug und Ladestation.
- *Stromversorgung Last*
Akkumulator bzw. Aggregat zur Versorgung der elektronischen Last.
- *Stromversorgung Steuerung*
Steuerungsstromversorgung durch Akkumulator.
- *Steuer- und Messeinheit*
Sämtliche Funktionseinheiten zur Steuerung des gesamten Prüfgerätes sowie zur Aufzeichnung der verschiedensten Messgrößen.
- *Bedien- und Ausgabereinheit*
Sämtliche Funktionseinheiten zur Bedienung des Prüfgerätes sowie zum Datentransfer von Software/Firmware, Messdaten, Prüfprotokollen, etc.

3.7 Messverteiler

Um die in 3.5 beschriebenen Fehlerfälle in einer Versuchsumgebung zu simulieren wurde im Rahmen dieser Masterarbeit ein Messverteiler zur qualitativen Erfassung und Aufzeichnung sämtlicher Kommunikationssignalverläufe, Spannungen, Ströme sowie Schaltzeitpunkte entwickelt und aufgebaut. Dieser mobil ausgeführte Messverteiler dient als Schnittstelle zwischen Elektrofahrzeug und DC-Ladestation. Er ermöglicht aufgrund des gewählten Konzepts eine fernsteuerbare und damit für das Messpersonal sichere Bedienung aus entsprechender Entfernung. In Abbildung 9 ist der grundsätzliche Messaufbau bestehend aus einer DC-Ladestation, des Messverteilers sowie eines Elektrofahrzeuges dargestellt.

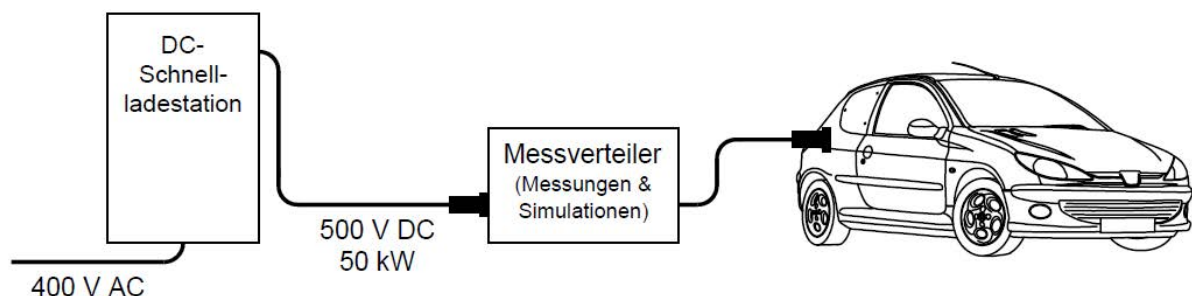


Abbildung 9: Prinzipieller Messaufbau (EVCS, Messverteiler, EV)

Die folgenden Abbildungen zeigen den fertig aufgebauten und getesteten Verteiler, einerseits von außen samt Zubehör sowie andererseits bei geöffneten Türen von innen.



Abbildung 10: Messverteiler ① samt Zubehör (Leitung für kabelgebundene Fernbedienung ②, Ladeleitungsgarnituren ③, Messbox ④, Fernbedienung ⑤)

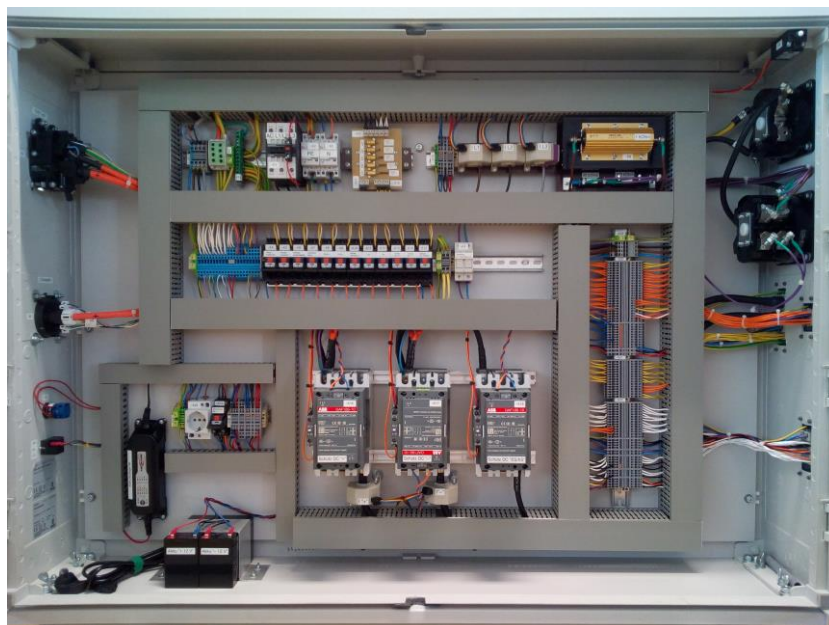


Abbildung 11: Messverteiler Innenansicht

3.8 Messergebnisse

Mit dem in Kapitel 3.7 beschriebenen Messverteiler sind am 07.11.2017 Messungen an einer DC-Ladestation durchgeführt worden. Im Zuge dieser Messungen sind, mit Ausnahme des Störlichtbogens, alle in Kapitel 3.5 beschriebenen Fehlerfälle simuliert worden.

3.8.1 Fehlerfreie DC-Ladevorgänge

Zur Funktionskontrolle des gesamten Messaufbaus sind fehlerfreie Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen gemessen und analysiert worden. Die Eckdaten zu den durchgeführten Messungen (Ladestationstyp, Elektrofahrzeugtypen, Datum, Abschaltzeiten, etc.) sowie sämtliche weitere Diagramme befinden sich im Anhang dieser Arbeit (Kapitel 8.1)

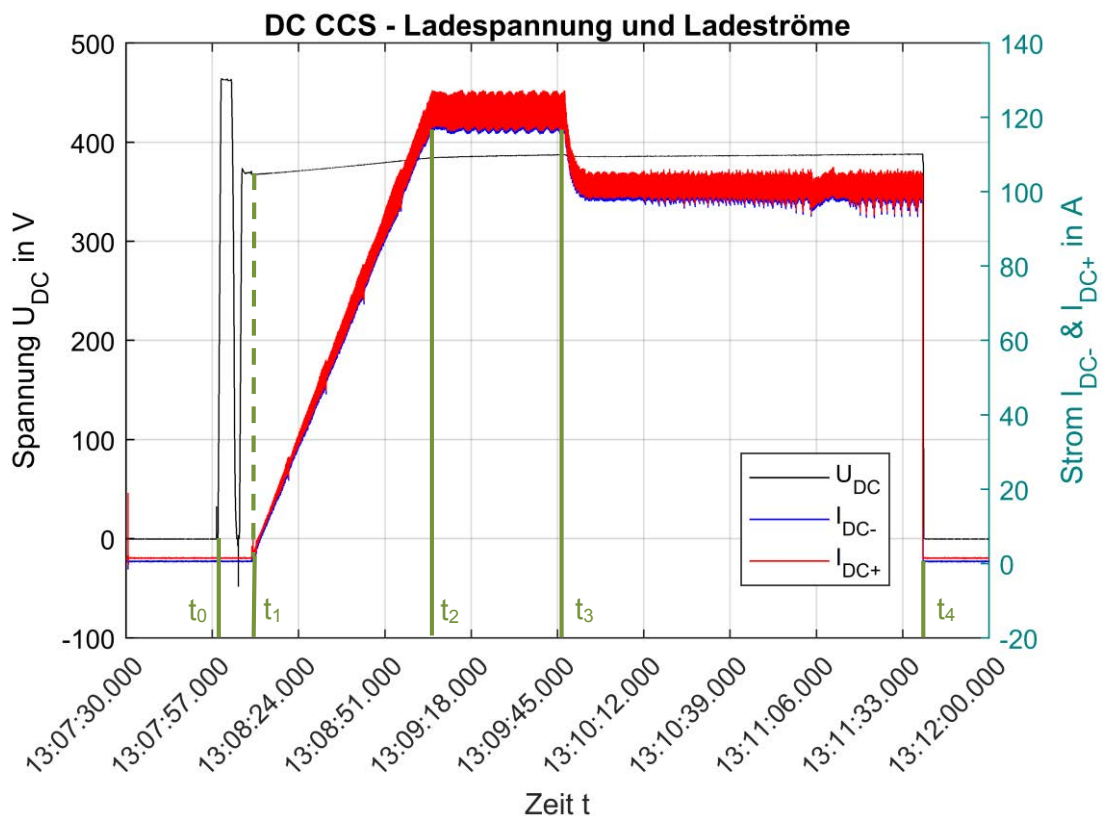


Abbildung 12: CCS Ladevorgang DC (fehlerfreier Zustand), Ladespannung & Ladeströme (vgl. [5])

Abbildung 12 zeigt den zeitlichen Verlauf der Ladegleichspannung U_{DC} (linke Ordinate) sowie der zugehörigen Gleichströme I_{DC-} bzw. I_{DC+} (rechte Ordinate) einer fehlerfreien elektrischen Gleichstrombelastung eines Elektrofahrzeuges nach Ladebetriebsart 4 gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2012-03-01 [4] (Combined Charging System, CCS, vgl. Anhang CC aus ÖVE/ÖNORM EN 61851-23:2014-12-01 [8]). Am Beginn des Ladevorganges ($t_0 \approx 13:07:57$) lässt sich eine steil ansteigende, rechteckige Spannungsspitze mit einem Maximalwert von $U_{DC,max} \approx 460$ V erkennen welche auf ein Handshake-Verfahren zwischen Elektrofahrzeug und DC-Ladestation sowie eine damit verbundene Isolationsprüfung der

Ladeleitung schließen lässt. Die Gleichspannung steigt im weiteren zeitlichen Verlauf ausgehend von $U_{DC,0} \approx 370 \text{ V}$ langsam rampenförmig bis auf $U_{DC,1} \approx 390 \text{ V}$ an und verharrt bei diesem Spannungswert bis zur Beendigung des Ladevorganges. Hinsichtlich des Ladegleichstromes ist nach erfolgtem Handshake ein stetiger, rampenförmiger Anstieg ab $t_1 \approx 13:08:10$ auf einen Maximalwert von $I_{DC+,max} \approx 120 \text{ A}$ bei $t_2 \approx 13:09:00$ zu erkennen (dieser Zeitraum ist deckungsgleich mit dem rampenförmigen Spannungsanstieg). Im Bereich von t_2 bis $t_3 \approx 13:09:45$ liegt der Ladestrom konstant bei $I_{DC+,1} \approx 120 \text{ A}$, ab dem Zeitpunkt t_3 reduziert die Ladestation den Strom auf $I_{DC+,2} \approx 100 \text{ A}$ welcher bis ans Ende des Ladevorganges (bei $t_4 \approx 13:11:40$) beibehalten wird. (vgl. [5])

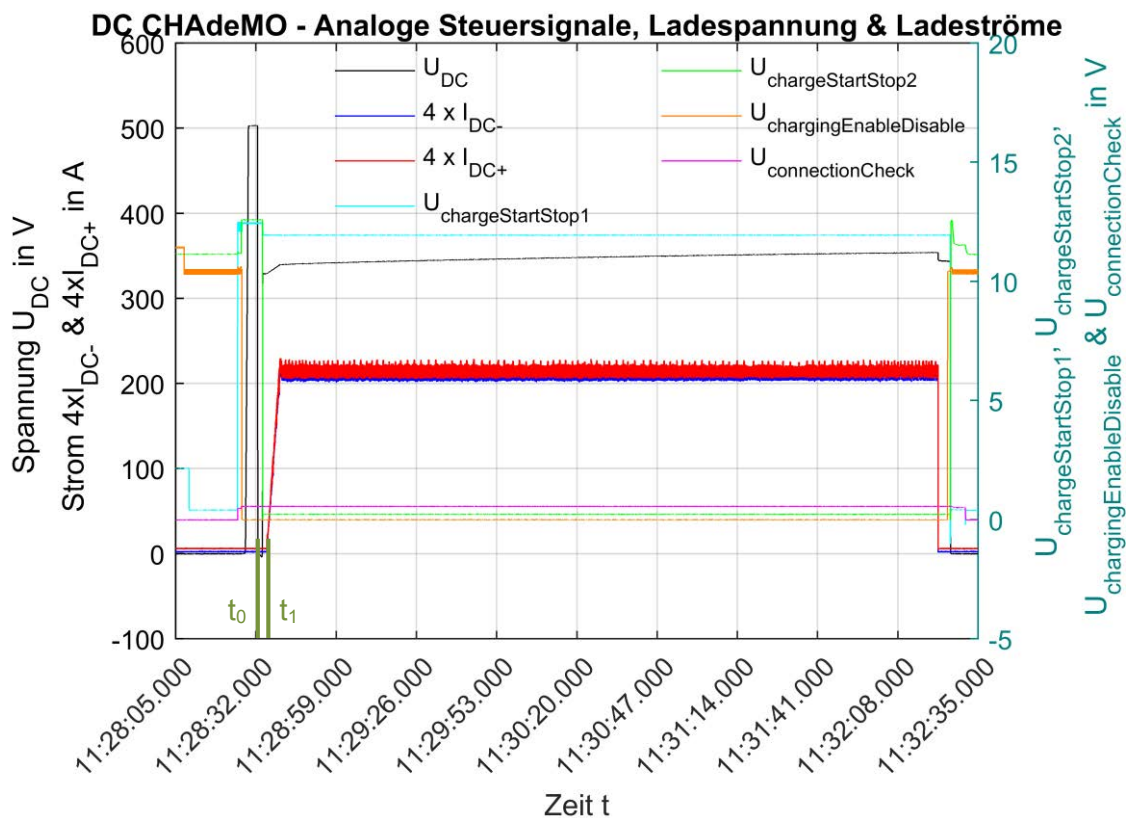


Abbildung 13: CHAdeMO Ladevorgang DC (fehlerfreier Zustand), Ladespannung, Ladeströme & Steuersignale (vgl. [5])

In Abbildung 13 hingegen wird ein Ladevorgang nach CHAdeMO-Standard (vgl. ÖVE/ÖNORM EN 61851-23:2014-12-01, Anhang AA [8]) hinsichtlich den zeitlichen Verläufen der auftretenden Gleichspannung U_{DC} , dem Gleichstrom I_{DC-} bzw. I_{DC+} sowie sämtlicher analoger Steuersignale dargestellt. Es ist dabei zu beachten, dass der Strom auf der linken Ordinate jeweils auf dessen vierfachen Wert skaliert wurde. Ebenso wie bei dem zuvor beschriebenen Ladevorgang nach CCS Standard kann auch hier aufgrund der noch vor dem Start des eigentlichen Ladevorganges bei $t_0 \approx 11:28:32$ auftretenden Spannungsspitze mit $U_{DC,max} \approx 500 \text{ V}$ auf ein Handshake zwischen EVCS und EV sowie auf eine Isolationsprüfung der Ladeleitung geschlossen werden. Hierbei ist ebenfalls wieder ein rampenförmiger Spannungs- sowie Stromanstieg im Anfangsbereich des Ladevorganges ab $t_1 \approx 11:28:40$ zu erkennen. Die Spannung steigt während des gesamten Ladevorganges

stetig von $U_{DC,0} \approx 340 \text{ V}$ bis zu einem Maximalwert von $U_{DC,1} \approx 350 \text{ V}$. Im Vergleich zum CCS Ladevorgang bleibt der Ladestrom jedoch konstant bei einem Wert von $I_{DC+} \approx 200 / 4 \text{ A} = 50 \text{ A}$. Zusätzlich sind die zeitlichen Verläufe der Steuersignale zu erkennen, auf diese wird jedoch nicht im Detail eingegangen. (vgl. [5])

3.8.2 Fehlerbehaftete DC-Ladevorgänge

Im Gegensatz zu den in 3.8.1 beschriebenen fehlerfreien Ladevorgängen werden im Folgenden Beispiele für fehlerbehaftete DC-Ladevorgänge von Elektrofahrzeugen betrachtet.

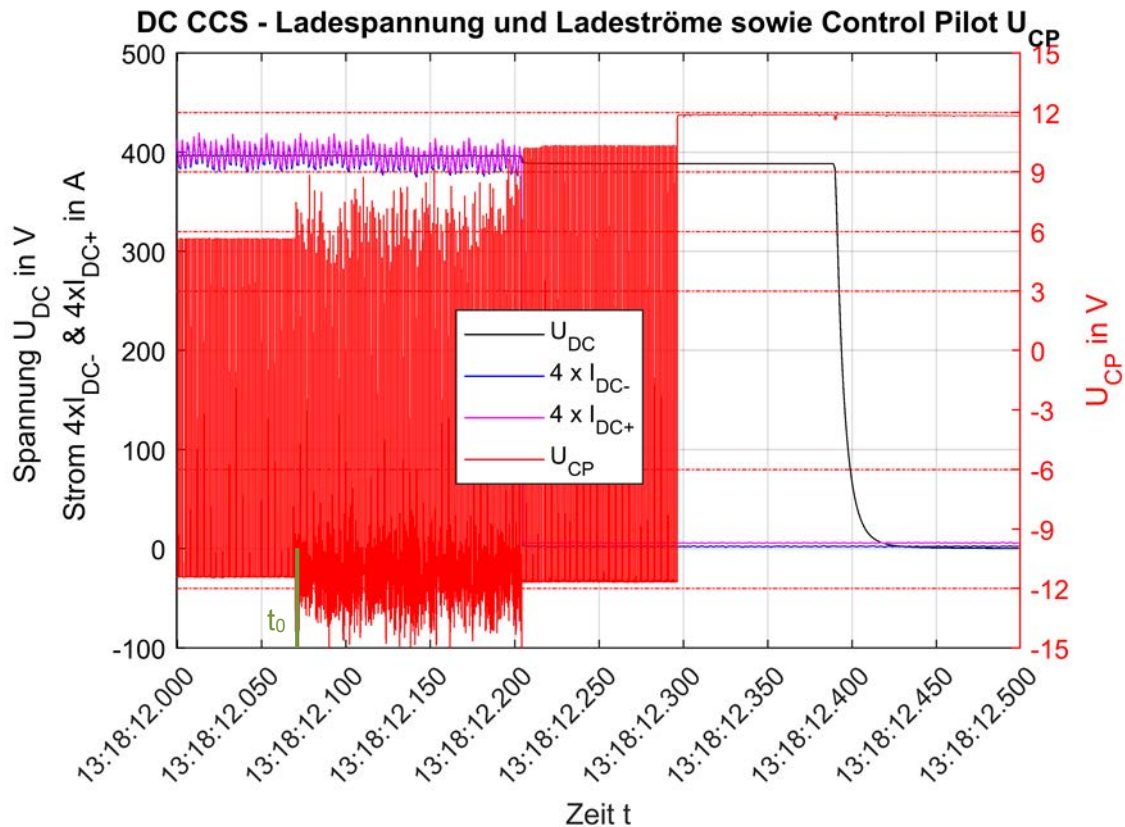


Abbildung 14: CCS Ladevorgang DC (Unterbrechung PE-Leiter), Ladespannung, Ladeströme & Control-Pilot-Signal (vgl. [5])

Bei Abbildung 14 handelt es sich um den zeitlichen Verlauf der Ladegleichspannung U_{DC} , der zugehörigen Ladegleichströme (I_{DC-} und I_{DC+} , jeweils um den Faktor 4 skaliert) sowie des Control Pilot Signals U_{CP} im Falle einer bewussten Unterbrechung des PE-Leiters (mit Hilfe des in Kapitel 3.7 dokumentierten Messverteilers) während eines aktiven DC-Ladevorganges nach CCS Standard (Ladebetriebsart 4 gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61851-1:2010-01-01 [4]). Das Control Pilot Signal wird über den CP-Leiter übertragen und auf PE bezogen. Aufgrund dieses PE-Bezugs kann der Zeitpunkt des Auftretens der Störungen im Verlauf von U_{CP} $t_0 \approx 13:18:12,070$ dem Fehlereintrittszeitpunkt $t_{PE,aus}$ gleichgesetzt werden. (vgl. [5])

Die folgende Abbildung 15 zeigt den selben DC-Ladevorgang wie Abbildung 14, jedoch zur übersichtlicheren Darstellung ohne U_{CP} .

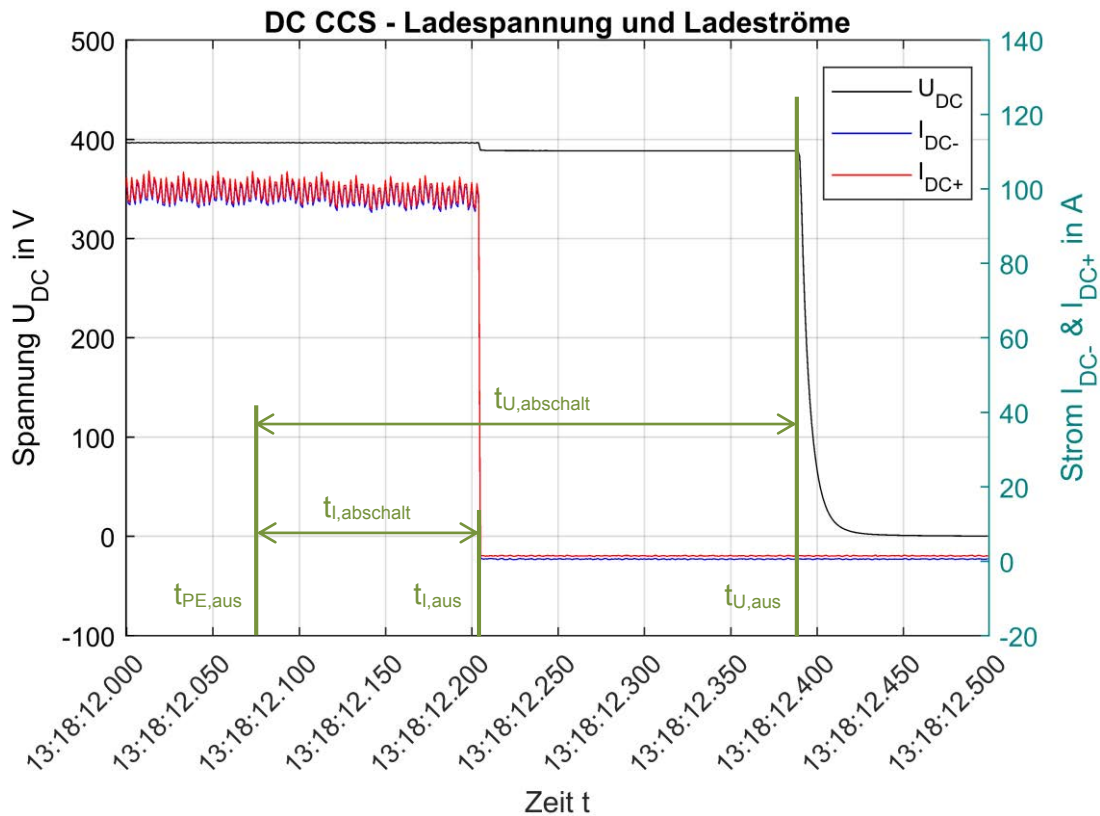


Abbildung 15: CCS Ladevorgang DC (Unterbrechung PE-Leiter), Ladespannung & Ladeströme (vgl. [5])

Wie bereits in Abbildung 14 aufgezeigt wird, ist der Zeitpunkt des Fehlereintrittes $t_0 = t_{PE,aus} \approx 13:18:12,070$. Des Weiteren lassen sich noch der Zeitpunkt des Abregelns des Gleichstromes $t_{i,aus} \approx 13:18:12,204$ sowie der Beginn der Abregelung der Gleichspannung $t_{U,aus} \approx 13:18:12,390$ ermitteln. Aus der Differenzbildung ergibt sich die Abschaltzeit für den Strom zu $t_{i,abschalt} = t_{i,aus} - t_{PE,aus} \approx 134$ ms sowie die Abschaltzeit für die Spannung zu $t_{U,abschalt} = t_{U,aus} - t_{PE,aus} \approx 320$ ms. Das bedeutet, dass die betrachtete DC-Ladestation im Falle einer Unterbrechung des Schutzerdungsleiters nach 134 ms mit der Unterbrechung des Ladevorganges in Form einer Abregelung des Ladegleichstromes beginnt. 320 ms nach Fehlereintritt wird mit der Abregelung der Ladegleichspannung begonnen. (vgl. [5])

Eine detaillierte Auswertung weiterer untersuchter Fehlerfälle ist in Form von zeitlichen Spannungs-, Strom- und Signalverläufen aus dem Anhang gegenständlicher Arbeit zu entnehmen. (Kapitel 8.1)

Beim in ÖVE/ÖNORM EN 61851-23:2014-12-01 Anhang AA [8] beschriebenen CHAdeMO-Ladeverfahren, im Speziellen in Abbildung 16 (entspricht Bild AA.2 aus [8]), werden zwei Bezeichnungen verwendet: Einerseits wird die Abkürzung PE (protective earth, Schutz Erde) verwendet, andererseits FG (functional ground, Funktionserde). Die Diskussionen diesbezüglich sind in den internationalen Normengremien noch nicht gänzlich abgeschlossen.

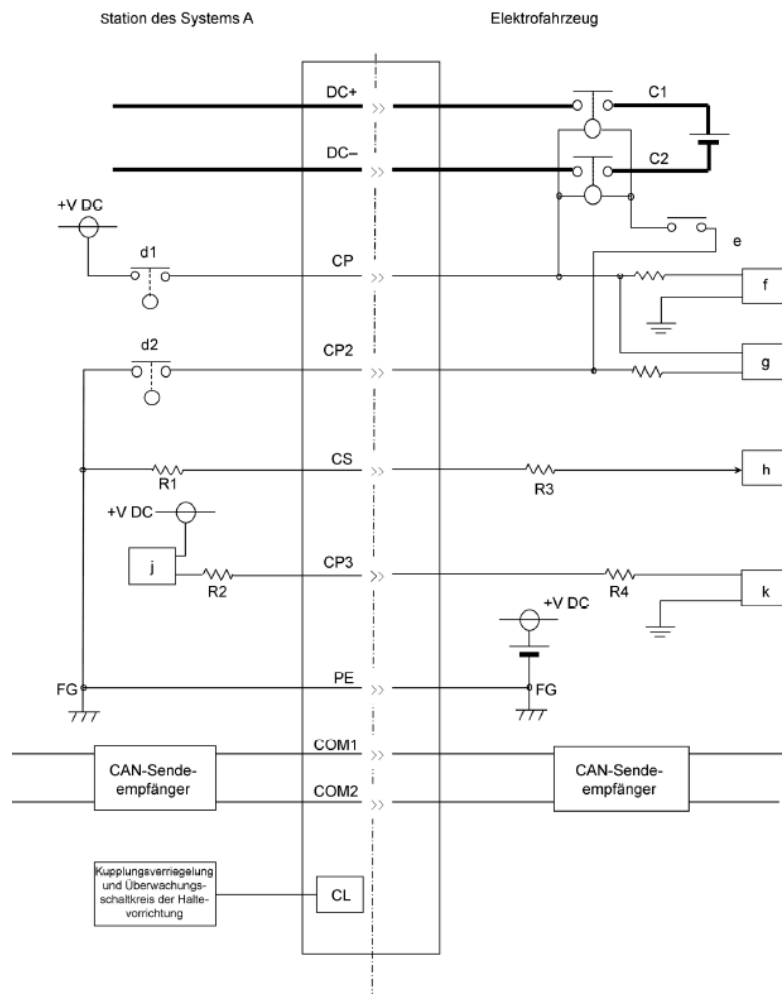


Abbildung 16: Schnittstellenschaltung zur Ladesteuerung einer Station des Systems A (Bild AA.2 aus [8])

4 Erdungsanlagen von DC-Ladestationen

Eine wesentliche Grundlage einer Vielzahl an Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag bildet die (Schutz-/Funktions-)Erdung eines Bauwerkes bzw. eines Objektes und in weiterer Folge einer elektrischen Anlage sowie der damit in Zusammenhang stehende (Schutz-/Funktions-)Potenzialausgleich. Im Detail dient die Gesamtheit der Erdungs- bzw. Potenzialausgleichsanlage als Basis für den Schutzpotenzialausgleich sowie als Ableiteinrichtung im Falle einer vorhandenen Blitzschutzanlage. Zur Bewältigung dieser mannigfaltigen Aufgaben ist die normenkonforme Projektierung sowie die Errichtung einer Erdungsanlage von entscheidender Bedeutung. Dieses Kapitel der Arbeit soll einerseits einen allgemeinen Überblick über das Thema Erdungsanlagen vermitteln, andererseits aber auch speziell auf das Thema Erdungsanlagen von DC-Ladestationen für Elektrofahrzeuge eingehen.

4.1 Rechtliche und normative Grundlagen

Die rechtliche Grundlage sämtlicher elektrotechnischer Belange bildet in Österreich das Elektrotechnikgesetz 1992 (ETG 1992) idF BGBl. I Nr. 27/2017 [9]. In dieser wird auch eine Erdungsanlage begrifflich als elektrotechnische Anlage definiert. Diesem Verwaltungsgesetz untergeordnet steht die Elektrotechnikverordnung 2002 (ETV 2002) idF BGBl. II Nr. 229/2014 [11], welche sämtliche verbindliche Elektrotechnische Sicherheitsvorschriften und Vorschriften über Normalisierung und Typisierung (SNT-Vorschriften) zusammenfasst. Hinsichtlich Erdungsanlagen im Niederspannungsbereich (Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V) haben zum Zeitpunkt des Erstellens dieser Arbeit folgende Normen SNT-Vorschriften-Status:

- ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2000-03-01 [2] samt Änderungen bis A4:2009-04-01
„Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)“
- ÖVE/ÖNORM E 8014-1:2006-08-01 [26]
„Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Begriffe“
- ÖVE/ÖNORM E 8014-2:2006-08-01 [27]
„Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Teil 2: Fundamenterder“
- ÖVE/ÖNORM E 8014-3:2006-08-01 [28]
„Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Teil 3: Besonderheiten von Erdungsanlagen in Gebäuden mit speziellen EMV-Anforderungen der informationstechnischen Einrichtungen“

Aufgrund der Tatsache, dass der Bereich Blitzschutz von Gebäuden und Bauten unmittelbar mit dem Bereich der Erdung in Zusammenhang steht, sei hier auch noch die gemäß ETV 2002 idF BGBl. II Nr. 229/2014 [11] verbindlich anzuwendende ÖVE/ÖNORM EN 62305-3:2008-01-01 [29] zu erwähnen, welche sich mit dem Schutz von



baulichen Anlagen und Personen hinsichtlich Gefährdung durch Einwirkung atmosphärischer Entladungen beschäftigt.

Ergänzend seien auch noch die ÖVE/ÖNORM E 8384:2007-05-01 [30] (besitzt SNT-Vorschrift-Status) genannt, welche sich mit Erdungen von Wechselspannungsanlagen mit Nennspannungen über 1 kV befasst sowie die Reihe ÖVE/ÖNORM EN 62305 angeführt. Grund dafür ist, dass in vielen Fällen Erdungsanlagen einerseits von Nieder-, Mittel- und/oder Hochspannungsanlagen im gegenseitigen Nahbereich zueinander situiert sind und folglich miteinander interagieren sowie andererseits auch der Blitzschutz der Anlage aus Gründen des Arbeitnehmerinnen Schutzgesetzes (ASchG) [31] erforderlich ist.. Somit sind auch die ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [18], welche sich mit Starkstromanlagen mit einer Nennwechselspannung über 1 kV befasst sowie die Reihe ÖVE/ÖNORM EN 62305, anzuwenden. Diese unterliegen ebenfalls dem SNT-Vorschriften-Status.

Es sei erwähnt, dass sämtliche Normen mit SNT-Vorschriften-Status in taxativer Auflistung in der ETV 2002 idF BGBl. II Nr. 229/2014 ex lege verbindlich sind. Anzumerken ist, dass gegebenenfalls die Anwendung einer jüngeren Norm, welche den aktuellen Stand der Technik repräsentiert, jedoch gesetzlich noch nicht für verbindlich erklärt wurde, grundsätzlich rechtlich unzulässig ist³. Folglich ist zur Zeit die ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [18] gemäß ETV 2002 idF BGBl. II Nr. 229/2014 verbindlich anzuwenden. In der Zwischenzeit wurde diese durch die ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] und die ÖVE/ÖNORM EN 61936-1:2011-12-01 ersetzt⁴. Somit repräsentieren die beiden letztgenannten den aktuellen Stand der Technik, besitzen jedoch keinen SNT-Vorschriften-Status und sind somit laut gegenwärtiger Gesetzgebung nicht verbindlich (Anmerkung: Die ÖVE/ÖNORM EN 61936-1:2011-12-01 wurde bereits wieder durch die neuere ÖVE/ÖNORM EN 61936-1:2015-01-01 [32] ersetzt.) Um dieser Problematik Einhalt zu gebieten, wird versucht, sämtliche Projektierungs- und Ausführungsschritte immer auf das gesamte, theoretisch anwendbare Spektrum der Normung und Standardisierung (d. h. dem Stand der Technik entsprechen) auszulegen.

³ Grundsätzlich besteht jedoch gemäß Elektrotechnikgesetz die Möglichkeit eine Ausnahmegewilligung beim zuständigen Ministerium zu erwirken.

⁴ Dabei ist zu beachten, dass beide Normen nicht den vollen Regelungsbereich der ÖVE/ÖNORM 8383:2000-03-01 [18] abdecken, daraus ergeben sich in der Praxis eine Reihe von Problemen.



4.2 Definitionen

Um eine einheitliche Wortwahl zu gewährleisten und Missverständnisse auszuschließen beinhaltet die folgende Auflistung die Definitionen der wesentlichsten Begriffe zum Thema Erdung aus den Normen ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] und ÖVE/ÖNORM E 8014-1:2006-08-01 [26].

Bezugserde (ferne Erde)

„Teil der Erde, insbesondere der Erdoberfläche, außerhalb des Einflussbereiches eines Erders bzw. einer Erdungsanlage, in welchem zwischen beliebigen Punkten keine merklichen, vom Erdfehlerstrom herrührende Spannungen auftreten“ [2]

Erder

„leitfähiges Teil, das in das Erdreich eingebettet ist und damit in leitender Verbindung steht, oder ein solches, das in Beton eingebettet ist, der mit dem Erdreich großflächig leitend in Berührung steht

ANMERKUNG *Im Falle eines Fundamenterders wirkt die erdfühlige Oberfläche des Betonkörpers als Erder.“ [2]*

Fundamenterder

„Erder, die in Beton eingebettet sind, der mit der Erde großflächig leitend in Berührung steht

ANMERKUNG: *Durch das Einbetten in zweckmäßig gewähltem Beton ist eine lange Lebensdauer des Werkstoffes zu erwarten.“ [26]*

Erdungsanlage

„örtlich abgegrenzte Gesamtheit miteinander leitend verbundener Erder und/oder in gleicher Weise wirkender Metallteile (zB Mastfüße (sic!), Bewehrungen, metallene Kabelmäntel) und Erdungsleitungen“ [2]

Erdungsleitung

„Verbindungsleitung zwischen einem zu erdenden Anlagenteil und einem Erder, soweit sie außerhalb der Erde oder isoliert in der Erde verlegt ist

ANMERKUNG *Hierfür wird auch die Bezeichnung Erdungsleiter verwendet.“ [2]*

Anschlussfahne

„Verbindungsstück zwischen dem Fundamenterder und der Potenzialausgleichsschiene für den Hauptpotenzialausgleich, oder Verbindungsstück zum Anschluss der Ableitung einer Blitzschutzanlage, eines Anschlussteiles oder sonstiger Konstruktionsteile aus Metall an den Fundamenterder

ANMERKUNG: *Eine Anschlussfahne kann auch in obere Stockwerke weitergeführt sein.“ [26]*



spezifischer Erdwiderstand

„spezifischer elektrischer Widerstand des Erdreiches

ANMERKUNG Der spezifische Erdwiderstand wird in $\frac{\Omega \cdot m^2}{m} = \Omega \cdot m$ angegeben und stellt den Widerstand eines Erdwürfels von 1 m Kantenlänge zwischen zwei gegenüberliegenden Würfelflächen dar.“ [2]

Ausbreitungswiderstand

„Widerstand zwischen einem Erder und der Bezugserde“ [2]

Erdungswiderstand

„Summe von Ausbreitungswiderstand des Erders und Widerstand der Erdungsleitung“ [2]

Potenzialsteuerung

„beabsichtigte Beeinflussung des Erdpotenzials, insbesondere des Erdoberflächenpotenzials, durch Erder“ [2]

Potenzialausgleich

„Ausgleichen von Potenzialen zwischen Körpern und fremden leitfähigen Teilen, gegebenenfalls auch untereinander mittels PA-Leiter“ [2]

Haupterdungsschiene (Potenzialausgleichsschiene – PAS); Haupterdungsklemme

„Klemme bzw. Schiene, die die elektrische Verbindung mehrerer Leiter zu Erdungszwecken ermöglicht“ [2]

Netzsystem

Laut ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] wird ein elektrisches Netzsystem wie folgt definiert:

„Gesamtheit aller Leitungen, Kabel und sonstigen Anlagen, von der Stromquelle bis zu den Verbrauchsmitteln, einschließlich aller Arten von Erdverbindungen

Es wird unterschieden nach

- der Stromart (Gleichstrom, Wechselstrom),
- der Zahl der aktiven Leiter und
- der Art der Erdverbindung.“

Die Bezeichnung der unterschiedlichen Systeme erfolgt mittels Kurzzeichen für die entsprechende Art der Erdung der Stromquelle (erster Buchstabe), die Art der Erdung der Körper der elektrischen Betriebsmittel (zweiter Buchstabe) sowie die Anordnung des Neutralleiters und des PE-Leiter. Dabei verwendete Buchstaben sind T, I, N, S und C. Die sich daraus zusammensetzenden Bezeichnungen lauten TN-S-, TN-C-, TN-C-S-, TT- und IT-System. Eine detailliertere Beschreibung der einzelnen Systeme ist der ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] zu entnehmen.

Natürliche Erder

„mit der Erde oder mit Wasser unmittelbar oder über Beton in Verbindung stehende Metallteile, deren ursprünglicher Zweck nicht die Erdung ist, die aber als Erder wirken.

ANMERKUNG Hierzu gehören: Rohrleitungen, Spundwände, Betonbewehrungen, Stahlteile von Gebäuden usw.“ [2]

Globales Erdungssystem

„Ein durch die Verbindung von örtlichen Erdungsanlagen hergestelltes Erdungssystem, das sicherstellt, daß (sic!) durch den geringen gegenseitigen Abstand dieser Erdungsanlagen keine gefährlichen Berührungsspannungen auftreten. Solche Systeme bewirken eine Verteilung der Erdfehlerströme in der Weise, daß (sic!) die Erdungsspannung der örtlichen Erdungsanlage reduziert wird. Solch ein System bildet eine Quasiäquipotentialfläche.“ [18]

Anmerkung: Weitere Definitionen vieler allgemeiner Begriffe hinsichtlich elektrischer Anlagen sind dem Abschnitt 3 der ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] zu entnehmen. Begriffe von Belangen für Erdungsanlagen findet man in Abschnitt 20 ebenda bzw. in Abschnitt 3 der ÖVE/ÖNORM E 8014-1:2006-08-01 [26].

4.3 Einteilung und Arten von Erdern

Erder können grundsätzlich nach deren Lage, deren Form bzw. Profil unterschieden werden. Daraus ergeben sich für die Lage die Begriffe Horizontalerder und Vertikalerder sowie für deren Form bzw. Profil die Begriffe Banderder, Runderder, Rohrerder, Plattenerder und Seilerder. (vgl. ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2])

4.3.1 Horizontalerder

Horizontalerder sind jene *„Erder, die im wesentlichen (sic!) waagrecht in geringer Tiefe eingebracht werden. Sie können zB als Strahlen-, Ring- oder Maschenerder oder als Kombination aus diesen ausgeführt werden.“* (Definition laut [2])

4.3.1.1 Strahlenerder

Bei Strahlenerdern handelt es sich um sternförmig angeordnete Banderder, also Erder beispielsweise aus verzinktem Bandstahl (rechteckigen Querschnittes, typische Abmessungen 30 x 3,5 mm), welche als Oberflächenerder in Tiefen von ca. 0,5 m bis 1,0 m (gemeint ist frostfreie Verlegung) im Erdreich verlegt werden. Damit es zu keinen gegenseitigen Beeinflussungen zwischen den einzelnen Strahlen des Erders kommt soll deren Winkel untereinander 60° nicht unterschreiten. Hintergrund hierfür ist, dass sternförmig verlegte Erder mit kleinem Winkel zueinander ähnlich einer Parallelstruktur angesehen werden können. Mehrere, miteinander verbundene, parallel geführte Erder beeinflussen sich (aufgrund des nicht mehr ausreichend vorhandenen Raumes zur Ausbreitung des Stromes im Erdreich je Einzelerder) – abhängig von den Abständen untereinander – über das elektrische Strömungsfeld im Erdreich gegenseitig in der Stromausbreitung. Daher liegt der tatsächliche Wert des Gesamterdungswiderstandes immer über dem errechneten Wert der

Parallelschaltung einer solchen Anordnung. Zwei im Winkel von 90° gekreuzt und leitend miteinander verbundene Bänder der selben Länge stellen dabei eine Sonderform des Strahlenerders – den Vierstrahlerder – dar. Eine typische Anwendung dessen ist die Ableitung von Blitzströmen bei Leitungsmasten. (vgl. [33])

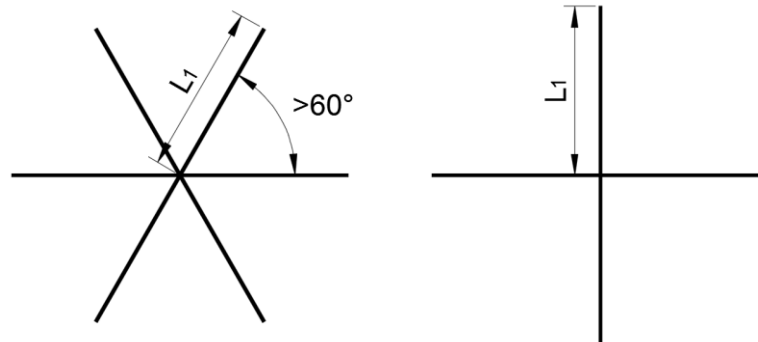


Abbildung 17: Grundriss Strahlenerder mit 60° -Winkel (links), Vierstrahlerder (rechts) (vgl. [33])

Abbildung 17 zeigt schematisch die Anordnungen von Strahlenerder, links einen Strahlenerder mit 60° -Winkel und rechts eine Sonderform, den Vierstrahlerder.

4.3.1.2 Ringerder

Ein ringförmig angeordneter Erder (oft auch nur annähernd ringförmig oder gar rechteckförmig, siehe Abbildung 18) wird als Ringerder bezeichnet. Eine offene oder eine geschlossene Verlegung ist möglich. Anwendung finden Ringerder bei der Potenzialsteuerung für einzelne elektrische Betriebsmittel oder Leitungsmaste und als Teil eines Fundamenterders. Als normativer Verweis seien hierfür beispielsweise die ÖVE/ÖNORM EN 50522:2010-12-01 [19] genannt, welche sich mit der Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV befasst bzw. die Reihe ÖVE/ÖNORM EN 62305 (vgl. [33])

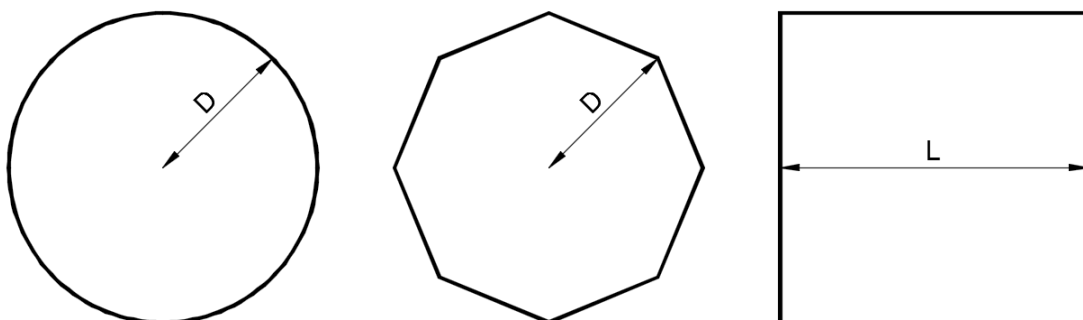


Abbildung 18: Grundriss Ringerder (von links nach rechts: ringförmig, annähernd ringförmig, rechteckförmig)

4.3.1.3 Maschenerder

Im Wesentlichen bildet die Kombination eines Strahlenerders und eines Ringerders einen Maschenerder, welcher sich aus einem Netz aus annähernd gleichmäßig verteilten, rechteckförmigen Maschen zusammensetzt (vgl. [33]). Eine schematische Darstellung eines solchen Maschenerders ist Abbildung 19 zu entnehmen.

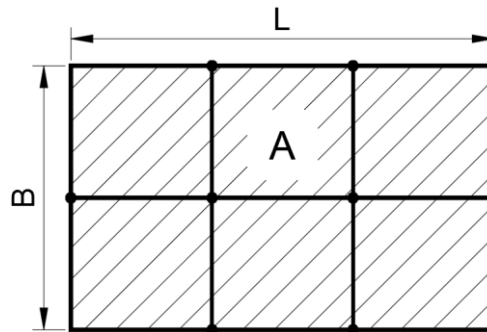


Abbildung 19: Grundriss Maschenerder

4.3.2 Vertikalerder

Vertikalerder sind hingegen „Erder, die im wesentlichen (sic!) lotrecht in größere Tiefen eingebracht werden.“ (Definition laut [2]) Eine oft verwendete Bezeichnung für diese Art eines Erders ist auch Tiefenerder. Dieser wird meist mittels mehrerer, rund 1,5 m langer feuerverzinkter Rohre, Profilstäbe oder Vollstäbe – welche nacheinander in das Erdreich eingebracht und miteinander verbunden werden – ausgeführt. Die Gesamtlänge eines Erders beträgt dabei oft zwischen 7,5 m und 15 m. Der Ausbreitungswiderstand eines Tiefenerders hängt von den entsprechend vorhandenen spezifischen Erdwiderständen der unterschiedlichen Bodenschichten ab. Auch ist auf eine gegenseitige Beeinflussung mehrerer, parallel eingebrachter Tiefenerder Rücksicht zu nehmen. Aufgrund dessen gilt für den Abstand benachbarter Tiefenerder als Mindestmaß die doppelte wirksame Erderlänge. (vgl. [33]) Anmerkung: Der Mindestabstand zweier benachbarter Tiefenerder wird in ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] abweichend zu [33] mit der einfachen wirksamen Länge eines Einzelerders angegeben.

4.3.3 Fundamenterder

Wie in Kapitel 4.2 definiert, handelt es sich bei einem Fundamenterder um einen, in Beton eingebetteten, großflächig mit Erde leitend verbundenen Erder. Die Ausführung als geschlossener Ring ist nach ÖVE/ÖNORM E 8014 2:2006-08-01 [27] vorgeschrieben⁵. Der Fundamenterder hat allseitig von mindestens 5 cm Beton umgeben zu sein und ist aus Rundstahl mit einem Mindestdurchmesser von 10 mm oder Bandstahl mit Mindestabmessungen von 30 x 3 mm auszuführen. Bei größeren Abmessungen eines Fundamentes sind entsprechende Verbindungsleitungen auszuführen, eine maximal zulässige Maschenweite innerhalb des geschlossenen Ringes von 10 x 20 m darf dabei nicht überschritten werden. Vorgaben hinsichtlich detaillierter Ausführung, zu verwendender Materialien, Anschlussfahnen, Verbindungen zur Bewehrung sowie zu anderen elektrischen leitfähigen Einbauten, etc. ist [26], [27] und [28] zu entnehmen.

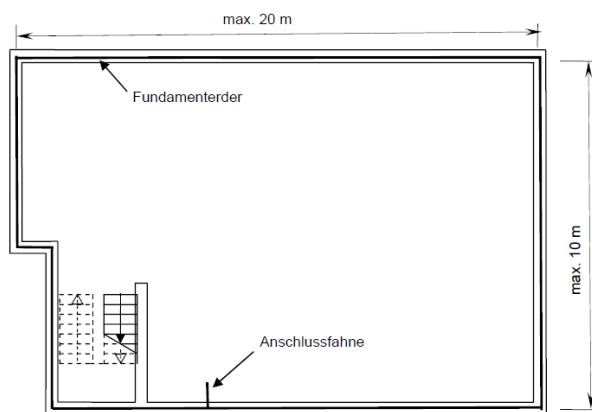


Bild A.1 – Beispiel für die Anordnung des Fundamenterders im Einzelhaus

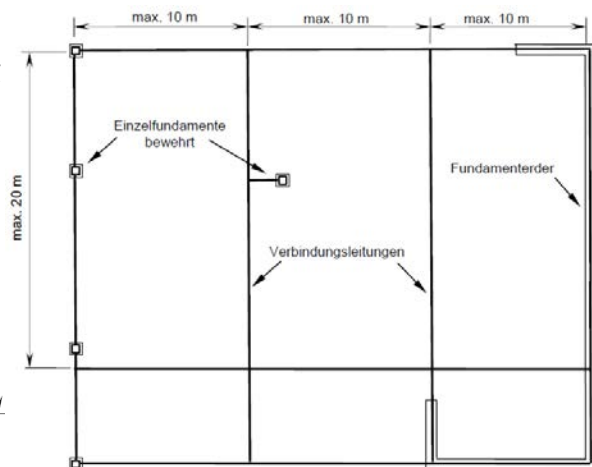


Bild A.2 – Beispiel für die Anordnung des Fundamenterders in einem größeren Gewerbebau (mit Einzelfundamenten)

Abbildung 20: Beispiele für die Anordnung eines Fundamenterders (Bild A.1 und A.2 aus [27])

⁵ Die Normenreihe ÖVE/ÖNORM E 8014 befindet sich gerade in Überarbeitung, dabei werden wesentliche Teile neu beschrieben und an die aktuellen Anforderungen hinsichtlich Funktionalität, Erderwirksamkeit, Betonqualitäten, IKT und Blitzschutz angepasst. Siehe auch DIN 18014:2014-03 [44].

4.3.4 Natürliche Erder

Natürliche Erder sind, wie in Kapitel 4.2 definiert, metallische Teile bzw. Einbauten deren eigentlicher Zweck nicht die Erdung ist. Ergänzend zur Auflistung laut Definition können hier auch noch beispielsweise die natürliche Erderwirkung von Schienen für Bahnanlagen, elektrisch leitfähige Kabelmäntel oder auch metallische Gebäudefassadenelemente aufgezählt werden. Wesentlich ist jedoch, dass die ursprüngliche Funktion sämtlicher erwähnter Objekte bzw. Einbauten nicht durch die Verwendung als natürlicher Erder bzw. durch die Einbindung in eine Erdungsanlage beeinträchtigt werden darf. (vgl. [33])

4.4 Ausbreitungswiderstand unterschiedlicher Erder

Wie in Kapitel 4.2 definiert, handelt es sich beim Ausbreitungswiderstand eines Erders um den Widerstand zwischen diesem Erder und der sogenannten Bezugserde oder fernen Erde, welche sich außerhalb des Einflussbereichs des genannten Erders bzw. jeglicher sonstiger Erdungsanlagen befindet. Mit Hilfe der in der folgenden Tabelle 3 angeführten Formeln kann der jeweilige Ausbreitungswiderstand verschiedener Ausführungsformen von Erdern in guter Näherung ermittelt werden. (vgl. [33])

Tabelle 3: Formeln zur Berechnung des Ausbreitungswiderstandes unterschiedlicher Erder (vgl. [33])

Erderart	Ausbreitungswiderstand	Anmerkung
Banderder	$R_{A,B} \approx \frac{2 \cdot \rho_E}{l} \quad \text{für } l < 10 \text{ m}$ $R_{A,B} \approx \frac{3 \cdot \rho_E}{l} \quad \text{für } l > 10 \text{ m}$	$R_{A,B} = 2 \cdot R_{A,T}$
Plattenerder	$R_{A,P} = \frac{\rho_E}{2 \cdot D}$	$R_{A,P} \approx 1,5 \cdot R_{A,HK}$
Halbkugelerder	$R_{A,HK} = \frac{\rho_E}{\pi \cdot D}$	
Strahlenerder	$R_{A,St} \approx \frac{3 \cdot \rho_E}{l} = \frac{3 \cdot \rho_E}{n \cdot L_1}$ für $L_1 > 3 \text{ m}$ und $\varphi \geq 60^\circ$	vgl. Abbildung 17
Vierstrahlerder	$R_{A,VSt} \approx \frac{2 \cdot \rho_E}{4 \cdot L_1} = \frac{\rho_E}{2 \cdot L_1} \quad \text{für } L_1 < 3 \text{ m}$ $R_{A,VSt} \approx \frac{3 \cdot \rho_E}{4 \cdot L_1} \quad \text{für } L_1 > 3 \text{ m}$	vgl. Abbildung 17 $R_{A,VSt} = R_{A,B}$ mit $l = 4 \cdot L_1$
Ringerder	$R_{A,R} \approx \frac{2 \cdot \rho_E}{\pi \cdot D} \quad \text{für } D < 4 \text{ m}$ $R_{A,R} \approx \frac{3 \cdot \rho_E}{\pi \cdot D} \quad \text{für } D > 4 \text{ m}$	vgl. Abbildung 18 $R_{A,R} = R_{A,B} \approx 1,3 \cdot R_{A,P}$ mit $L = \pi \cdot D$
Maschenerder	$R_{A,M} \approx \frac{\rho_E}{2 \cdot D} \approx \frac{0,5 \cdot \rho_E}{\sqrt{A}}$	vgl. Abbildung 19 $R_{A,M} \approx R_{A,P} \approx 0,8 \cdot R_{A,R}$
Tiefenerder	$R_{A,T} \approx \frac{\rho_E}{l} \quad \text{für } l < 10 \text{ m}$ $R_{A,T} \approx \frac{1,5 \cdot \rho_E}{l} \quad \text{für } l > 10 \text{ m}$	



Formelzeichen zu Tabelle 3:

R_A ...Ausbreitungswiderstand in Ω

l ...Länge des Erders in m

D ...Durchmesser der Kreisfläche (bzw. der auf die Kreisfläche umgerechnete Fläche) und der Halbkugel

ρ_E ...spezifischer Erdwiderstand in Ωm

L_1 ...Länge des Strahles in m

A ...Fläche des vermaschten Erdernetzes in m^2

4.5 Stoßerdungswiderstand vs. effektive Erderlänge

Der Stoßerdungswiderstand wird in der ÖVE/ÖNORM EN 62305-3:2008-01-01 [29] als „*Verhältnis der Scheitelwerte der Erderspannung und des Erderstroms, die im Allgemeinen nicht gleichzeitig auftreten*“ definiert. Im Falle eines Blitzeinschlages in ein Gebäude bzw. in ein Bauwerk ist der wirksame Widerstand, also der Ausbreitungswiderstand eines Horizontal- oder Vertikalerders R_A nicht immer mit diesem sogenannten Stoßerdungswiderstand R_{St} gleichzusetzen. Da solche linienförmigen Erder als Kettenleiter, also als hintereinander geschaltete π -Ersatzschaltungen bzw. Vierpole angesehen werden können, kann sich eine Reduktion der wirksamen Erderlänge ergeben, der Stoßausbreitungswiderstand kann folglich höher als der gemessene bzw. der nach Kapitel 4.4 errechnete Ausbreitungswiderstand werden (vgl. [34]). Weitere Effekte für die Veränderung des Stoßausbreitungswiderstandes gegenüber dem Ausbreitungswiderstand sind das Verdampfen feuchter Schichten während der Blitzstromeinwirkung (R_{St} steigt), Stromverdrängungseffekte während transients Vorgänge (R_{St} steigt), der sogenannte Fritt-Effekt (R_{St} sinkt) und die Ionisation des Bodens während der Blitzstromeinwirkung (R_{St} sinkt). (vgl. [35])



Die reduzierte wirksame Länge eines Erders – die sogenannte effektive Erderlänge – ergibt sich nach [34] bzw. [35] bei Stoßströmen für einen Horizontalerder zu

$$l_{eff} \approx \sqrt{2} \cdot 0,9 \cdot \sqrt{\rho_E \cdot T_r} \approx 1,3 \cdot \sqrt{\rho_E \cdot T_r} \quad (1)$$

und für einen Vertikalerder zu

$$l_{eff} \approx 0,9 \cdot \sqrt{\rho_E \cdot T_r}. \quad (2)$$

Formelzeichen:

l_{eff} ...effektive Länge bzw. maximal wirksame Länge des Erders in m

ρ_E ...spezifischer Erdwiderstand in Ωm

T_r ...Stirnzeit des Blitzstromes in μs

Würde man dennoch die Länge des Erders über die effektive Länge hinaus erhöhen, hätte dies keine weitere Reduktion des Stoßausbreitungswiderstandes zur Folge. (vgl. [34])

4.6 Spezifischer Erdwiderstand

Aufgrund verschiedener Bodenbeschaffenheiten können für die elektrischen Leitfähigkeiten jeweils entsprechende Wertebereiche für den spezifischen Erdwiderstand angenommen werden. Diese sind in der folgenden Tabelle 4 gemäß ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] angegeben.

Tabelle 4: Richtwerte für spezifische Erdwiderstände (Tabelle 20-1 aus [2])

Bodenart	Spezifischer Erdwiderstand ρ_E in Ωm
Moorboden	5 bis 40
Lehm, Ton, Humus	20 bis 200
Sand	200 bis 2500
verwittertes Gestein	meist unter 1000
Granit, Grauwacke, Hartgestein feucht	2000 bis 3000
Bei Fundamentern darf so gerechnet werden, als ob der Leiter im umgebenden Erdreich verlegt wäre. ⁶	

⁶ In neuen Regelwerken wird darauf hingewiesen, dass die Leitfähigkeit des Betons berücksichtigt werden muss.

4.7 Erdungsspannung, unbeeinflusste Berührungsspannung und Schrittspannung

Zur Veranschaulichung der vorkommenden Begriffe am Beispiel eines Halbkugelerders dient Abbildung 21 nach Bild 3-12 aus der ÖVE/ÖNORM E 8001:2010-03-01 [2].

Man erkennt in Abbildung 21

- die Erdungsspannung U_E bzw. EPR,
- die unbeeinflusste Berührungsspannung U_{TP} ,
- Schrittspannung U_S ,
- den Ausbreitungswiderstand R_E ,
- den Erderstrom I_E sowie
- die Schrittweite S .

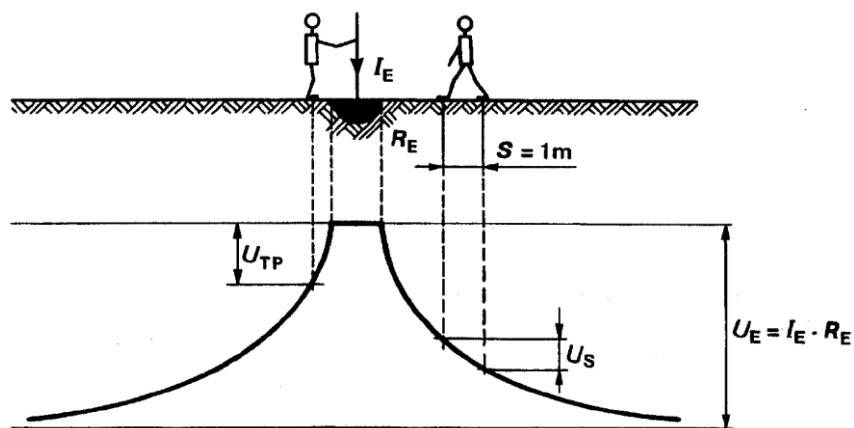


Abbildung 21: Erdungsspannung, unbeeinflusste Berührungsspannung und Schrittspannung (Bild 3-12 aus [2])

Definitionsgemäß ist die Schrittspannung U_S „jener Teil der Erdungsspannung (U_E), der vom Menschen mit einem Schritt von 1 m Länge überbrückt werden kann, wobei der Stromweg über den menschlichen Körper von Fuß zu Fuß verläuft“. [2]

Die sogenannte unbeeinflusste Berührungsspannung U_{TP} hingegen ist „jener Teil der Fehlerspannung U_F , der zwischen gleichzeitig berührbaren leitfähigen Teilen von einem Menschen oder von einem Nutztier überbrückt werden kann (...)“ [2]

Laut Norm ist die Erdungsspannung U_E jene „Spannung die zwischen einer Erdungsanlage und Bezugs Erde auftritt, wenn ein Strom durch die Erdungsimpedanz der Erdungsanlage fließt (siehe Bild 3-12)

Die Erdungsspannung wird mit einem Spannungsmessgerät mit ca. 40 k Ω Innenwiderstand gemessen.“ [2] Die Erdungsspannung wird oft auch als EPR (engl. Earth Potential Rise, Anstieg des Erdpotenziales, Erdpotenzialanstieg) bzw. dessen Verlauf als Oberflächenpotenzial (entlang des Spannungstrichters) bezeichnet.

4.8 Ausführungsbeispiel einer Erdungsanlage einer DC-Ladestation

Anhand des im Folgenden erläuterten Praxisbeispiels einer Erdungsanlage einer DC-Ladestation für Elektrofahrzeuge sollen Möglichkeiten zur Umsetzung der in den vorangegangenen Kapiteln theoretisch behandelten Themen aufgezeigt werden. Im Speziellen wird anhand einer beispielhaften Konfiguration einer DC-Ladestation auf die mit Hilfe eines (in den letzten Jahren am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz entwickelten,) MATLAB⁷-basierten Programmes, genannt OBEIN (kurz für Ohmsche Beeinflussung) berechneten Verläufe und Maximalwerte des/der Oberflächenpotenzials/EPR/Erdungsspannung (Spannungstrichter) sowie der auftretenden Schritt- und Berührungsspannungen eingegangen.

4.8.1 Beispielhafte Konfiguration

Das hier angeführte Beispiel umfasst eine DC-Ladestation, deren Zuleitung, einen vorgelagerten Messwandlerschrank sowie dessen Zuleitung und zwei, für Elektrofahrzeuge vorgesehene Parkplätze (siehe Abbildung 22).

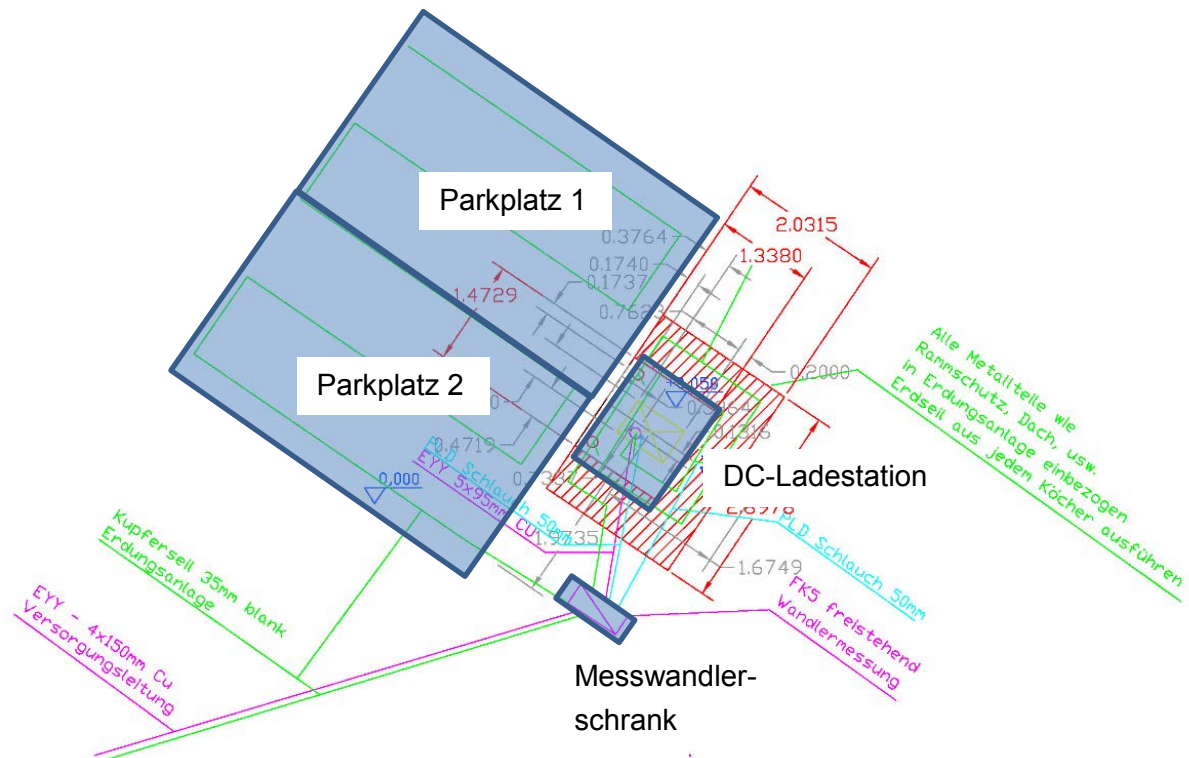


Abbildung 22: Grundriss (EVCS, Messwandlerschrank, Parkplätze, Zuleitungen) (vgl. [36])

⁷ MATLAB, kurz für MATrix LABoratory, ist ein Softwarepaket des US-amerikanischen Unternehmens MathWorks zur mathematischen Problemlösung.

4.8.2 Annahmen

Die Berechnungen für dieses konkrete Beispiel basieren auf folgenden Annahmen:

- Einschichtiges Erdreich
- Gesamtterdungsstrom: 10 A (Bezugsstrom für die Analysen)
- Auflösung: 5 Berechnungspunkte/m

4.8.3 Varianten und Fälle

Sämtliche Berechnungen beziehen sich auf unterschiedliche Erder-Konfigurationen, die entsprechenden sechs Varianten sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Tabelle 5: Untersuchte Varianten

Variante	Erder-Konfiguration
Variante 1	Fundamenterder EVCS
Variante 2	Fundamenterder EVCS und Fundamenterder Messwandlerschrank
Variante 3	Fundamenterder EVCS & Messwandlerschrank, Verbindung der beiden Fundamenterder und Begleiterder zur Zuleitung des Messwandlerschranks
Variante 4	Fundamenterder EVCS & Messwandlerschrank, Verbindung, Begleiterder und 4 x 3 x 1,5 m Tiefenerder an den Ecken des EVCS-Fundaments
Variante 5	Fundamenterder EVCS & Messwandlerschrank, Verbindung, Begleiterder, Tiefenerder und mäanderförmiger Erder bei den Parkplätzen
Variante 6	Fundamenterder EVCS & Messwandlerschrank, Verbindung, Begleiterder, Tiefenerder, Mäander und Verbindungen der Mäander (Vermaschung)

Wie in Tabelle 6 ersichtlich ist, werden für diese sechs Varianten jeweils vier Fälle mit unterschiedlichen Werten für den spezifischen Erdwiderstand ρ_E definiert.

Tabelle 6: Fallunterscheidungen für die spezifischen Erdwiderstände in den Berechnungen

Fall	Spezifischer Erdwiderstand ρ_E
Fall 1	100 Ωm
Fall 2	200 Ωm
Fall 3	400 Ωm
Fall 4	1000 Ωm

4.8.4 Berechnungsergebnisse

Mittels des zuvor erwähnten MATLAB-basierten Tools OBEIN können anhand der Vorgabe der Erderkonfiguration samt Geometrie, des spezifischen Bodenwiderstandes, des Gesamterdungsstromes sowie der Bodenschichtung dreidimensionale Verläufe des Oberflächenpotenziales (U_{EPR}) und der Schrittspannung (U_S) berechnet und dargestellt werden. Dies ist für alle Kombinationen der in Kapitel 4.8.3 genannten Varianten und Fälle durchgeführt worden.

Beispielhaft sei hier Variante 1 nach Kapitel 4.8.3 – also jene Konfiguration mit den geringsten Maßnahmen zur Erdung – genannt bei der ausschließlich ein Erder im Fundament der Ladestation verlegt wird (siehe Abbildung 23). Rote Linien stellen dabei den Fundamenterder dar, rote Quadrate repräsentieren die Eckpunkte. Das umfassende grüne Quadrat mit den kleinen grünen Quadraten an der linken unteren und rechten oberen Ecke markiert die Berechnungsgrenzfläche auf welche sich sämtliche Berechnungsergebnisse beziehen.

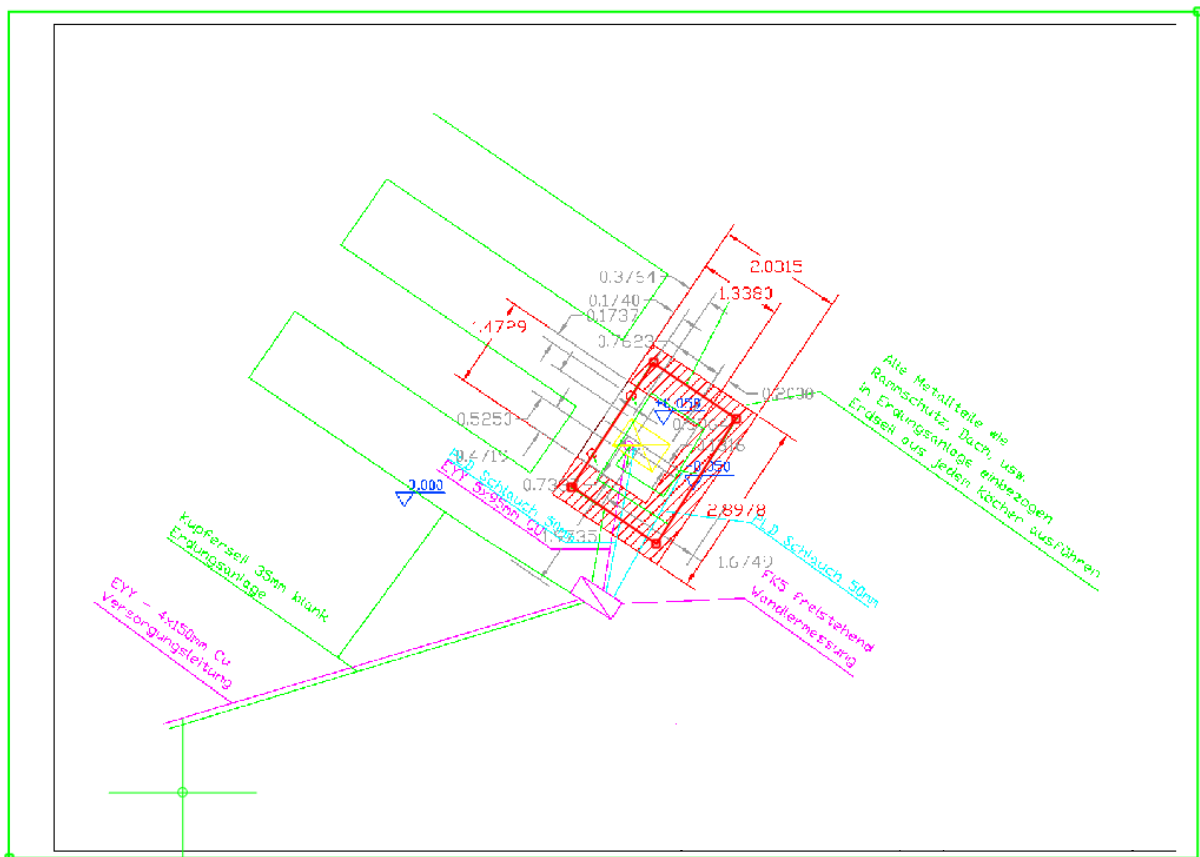


Abbildung 23: Grundriss Variante 1 (vgl. [36])

Wiederum beispielhaft repräsentieren die in Abbildung 24 und Abbildung 25 dargestellten, dreidimensionalen Diagramme die Berechnungsergebnisse für Variante 1 bei Fall 1 mit einem spezifischen Erdwiderstand von $100 \Omega\text{m}$ nach Kapitel 4.8.3.

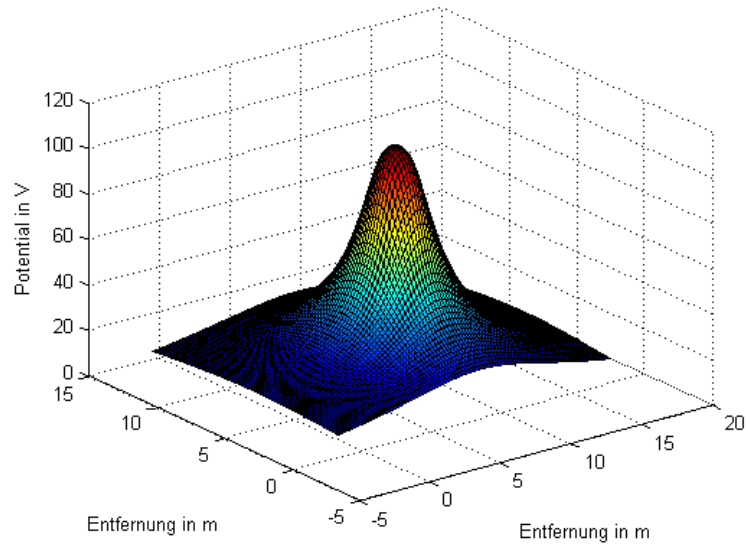


Abbildung 24: Oberflächenpotentialverlauf in V bei Variante 1, $100 \Omega\text{m}$, Ordinate: Potenzial in V, Abszissen: Entfernungen in x- bzw. y-Richtung in m

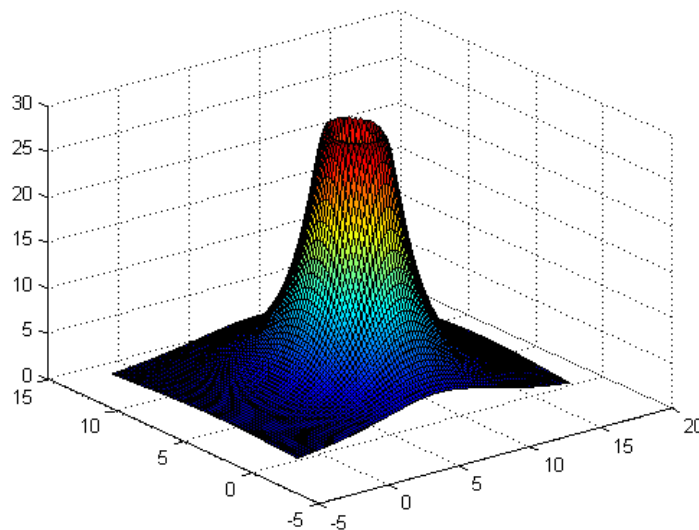


Abbildung 25: Schrittspannungsverlauf in V bei Variante 1, $100 \Omega\text{m}$, Ordinate: Schrittspannung in V, Abszissen: Entfernungen in x- bzw. y-Richtung in m

In beiden Diagrammen ist der Fundamenterder – dieser besitzt grundsätzlich die Eigenschaften eines Ringerders – in Form einer kreisförmigen Spitze bzw. in Form eines kreisförmigen Kraters zu erkennen.

Als zweites, zum ersteren sehr konträres, Beispiel sei hier Variante 6 nach Kapitel 4.8.3, also jene Konfiguration mit den meisten Maßnahmen zur Verbesserung des Ausbreitungswiderstandes der Erdungsanlage gezeigt. Hier wird ein Erder im Fundament der Ladestation sowie ein Erder im Fundament des Messwandlerschrankes verlegt. Diese beiden werden miteinander verbunden. Ab dem Messwandlerschrank wird ein Begleiterder mit der Zuleitung mitverlegt. Im Bereich der Ecken des Fundaments der Ladestation werden vier jeweils 4,5 m lange (je 3 Stäbe) Tiefenerder geschlagen und im Bereich der Parkplätze wird ein mäanderförmiger Erder verlegt. Sämtliche genannte Erder werden untereinander verbunden bzw. vermascht (siehe Abbildung 26). Rote Linien stellen dabei die Horizontalerder dar, rote Quadrate repräsentieren die Eckpunkte und rote Dreiecke symbolisieren Tiefenerder. Das umfassende grüne Quadrat mit den kleinen grünen Quadraten an der linken unteren und rechten oberen Ecke markiert die Berechnungsgrenzfläche auf welche sich sämtliche Berechnungsergebnisse beziehen.

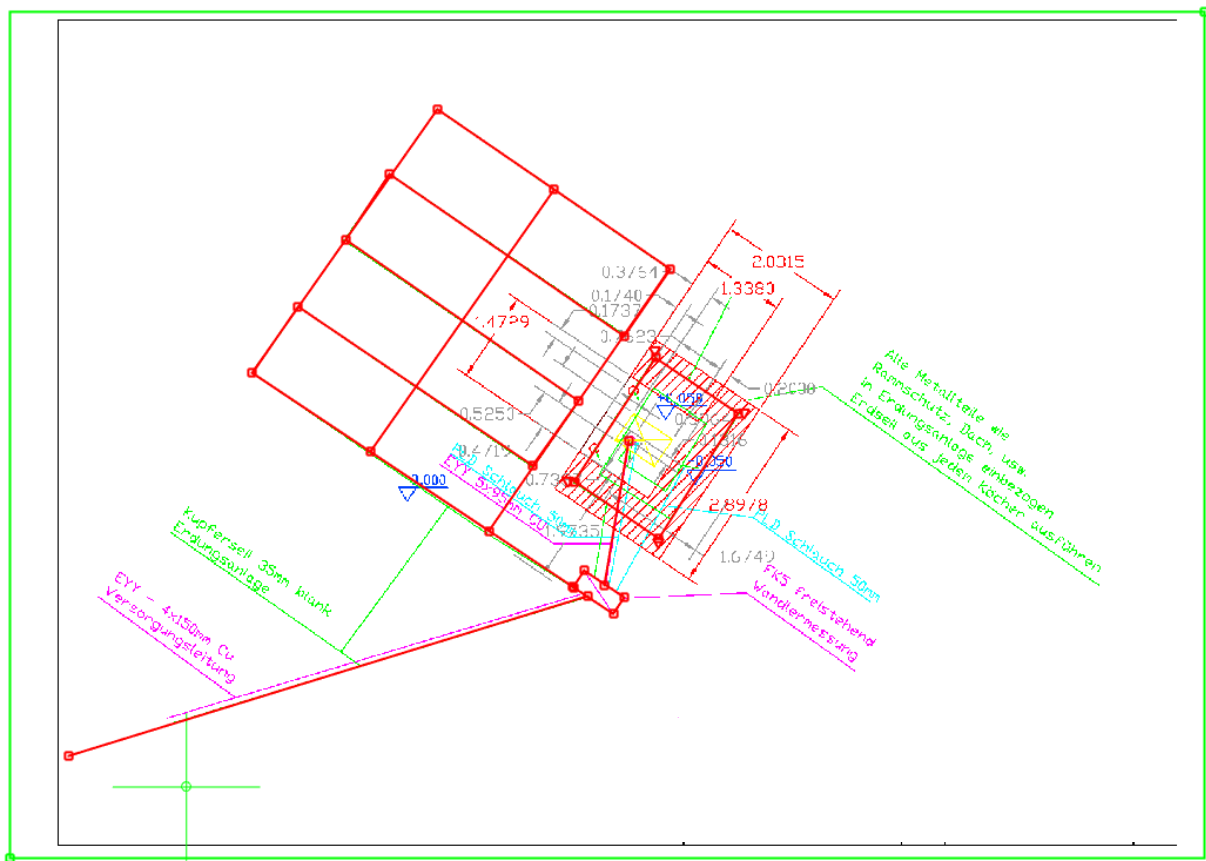


Abbildung 26: Grundriss Variante 6 (vgl. [36])

Wiederum beispielhaft repräsentieren die in Abbildung 27 und Abbildung 28 dargestellten, dreidimensionalen Diagramme die Berechnungsergebnisse für Variante 6 bei Fall 1 mit einem spezifischen Erdwiderstand von $100 \Omega\text{m}$ nach Kapitel 4.8.3.

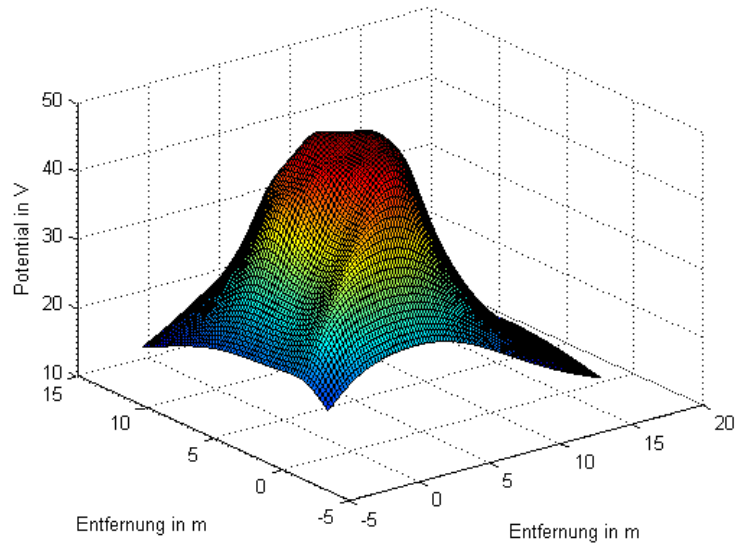


Abbildung 27: Oberflächenpotentialverlauf in V bei Variante 6, $100 \Omega\text{m}$, Ordinate: Potenzial in V, Abszissen: Entfernungen in x- bzw. y-Richtung in m

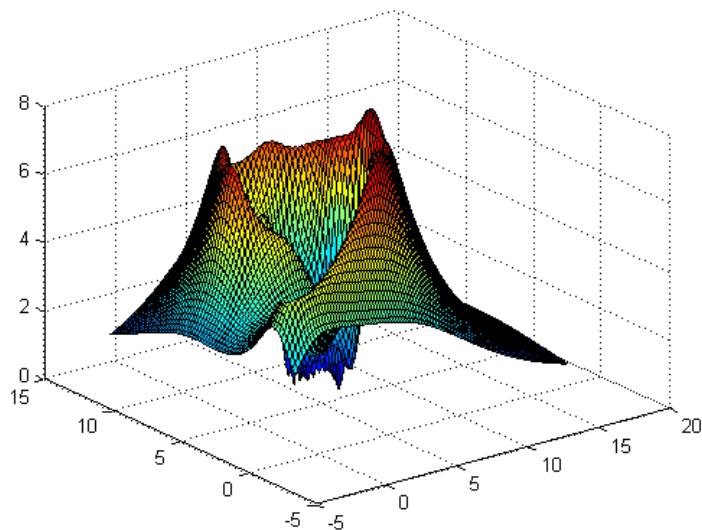


Abbildung 28: Schrittspannungsverlauf in V bei Variante 6, $100 \Omega\text{m}$, Ordinate: Schrittspannung in V, Abszissen: Entfernungen in x- bzw. y-Richtung in m

Im Vergleich zu Abbildung 24 und Abbildung 25 lässt sich in Abbildung 27 und Abbildung 28 eine deutliche Veränderung der Verläufe des Oberflächenpotenziales und der Schrittspannung erkennen. Der Einfluss der umfangreicher gesetzten Maßnahmen zur Verbesserung der Erdungsanlage wird durch die Reduktion der maximal auftretenden Spannungswerte sichtbar.

Abbildung 29 zeigt den Ausbreitungswiderstand R_A sämtlicher Varianten an Erderkonfigurationen (Variante 1 bis 6) in Abhängigkeit der Fälle 1 bis 4 von verschiedenen spezifischen Erdwiderständen in Form eines Diagrammes.

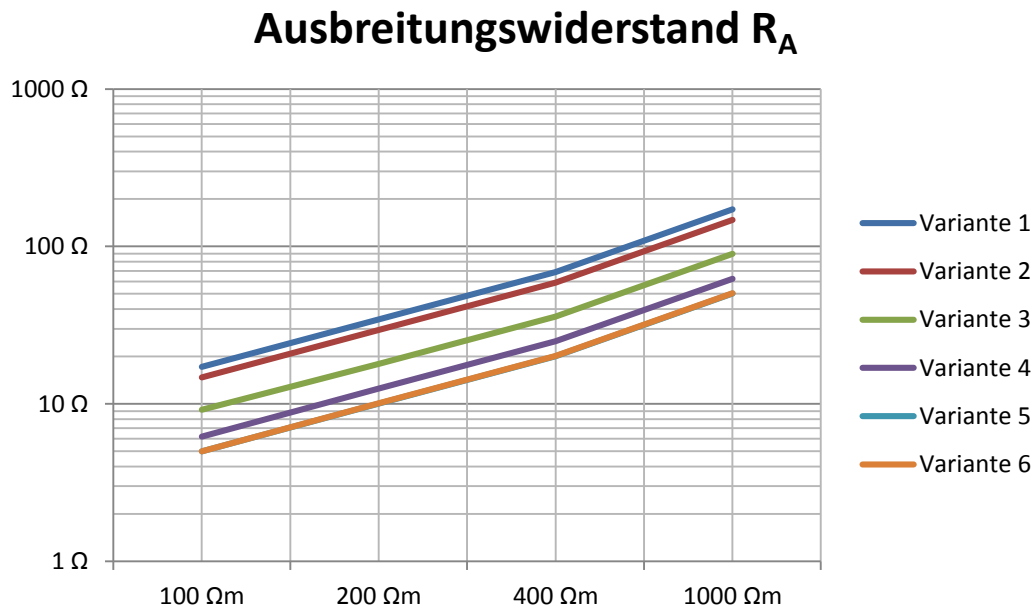


Abbildung 29: Ausbreitungswiderstand der unterschiedlichen Varianten R_A in Ω (Ordinate) abhängig vom spezifischen Erdwiderstand ρ_E in Ωm (Abszisse)

Wie in Abbildung 29 ersichtlich ist, sind die errechneten Erdwiderstände bei einem angenommenen spezifischen Erdwiderstand von $100 \Omega\text{m}$ bei den Varianten 3 bis 6 sowie bei einem angenommenen spezifischen Erdwiderstand von $200 \Omega\text{m}$ bei den Varianten 5 und 6 kleiner als 10Ω . Dies bedeutet, dass die genannten Erderkonfigurationen (ohne Rücksicht auf deren Erderlänge), die laut ÖVE/ÖNORM EN 62305-3:2008-01-01 [29] Forderungen hinsichtlich Blitzschutz erfüllen.

Anmerkung zu Abbildung 29: Aufgrund annähernd identer Werte für den Ausbreitungswiderstand R_A sind die Verläufe für Variante 5 und 6 nahezu deckungsgleich.

Abbildung 30 zeigt die ermittelten maximal auftretenden Oberflächenpotenziale der unterschiedlichen Erderkonfigurationen bei einem Erderstrom von 1 A in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes.

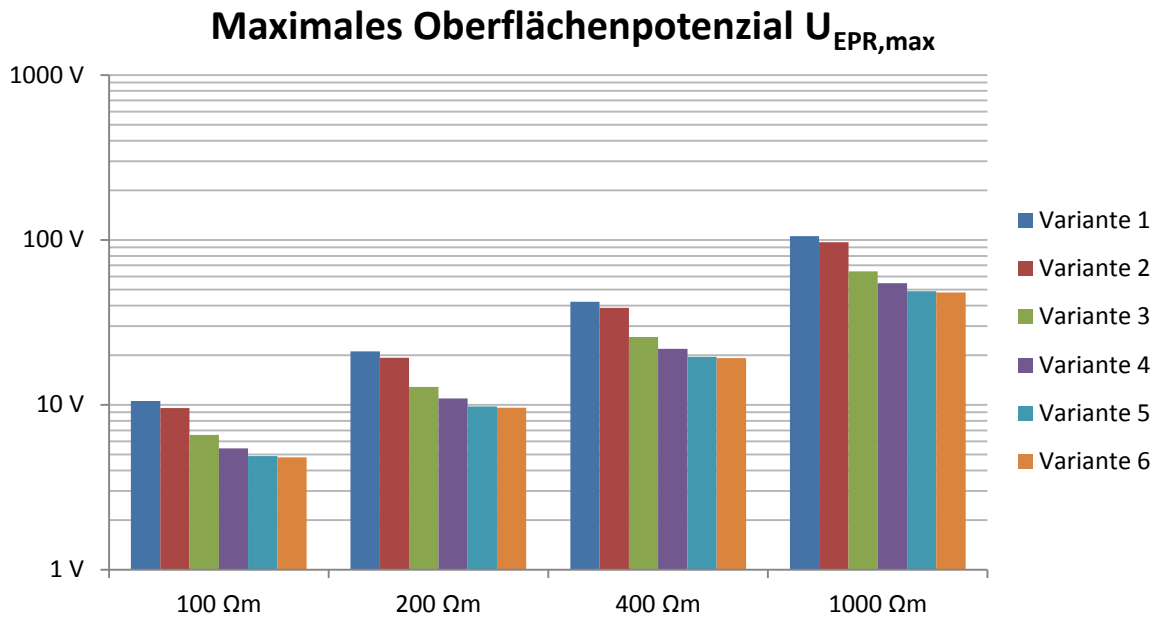


Abbildung 30: Maximales Oberflächenpotenzial $U_{EPR,max}$ in V (Ordinate) abhängig vom spezifischen Erdwiderstand ρ_E in Ωm (Abszisse) bei 1 A Erderstrom

Abbildung 31 zeigt die ermittelten maximal auftretenden Berührungs- bzw. Schrittspannungen der verschiedenen Erderkonfigurationen bei einem Erderstrom von 1 A in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes.

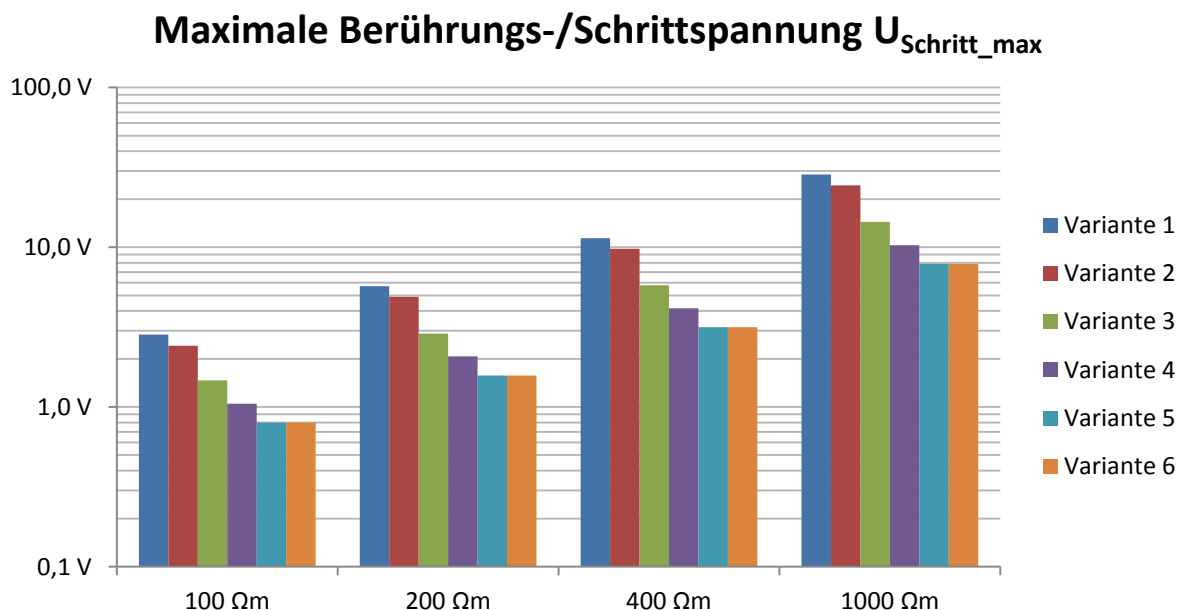


Abbildung 31: Maximale Berührungs- bzw. Schrittspannung $U_{S,max}$ in V (Ordinate) abhängig vom spezifischen Erdwiderstand ρ_E in Ωm (Abszisse) bei 1 A Erderstrom

4.8.5 Wirksamer Ausbreitungswiderstand der Parallelschaltung des Erders einer DC-Ladestation mit anderen Erdern von NS- und MS-Komponenten

4.8.5.1 Schematische Darstellung des Zusammenhanges der einzelnen Erder

Die folgende Abbildung 32 zeigt eine erweiterte Darstellung der zu beachtenden Erder und Teilerder einer Ladestation mit angeschlossenen Niederspannungs- und allenfalls vorhandenen Mittelspannungserdungsanlagen. Der Gesamtausbreitungswiderstand $R_{AW,Trafo}$ einer MS-NS-Trafostation ergibt sich z.B. aus der Parallelschaltung aus dem Ausbreitungswiderstand des Erders der MS-Station $R_{A,St}$ in Serie mit dem Längswiderstand des Begleiterders des MS-Kabels R_{MS} , parallel mit dem Gesamtausbreitungswiderstand der MS/NS-Trafostation $R_{A,Tr}$ (Parallelschaltung des Ausbreitungswiderstandes des Erders der MS-Seite $R_{A,MS}$ sowie der NS-Seite $R_{A,NS}$), parallel mit der Parallelschaltung des Längswiderstandes des PEN-Leiters des NS-Kabels $R_{PEN,K}$ und dem Längswiderstand des Begleiterders des NS-Kabels R_{NS} in Serie mit dem Ausbreitungswiderstand des Erders der Ladestation $R_{A,EVCS}$ (Berechnungsergebnisse siehe Kapitel 4.8.4).

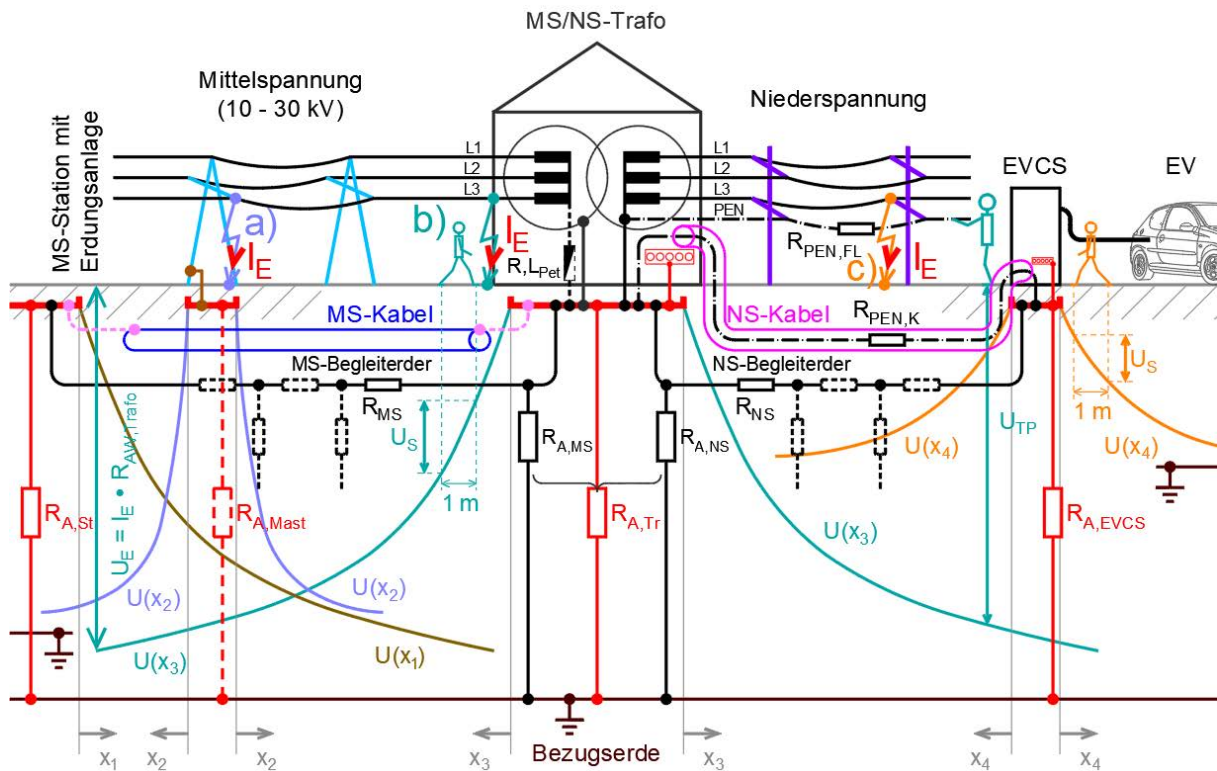


Abbildung 32: Schematische Darstellung der Ausbreitungswiderstände der einzelnen Erder und der Spannungstrichter am Beispiel einer Ortsnetz-Trafostation (MS/NS, Mitte) samt speisender MS-Anlage (links) und versorgter NS-Anlage (EVCS, rechts) sowie einem Freileitungs-MS-Leiter-Erde-Fehler (a), einem transformatornahen MS-Leiter-Erde-Fehler (b) und einem NS-Leiter-Erde-Fehler (c) sowie den entsprechenden Schritt- bzw. Berührungsspannungen

Ergänzend sind in Abbildung 32 die sich einstellenden bzw. ausbreitenden Spannungstrichter der einzelnen Teilerdungsanlagen dargestellt. Generell soll diese Grafik auf die Komplexität des Zusammenschaltens von Erdungsanlagen unterschiedlicher Netzebenen aufmerksam machen und den Leser für diese Thematik sensibilisieren.

4.8.5.2 Berechnungen

Mit der folgenden Formel (3) lässt sich der Gesamtausbreitungswiderstand der in Abbildung 32 dargestellten Anordnung näherungsweise berechnen.

$$\begin{aligned}
 R_{AW,Trafo} &= \frac{1}{\frac{1}{R_{A,St} + R_{MS}} + \frac{1}{R_{A,Tr}} + \frac{1}{\frac{R_{NS} \cdot R_{PEN,K}}{R_{NS} + R_{PEN,K}} + R_{A,EVCS}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{R_{A,St} + R_{MS}} + \frac{1}{\underbrace{\frac{R_{A,MS} \cdot R_{A,NS}}{R_{A,MS} + R_{A,NS}}}_{R_{A,Tr}}} + \frac{1}{\frac{R_{NS} \cdot R_{PEN,K}}{R_{NS} + R_{PEN,K}} + R_{A,EVCS}}} \quad (3) \\
 &= \frac{1}{\frac{1}{R_{A,St} + R_{MS}} + R_{A,Tr} + \frac{R_{NS} + R_{PEN,K}}{R_{NS} \cdot R_{PEN,K} + (R_{NS} + R_{PEN,K}) \cdot R_{A,EVCS}}}
 \end{aligned}$$

Man erkennt, dass die Kettenleiteranordnungen der beiden Begleiterder (MS- und NS-seitig) hier vereinfacht durch Ersatz-Längswiderstände berücksichtigt werden. Darüber hinaus findet der Ausbreitungswiderstand des Erders des MS-Freileitungsmasten in diesem Beispiel keine Berücksichtigung.

Die höchste auftretende Berührungs-/Schrittspannung $U_{B,max}$ an der Trafostation kann wie folgt bestimmt werden:

$$U_{B,max} = I_E \cdot R_{AW,Trafo} = I_E \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_{A,St} + R_{MS}} + \frac{1}{R_{A,Tr}} + \frac{1}{\frac{R_{NS} \cdot R_{PEN,K}}{R_{NS} + R_{PEN,K}} + R_{A,EVCS}}} \quad (4)$$

Bei einer Ladestation ergibt sich z.B. mit $R_{A,EVCS} = 9,2 \Omega$ (Variante 3 bei $\rho_E = 100 \Omega m$) sowie mit den Erfahrungswerten $R_{PEN,K} = 0,4 \Omega$, $R_{NS} = 0,4 \Omega$, $R_{A,Tr} = 2 \Omega$, $R_{A,St} = 2 \Omega$ und $R_{MS} = 2 \Omega$ (für einen 100 m langen Begleiterder eines Mittelspannungskabels) mit Hilfe von Formel (4):

$$U_{B,max} = I_E \cdot \frac{1}{\frac{1}{2 \Omega + 2 \Omega} + \frac{1}{2 \Omega} + \frac{1}{\frac{0,4 \Omega \cdot 0,4 \Omega}{0,4 \Omega + 0,4 \Omega} + 9,2 \Omega}} = I_E \cdot 1,17 \Omega \quad (5)$$

$R_{AW,Trafo}$

Tabelle 7 zeigt den wirksamen Ausbreitungswiderstand der gesamten Anordnung aus Abbildung 32 aus Sicht der MS/NS-Trafostation ($R_{AW,Trafo}$) in Abhängigkeit unterschiedlicher Erdungssituationen der MS-Station ($R_{A,St}$) sowie der MS/NS-Trafostation ($R_{A,Tr}$) für niederfrequente Vorgänge.

Anmerkung: Hinsichtlich Blitzschutz sind zusätzliche Vorkehrungen (Tiefenerder etc.) erforderlich.

Tabelle 7: Wirksamer Ausbreitungswiderstand der Trafostation $R_{AW,Trafo}$ für niederfrequente Vorgänge

Fall	Beschreibung	$R_{A,St}$	$R_{A,Tr}$	$R_{AW,Trafo}$
---	---	Ω	Ω	Ω
1	gut geerdete MS-Station, gut geerdet Trafostation	2	2	1,17
2	gut geerdete MS-Station, schlecht geerdet Trafostation	2	20	2,46
3	schlecht geerdete MS-Station, gut geerdet Trafostation	20	2	1,53
4	schlecht geerdete MS-Station, schlecht geerdet Trafostation	20	20	4,95

Der höchste zulässige Erderstrom $I_{E,max}$ an der Trafostation kann somit wie folgt bestimmt werden:

$$I_{E,max} = \frac{U_B}{R_{AW,Trafo}} = U_B \cdot \left(\frac{1}{R_{A,St} + R_{MS}} + \frac{1}{R_{A,Tr}} + \frac{1}{\frac{R_{NS} \cdot R_{PEN,K}}{R_{NS} + R_{PEN,K}} + R_{A,EVCS}} \right) \quad (6)$$

Im Fall des oben angeführten Beispiels ergibt sich ein maximaler Fehlerstrom gegen Erde von $I_{E,max,Dauer} = \frac{U_B}{R_{AW,Trafo}} = \frac{50 \text{ V}}{1,17 \Omega} = 42,8 \text{ A}$ für Dauerbeeinflussung (maximal zulässige Berührungsspannung 50 V, gemäß [2]) und bei einer Abschaltzeit von 0,2 s (maximal zulässige Berührungsspannung 500 V, gemäß Abbildung 34) ein maximaler Fehlerstrom gegen Erde von $I_{E,max,0.2s} = \frac{U_B}{R_{AW,Trafo}} = \frac{500 \text{ V}}{1,17 \Omega} = 428 \text{ A}$.

Bei einem NS-Fehler im Bereich der Ladestation kann die Fehlerspannung aus der Parallelschaltung des Anlagenerders mit den angeschlossenen Erden (PEN, MS-/NS-Erdungsanlage, Begleiterder usw.) bestimmt werden. Dabei ist wieder zu beachten, dass für die Fehlerspannung an der Ladestation nur der in das Erdreich direkt abfließende Erderstrom maßgebend ist. Erdstromkomponenten, die über das Erdungssystem, Kabelschirme oder Begleiterder gegen Erde fließen können, werden vernachlässigt.

Anmerkung: Bei transienten Vorgängen (z.B. Blitzschlag) sind die Induktivitäten der Erdungsanlage unbedingt zu berücksichtigen.

4.8.5.3 Interpretation der Berechnungsergebnisse

4.8.5.3.1 Allgemeines

Für eine korrekte Interpretation der Berechnungsergebnisse gemäß Abbildung 31 sind folgende grundsätzliche Aufgaben von Erdungs-, Potenzialausgleichs- und Blitzschutzanlagen zu beachten:

- a) Erdungs- und Potenzialausgleichsanlagen einer elektrischen Anlage bilden (im Normalbetrieb und im Fehlerfall für betriebsfrequente sowie transiente Vorgänge) die Grundlage hinsichtlich
 - Personenschutz,
 - Anlagenschutz und
 - Blitzschutz.

Im Falle des Personenschutzes besteht die Aufgabe der Erdungs- und Potenzialausgleichsanlage in der Begrenzung der Berührung- und Schrittspannungen (Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag).

Bezüglich des Anlagenschutzes begründet eine Erdungs- und Potenzialausgleichsanlage die Voraussetzung für die Festlegung des Netzsystems sowie die Sicherstellung der Voraussetzungen hinsichtlich EMV/EMI (Verträglichkeit, Schirmung, Begrenzung, elektromagnetische Beeinflussung und Störungen). Weitere Aufgaben sind die Begrenzung von ohmsch, induktiv sowie kapazitiv eingekoppelten Spannungen und Strömen, aber auch die Begrenzung von Netzurückwirkungen.

Hinsichtlich Blitzschutz dient eine niederinduktive Erdungs- und Potenzialausgleichsanlage der Ableitung von (hochfrequenten) Blitzstoßströmen.

- b) Zur Einhaltung der Spannungsgrenzen hinsichtlich Personenschutz ist entweder die Einhaltung der Trichterspannung (Worst-Case der Berührungsspannung) oder der in der Praxis zu erwartenden Berührungsspannungen (Schrittspannungen) abhängig von Normalbetrieb und Fehlerfall (d.h. abhängig von den Abschaltzeiten) im Hochspannungs- und Niederspannungs-System zu beachten (z.B. ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2], ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [18], ÖVE/ÖNORM EN 61140:2016-12-01) [37].
- c) Zur Einhaltung der Spannungsgrenzen hinsichtlich Anlagenschutz ist entweder die Einhaltung der Trichterspannung (Worst-Case) oder der auftretenden Differenzspannungen abhängig vom Normalbetrieb und Fehlerfall (d.h. abhängig von den Abschaltzeiten) im Hochspannungs- und Niederspannungssystem zu beachten (z.B. Serie ÖVE/ÖNORM EN 61000 – Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)).
- d) Wie bereits erwähnt, wird gemäß ÖVE/ÖNORM EN 62305-3:2008-01-01 [29] unter den in der Bestimmung angegebenen Voraussetzungen angenommen, dass ein Erder mit einem Ausbreitungswiderstand $< 10 \Omega$ hinsichtlich Blitzschutz eines Objekts ausreicht. Bei besonders empfindlichen elektronischen Geräten ist dies jedoch zu überprüfen.
- e) Der wirksame Erdungswiderstand einer Anlage ergibt sich aus dem Ausbreitungswiderstand des Erders der Anlage sowie allen anderen parallel angeschlossenen erderwirksamen Leitern (beidseitig geerdete Kabelschirme, PEN- und PE-Leiter, andere geerdete leitfähige Leiter). (vgl. Abbildung 32)

4.8.5.3.2 Beurteilungskriterien

In der folgenden Tabelle 8 werden die Grenzen der Erdungsspannung für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungs-Erdungsanlagen gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] dargestellt. Aus diesen Grenzen ergibt sich, abhängig von der Fehlerdauer und dem Erderstrom (Strom der gegen die Erdungsanlage abfließt und die Trichterspannung erzeugt) eine maximal zulässige Spannungsbeanspruchung (zulässige Erdungsspannung). Für in Österreich übliche TN-Systeme kann z.B. für eine Fehlerdauer ≤ 5 Sekunden eine zulässige Erdungsspannung ≤ 1200 V (50 Hz) abgelesen werden, bei einer Fehlerdauer > 5 Sekunden darf die Erdungsspannung 250 V nicht überschreiten.

Tabelle 8: Minimalanforderungen für den Zusammenschluss von Niederspannungs- und Hochspannungs-Erdungsanlagen basierend auf der Erdungsspannung (EPR) (Tabelle 2 aus [19])

Art des Niederspannungssystems ^{a,b}		Anforderungen zur Erdungsspannung (EPR)		
		Berührungsspannung	Beanspruchungsspannung ^c	
			Fehlerdauer $t_f \leq 5$ s	Fehlerdauer $t_f > 5$ s
TT		nicht zutreffend	$EPR \leq 1200$ V	$EPR \leq 250$ V
TN		$EPR \leq F \cdot U_{Tp}$ ^{d,e}	$EPR \leq 1200$ V	$EPR \leq 250$ V
IT	Gleichmäßig verteilter PE-Leiter	wie im TN-System	$EPR \leq 1200$ V	$EPR \leq 250$ V
	PE-Leiter nicht gleichmäßig verteilt	nicht zutreffend	$EPR \leq 1200$ V	$EPR \leq 250$ V

^a Definition der Arten der Niederspannungssysteme siehe HD 60364-1.
^b Für Telekommunikationsanlagen sollten die ITU-Richtlinien beachtet werden.
^c Der Grenzwert kann angehoben werden, wenn geeignete Niederspannungsgeräte eingebaut sind oder wenn die Erdungsspannung (EPR) durch gemessene oder berechnete Potentialdifferenzen für diesen Ort ersetzt wird.
^d Wenn der PEN-Leiter oder Neutralleiter des Niederspannungssystems nur mit der Hochspannungs-Erdungsanlage verbunden ist, muss für F der Wert 1 sein.
^e U_{Tp} ist abgeleitet von Bild 4

ANMERKUNG Der typische Wert für F ist 2. Größere Werte für F können verwendet werden, wenn zusätzliche Verbindungen zwischen PEN-Leiter und Erde vorhanden sind. Bei bestimmten Bodenschichtungen kann der Wert für F bis zu 5 betragen. Vorsicht ist geboten, wenn diese Regel bei Böden mit großen Unterschieden im spezifischem Widerstand und einer oberen Lage mit höherem spezifischem Widerstand angewendet wird. Die Berührungsspannung kann in diesem Fall 50 % der Erdungsspannung (EPR) überschreiten.

Anmerkung zu Tabelle 8:

Die Verweise in Tabelle 8 beziehen sich auf die Quelle, also auf die ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] und nicht auf diese Arbeit.



Die auftretende Erdungsspannung (EPR) muss gemäß ÖVE/ÖNORM E 8383:2000-03-01 [18] (verbindlich) bzw. ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] kleiner gleich der höchstzulässigen Berührungsspannung U_{TP} sein (siehe Tabelle 8, Abbildung 33 bzw. Abbildung 34).

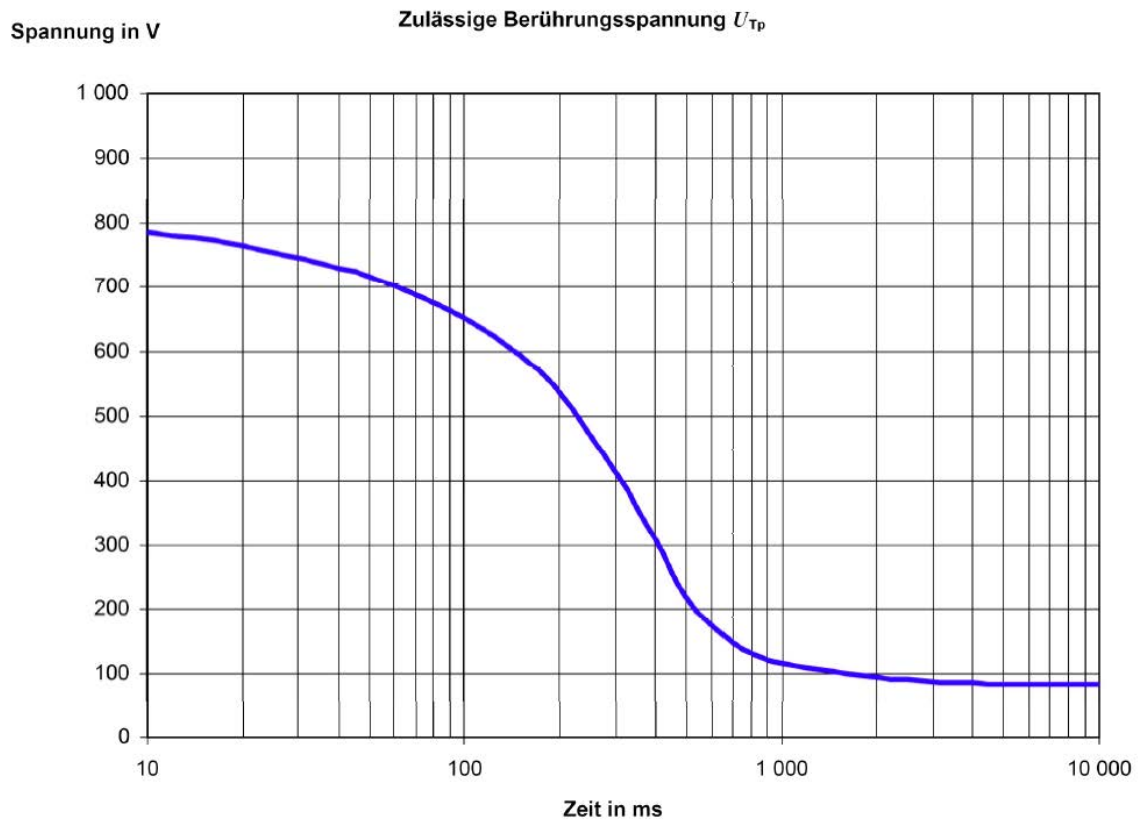
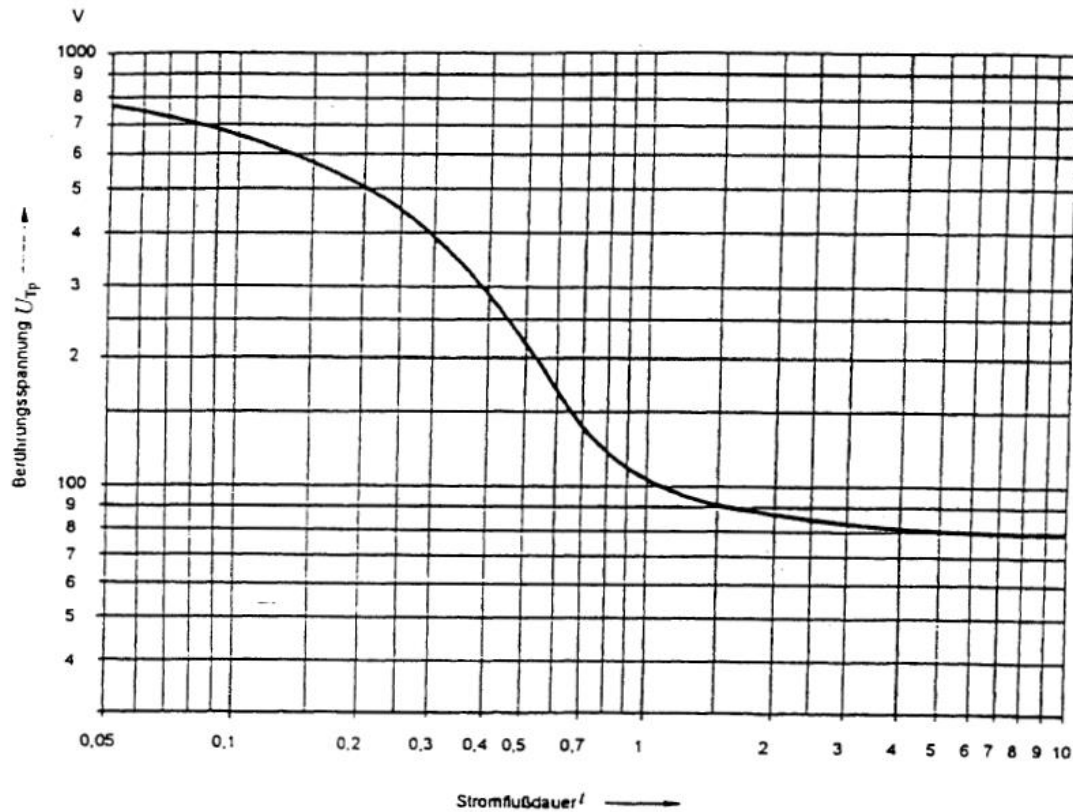


Abbildung 33: Zulässige Berührungsspannung U_{TP} in V (Ordinate) abhängig von der Zeit (Abszisse) (Bild 4 aus [19])



ANMERKUNG 1: Diese Kurve gilt für Erdfehler in Hochspannungsnetzen.

ANMERKUNG 2: Falls der Stromfluß wesentlich länger andauert, als im Diagramm angegeben, kann für U_{Tp} ein Wert von 75 V verwendet werden.

Abbildung 34: Höchste zulässige Berührungsspannung U_{Tp} für begrenzte Stromflußdauer (Bild9.1 aus [18])

Die maßgebenden Ströme für die Bemessung von Erdungsanlagen und infolge die maximal zulässigen Erdungsspannungen können in Abhängigkeit von der Sternpunktbehandlung des Hochspannungsnetzes in Form ihrer Berechnungsvorschriften aus der nachfolgenden Tabelle 9 abgelesen werden.

Tabelle 9: Maßgebende Ströme für die Bemessung von Erdungsanlagen (Tabelle 1 aus [19])

Art des Hochspannungsnetzes		Maßgebend für die thermische Belastung ^{a,e}		Maßgebend für Erdungs- und Berührungsspannungen
		Erder	Erdungsleiter	
Netze mit isoliertem Sternpunkt				
		I''_{KEE}	I''_{KEE}	$I_E = r \cdot I_C^b$
Netze mit Erdschlusskompensation einschließlich Kurzzeit-Erdung zur Fehlerortung				
	In Anlagen ohne Erdschlussspule ^f	I''_{KEE}	I''_{KEE}	$I_E = r \cdot I_{RES}^b$
	In Anlagen mit Erdschlussspule	I''_{KEE}	I''_{KEE}^c	$I_E = r \cdot \sqrt{I_L^2 + I_{RES}^2}^{b,h}$
Netze mit niederohmiger Sternpunktterdung einschließlich Kurzzeit-Erdung zur Abschaltung ^g				
	Anlagen ohne Sternpunktterdung	I''_{k1}	I''_{k1}	$I_E = r \cdot I''_{k1}$
	Anlagen mit Sternpunktterdung	I''_{k1}	I''_{k1}	$I_E = r \cdot (I''_{k1} - I_N)^d$
<p>^a Sind mehrere Stromflusswege möglich, darf die sich ergebende Stromverteilung für die Auslegung des Erdernetzes berücksichtigt werden.</p> <p>^b Wenn eine automatische Abschaltung von Erdschlüssen nicht vorgesehen ist, ist die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von Doppelerdschlüssen abhängig von den Betriebserfahrungen.</p> <p>^c Erdungsleiter an Erdschlussspulen sind nach dem größten Strom der Spulen auszulegen.</p> <p>^d Es ist zu prüfen, ob außenliegende Fehler maßgeblich sind.</p> <p>^e Die Mindestquerschnitte im Anhang C müssen beachtet werden.</p> <p>^f Bei merklicher Verstimmung eines kompensierten Netzes kann die generelle Annahme von 10 % I_C nicht verwendet werden. Die Blindkomponente des Erdschlussreststromes ist zusätzlich zu berücksichtigen.</p> <p>^g Die Kurzzeit-Erdung von Netzen mit Erdschlusskompensation beginnt innerhalb von 5 s nach Feststellung des Erdschlusses.</p> <p>^h Im Falle eines Fehlers in der Anlage muss der kapazitive Erdungsstrom I_C berücksichtigt werden. Weitere Erdschlussspulen außerhalb der Anlage können berücksichtigt werden.</p>				
Legende für Tabelle 1:				
I_C Berechneter oder gemessener kapazitiver Erdschlussstrom.				
I_{RES} Erdschlussreststrom (siehe Bild 3b). Wenn der exakte Wert nicht bekannt ist, dürfen 10 % von I_C angenommen werden.				
I_L Summe der Bemessungsströme paralleler Erdschlussspulen der betrachteten Anlage.				
I''_{KEE} Doppelerdschlussstrom, berechnet nach EN 60909 (für I''_{KEE} dürfen 85 % des dreipoligen Anfangskurzschlusswechselstromes als Höchstwert verwendet werden).				
I''_{k1} Anfangskurzschlusswechselstrom für einen einpoligen Erdkurzschluss, berechnet nach EN 60909.				
I_E Erdungsstrom (siehe Bild 2).				
I_N Strom über den Transformator-Sternpunkt (siehe Bild 2)				
r Reduktionsfaktor (siehe Anhang I).				
Wenn die aus der Anlage abgehenden Leitungen und Kabel unterschiedliche Reduktionsfaktoren haben, ist der maßgebende Strom zu bestimmen (nach Anhang L).				

Anmerkung zu Tabelle 9:

Die Verweise in Tabelle 9 beziehen sich auf die Quelle, also auf die ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] und nicht auf diese Arbeit.

Gemäß ÖVE-B1/1976-12-01 [38] ist zu erwarten, dass der Lichtbogen an der Erdschlussstelle von selbst erlischt, wenn der kapazitive Erdschlussstrom oder der Erdschlussstrom in Abhängigkeit von der Nennspannung des Netzes die in Tabelle 10 angegebenen Grenzen nicht überschreitet.

Isolierte bzw. gelöschte Netze werden in Österreich so betrieben, dass die Löschgrenzen nach Tabelle 10 nicht überschritten werden. Daraus folgt, dass im Erdschlussfall auch keine höheren Ströme, als in Tabelle 10 angegeben, auftreten. Dies spiegelt den gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] betrachteten Worst-Case wieder, die Wirkungen von Doppel-Erdschlüssen werden hinsichtlich Fehlerspannungen nicht betrachtet. Bei der Dimensionierung der Erdungsanlage (z.B. Dimensionierung der Erderquerschnitte) findet der Doppel-Erdschluss jedoch sehr wohl Berücksichtigung.

Tabelle 10: Löschgrenzen von Starkstromnetzen (Tabelle 22-2 aus [38])

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Nennspannung des Netzes kV		3...20	25	30	45	60	110	150
2	Erdschlußreststrom bzw. Erdschlußstrom, A.	Tabelle a	60	63	67	78	90	132	180
3	Maßgebend ist die Grundwelle	Tabelle b	35	37	40	50	60	—	—
Tabelle a für Netze mit Erdschlußkompensation; für Kabelnetze bis 20 kV Nennspannung mit kleinen Freileitungsanteilen gilt Tabelle a auch bei isoliertem neutralem Punkt, Tabelle b für Netze mit isoliertem neutralem Punkt.									

Die in Tabelle 10 rot umrahmten Spalten 3, 5 und 8 repräsentieren die in Österreich vorwiegend anzutreffenden Spannungsebenen, diese werden in weiterer Folge hinsichtlich der maximal auftretenden Erdschlussströme behandelt.

4.8.5.4 Verbundene vs. nicht verbundene NS- und MS-Erdungsanlagen

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten:

- Verbinden einer NS-Erdungsanlage mit einer MS-Erdungsanlage (4.8.5.4.1)
- Nicht verbinden einer NS-Erdungsanlage mit einer MS-Erdungsanlage (4.8.5.4.2)

In diesem Kapitel werden die Unterschiede zwischen den zwei genannten Möglichkeiten an dem Beispiel einer DC-Ladestation (entspricht einem Teil einer NS-Anlage) und einer MS-Trafostation aufgezeigt und erläutert. Des Weiteren werden in den folgenden Unterpunkten verschiedene Betriebszustände erörtert.

4.8.5.4.1 Die Erdungsanlage der DC-Ladestation ist mit der Betriebserdungsanlage einer Mittelspannungsstation verbunden

4.8.5.4.1.1 Normalbetrieb, Fehlerfall – Stromflussdauern > 5 s

Ausgehend von Tabelle 10 können die im Erdschlussfall maximal auftretenden Ströme gegen Erde für unterschiedliche Netzebenen angegeben werden. Werden nun die Ergebnisse aus 4.8.4 (maximal auftretende Schrittspannungen bei 1 A bei den unterschiedlichen Konfigurationen der Erdungsanlage der EVCS und den verschiedenen Fällen des spezifischen Erdwiderstandes) mit den maximal auftretenden Erdschlussströmen umgerechnet, so ergeben sich die theoretisch maximal auftretende Berührungs- bzw. Schrittspannungen für die einzelnen Varianten. Diese werden in den nachfolgenden beiden Diagrammen (Abbildung 35 und Abbildung 36) für MS-Netze mit überwiegendem Freileitungsanteil sowie für MS-Kabelnetze abhängig vom spezifischen Erdwiderstand beispielhaft für die Erderkonfigurationen Variante 1 und 6 (siehe Kapitel 4.8.3) dargestellt. Auch sind die Grenzen für die maximal zulässige Berührungs- bzw. Schrittspannung nach Tabelle 8 aus ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] eingetragen, einmal 250 V für eine Fehlerdauer > 5 s und einmal 1200 V für eine Fehlerdauer ≤ 5 s.

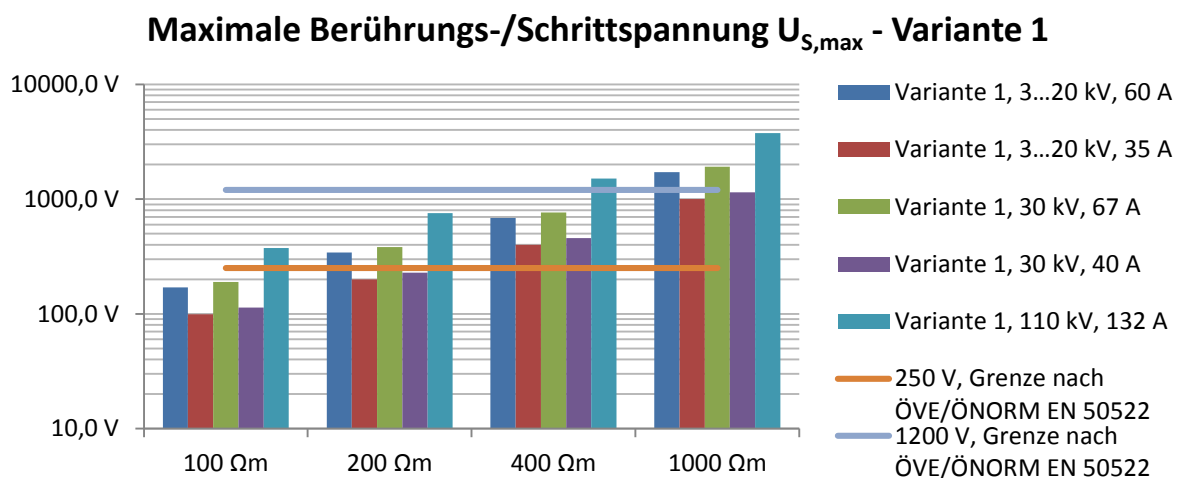


Abbildung 35: Maximale Berührungs- bzw. Schrittspannung $U_{S,max}$ abhängig vom spezifischen Erdwiderstand für verschiedene Mittelspannungsnetze, bei Variante 1 der Erdungsanlage (nur Fundamenterder EVCS)

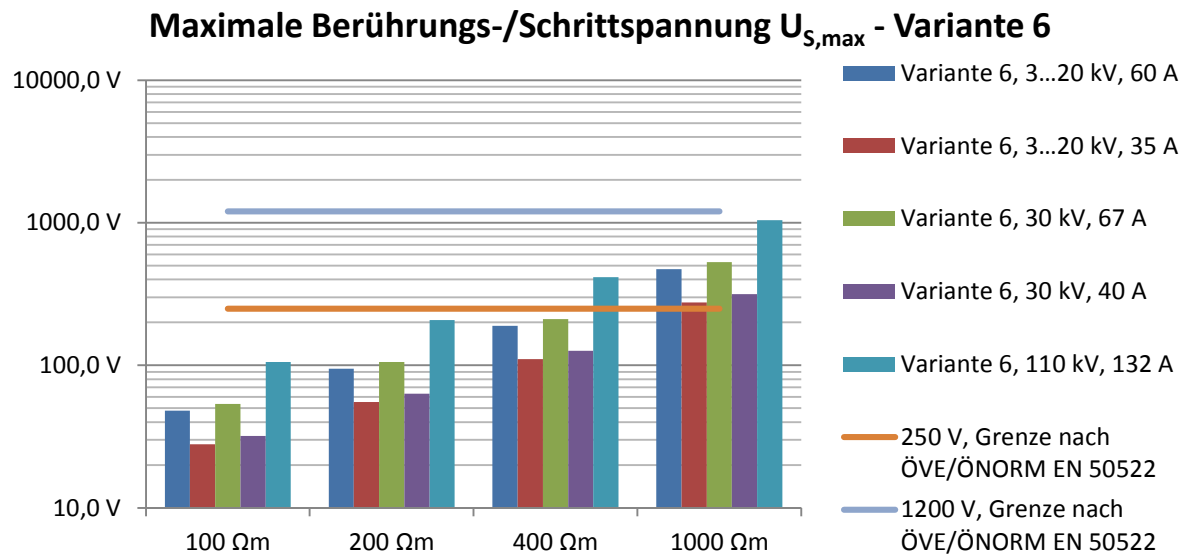


Abbildung 36: Maximale Berührungs- bzw. Schrittspannung $U_{S,max}$ abhängig vom spezifischen Erdwiderstand für verschiedene Mittelspannungsnetze, bei Variante 6 der Erdungsanlage (Fundamenterder EVCS, Messwandlerschrank, Begleiterder, Tiefenerder und vermaschter Mäandererder)

Man erkennt in den beiden vorangegangenen Diagrammen, dass die laut Norm geforderten Maximalwerte für die Berührungs- bzw. Schrittspannung (250 V bei einer Fehlerdauer > 5 s) je nach Spannungsebene bei den einzelnen Erderkonfigurationen und spezifischen Bodenwiderständen nicht immer eingehalten werden können. So führt beispielsweise der maximal auftretende Erderstrom im Erdschlussfall in einem 110-kV-Netz (132 A) bei Variante 1 und einem spezifischen Erdwiderstand von 400 Ωm bereits zu einer Überschreitung der 250-V-Grenze, hingegen liegt die maximal auftretende Berührungs- bzw. Schrittspannung im selben Fall, allerdings bei Variante 6, unterhalb der Grenze. Ähnlich dazu führt der maximal auftretende Erderstrom bei einem 20-kV-Netz (60 A) bei Variante 1 und einem spezifischen Erdwiderstand von 400 Ωm auch zu einer Überschreitung der 250-V-Grenze, hingegen liegt die maximal auftretende Berührungs- bzw. Schrittspannung im selben Fall, allerdings bei Variante 6, ebenso unterhalb der Grenze.

In der folgenden Tabelle 11 und Tabelle 12 sind sämtliche berechnete Werte für die maximal auftretenden Berührungs- bzw. Schrittspannungen $U_{S,max}$ abhängig von der Erderkonfiguration, vom spezifischen Erdwiderstände und von den unterschiedlichen Netzspannungen zusammengestellt.

In Tabelle 11 sind jene Werte grün hinterlegt, bei denen die 250-V-Grenze gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] eingehalten wird, alle anderen sind rot hinterlegt.



Tabelle 11: Maximale Berührungs- bzw. Schrittspannung $U_{S,max}$ abhängig vom spezifischen Erdwiderstand für verschiedene Mittelspannungsnetze bei unterschiedlichen Varianten 1 - 6 der Erdungsanlage, Grenze 250 V

Nennspannung des Netzes in kV			3...20 kV		30 kV		110 kV
Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom in A, maßgebend ist die Grundwelle			Tab. a	Tab. b	Tab. a	Tab. b	Tab. a
			60	35	67	40	132
spezifischer Erdwiderstand	Variante	R_A	$U_{S,max}$		$U_{S,max}$		$U_{S,max}$
Ωm	---	Ω	V		V		V
100	1	17,2	170	99	190	113	374
200		34,4	343	200	383	228	754
400		68,8	685	400	765	457	1507
1000		171,9	1713	999	1913	1142	3769
100	2	14,7	145	85	162	97	319
200		29,5	293	171	328	196	645
400		58,9	586	342	655	391	1290
1000		147,3	1466	855	1637	977	3225
100	3	9,2	88	52	99	59	194
200		17,9	173	101	193	115	380
400		35,9	347	202	387	231	762
1000		89,7	865	505	966	577	1903
100	4	6,2	63	37	70	42	139
200		12,5	125	73	139	83	274
400		25,0	249	145	278	166	548
1000		62,4	619	361	691	412	1361
100	5	5,0	48	28	53	32	105
200		10,0	95	55	106	63	208
400		20,1	189	110	211	126	416
1000		50,2	473	276	528	315	1041
100	6	5,0	48	28	54	32	106
200		10,1	95	55	106	63	208
400		20,2	189	110	211	126	416
1000		50,4	473	276	528	315	1041

In Tabelle 12 sind hingegen jene Werte grün hinterlegt, bei denen die 1200-V-Grenze gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50522:2011-12-01 [19] eingehalten wird, alle anderen sind rot hinterlegt.

Tabelle 12: Maximale Berührungs- bzw. Schrittspannung $U_{S,max}$ abhängig vom spezifischen Erdwiderstand für verschiedene Mittelspannungsnetze bei unterschiedlichen Varianten 1 - 6 der Erdungsanlage, Grenze 1200 V

Nennspannung des Netzes in kV			3...20 kV		30 kV		110 kV
Erdschlussreststrom bzw. Erdschlussstrom in A, maßgebend ist die Grundwelle			Tab. a	Tab. b	Tab. a	Tab. b	Tab. a
			60	35	67	40	132
spezifischer Erdwiderstand	Variante	R_e	$U_{S,max}$		$U_{S,max}$		$U_{S,max}$
Ωm	---	Ω	V		V		V
100	1	17,2	170	99	190	113	374
200		34,4	343	200	383	228	754
400		68,8	685	400	765	457	1507
1000		171,9	1713	999	1913	1142	3769
100	2	14,7	145	85	162	97	319
200		29,5	293	171	328	196	645
400		58,9	586	342	655	391	1290
1000		147,3	1466	855	1637	977	3225
100	3	9,2	88	52	99	59	194
200		17,9	173	101	193	115	380
400		35,9	347	202	387	231	762
1000		89,7	865	505	966	577	1903
100	4	6,2	63	37	70	42	139
200		12,5	125	73	139	83	274
400		25,0	249	145	278	166	548
1000		62,4	619	361	691	412	1361
100	5	5,0	48	28	53	32	105
200		10,0	95	55	106	63	208
400		20,1	189	110	211	126	416
1000		50,2	473	276	528	315	1041
100	6	5,0	48	28	54	32	106
200		10,1	95	55	106	63	208
400		20,2	189	110	211	126	416
1000		50,4	473	276	528	315	1041

4.8.5.4.1.2 Fehlerfall – Doppelerdschluss, Stromflussdauern < 5 s

Wenn eine automatische Abschaltung von Erdschlüssen nicht vorgesehen ist, besteht die Notwendigkeit zur Berücksichtigung von Doppelerdschlüssen abhängig von den Betriebserfahrungen im Netz, d.h., werden in einem Netz nur wenige Doppelerdschlüsse beobachtet, so kann die Berücksichtigung dieser Doppelerdschlüsse entfallen.

ANMERKUNG: Doppelerdschlussströme müssen allerdings bei der thermischen Dimensionierung der Erdungsanlage jedenfalls berücksichtigt werden.



4.8.5.4.2 Die Erdungsanlage der DC-Ladestation ist nicht mit der Betriebserdungsanlage einer Mittelspannungsstation verbunden

4.8.5.4.2.1 Schutz gegen elektrischen Schlag gemäß ÖVE/ÖNORM 8001-1:2010-03-01 [2]

Gemäß ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2]+9, Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V, Teil 1 - Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen), Abschnitt 5, beträgt der „[...] *national vereinbarte Grenzwert der Fehlerspannung (Grenzfehlerspannung) U_{FL} für die Nullung und die Fehlerstrom-Schutzschaltung [...] bei Wechselspannungen (15 Hz bis 1000 Hz), $U_{FL} = 65$ V, bei Gleichspannungen bis 10 % Welligkeit mit Nennspannungen bis 400 V, $U_{FL} = 120$ V. [...] Die internationalen Bestimmungen, die eine Berührungsspannungsgrenze von 50 V für Wechselspannung nennen, werden damit bei vertretbarem Grenzkrisiko erfüllt. Aus dieser Berührungsspannungsgrenze von 50 V für Wechselspannung kann eine elektropathologisch gleichwertige Berührungsspannungsgrenze von 90 V für Gleichspannung abgeleitet werden.*“

Anmerkung: Die geänderten Grenzen für die Fehlerspannung in der in Ausarbeitung befindlichen ÖVE/ÖNORM E 8101, insbesondere die Grenzen für Gleichspannung sind ab 2019 zu beachten.

Gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61140:2016-12-01 [37], „*Schutz gegen elektrischen Schlag - gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel*“, können folgende Schwellen von Berührungsspannungen, die eine Reaktion auslösen, angegeben werden:

Tabelle 13: Schwellen von Berührungsspannungen, die eine Reaktion auslösen (Tabelle 2 aus [37])

Art der Reaktion	Schwelle der Spannung
<i>Wahrnehmung</i>	<i>AC 2 V oder DC 8V</i>
<i>Muskuläre Reaktion</i>	<i>AC 20 V oder DC 40 V</i>

Gemäß Abschnitt 5.2.6 der ÖVE/ÖNORM EN 61140:2016-12-01 [37] ist der Basisschutz erreicht, wenn die Berührungsspannung unter keinen Umständen AC 25 V Effektivwert oder DC 60 V oberwellenfrei überschreitet, vorausgesetzt der Verwendung des Betriebsmittels üblicherweise nur in trockener Umgebung und nicht zu erwartendem großflächigen Kontakt des menschlichen Körpers mit aktiven Teilen sowie in sämtlichen anderen Fällen AC 6 V Effektivwert oder DC 15 V oberwellenfrei. Dabei darf nicht übersehen werden, dass der exakte Grenzwert für die Spannung von einer gewichtigen Zahl von beeinflussenden Faktoren wie z.B. der Kontaktfläche, den herrschenden Umweltbedingungen, etc. abhängt.

Gemäß DIN IEC/TS 60479-1:2007-05 [39], „*Wirkungen des elektrischen Stromes auf Menschen und Nutztiere – Teil 1: Allgemeine Aspekte*“, können die Zeit/Stromstärke-Bereiche mit Wirkungen von Wechselströmen (15 Hz bis 100 Hz) auf Personen bei einem Stromweg von der linken Hand zu den Füßen (bei einer Körperimpedanz von 1000 Ω) wie folgt angegeben werden:

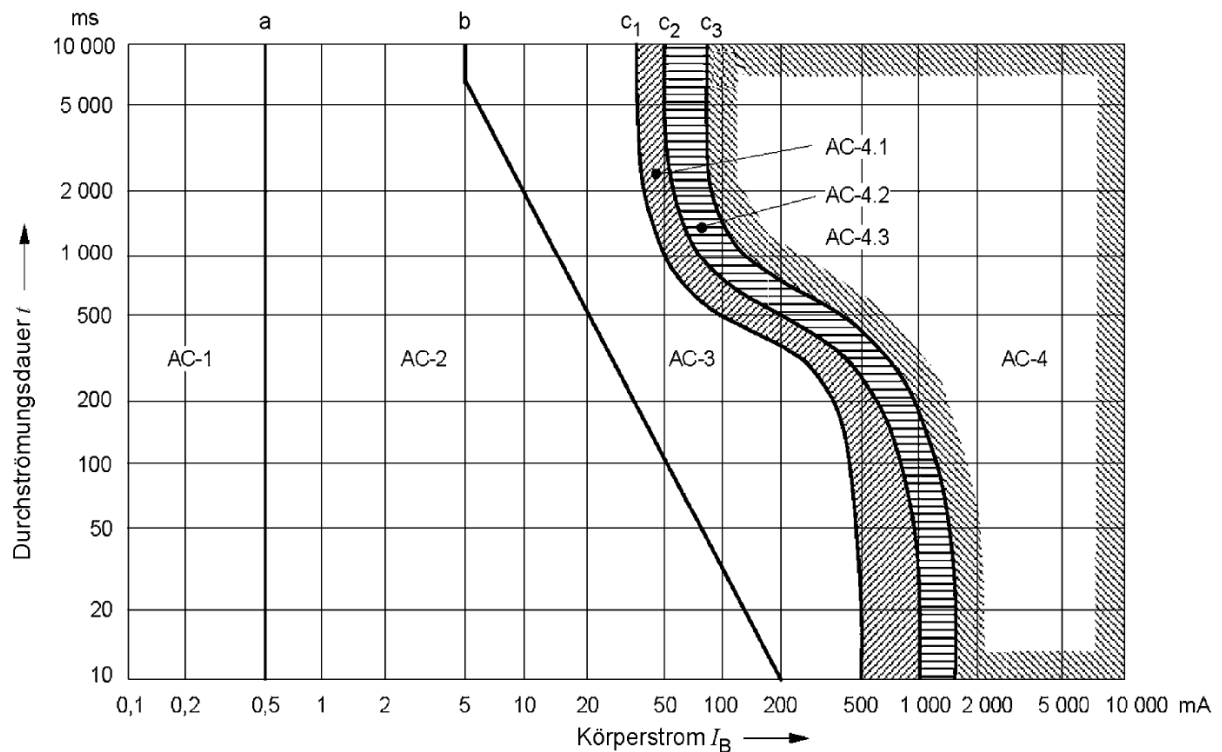


Abbildung 37: Konventionelle Zeit/Stromstärke-Kennlinie mit Wirkungen von Wechselströmen (15 Hz bis 100 Hz) auf Personen bei einem Stromweg von der linken Hand zu den Füßen (Bild 20 aus [39])

Die in Abbildung 37 Zeit/Stromstärke-Bereiche AC-1 bis AC-4 werden in Tabelle 14 näher erörtert.

Tabelle 14: Zeit-Stromstärke-Bereiche für Wechselstrom von 50 Hz bis 100 Hz, für den Stromweg von einer Hand zu beiden Füßen – Zusammenfassung der Bereiche aus Abbildung 37 (Tabelle 11 aus [39])

Bereiche	Bereichsgrenzen	Physiologische Wirkungen
AC-1	<i>bis zu 0,5 mA Grenzlinie a</i>	<i>Wahrnehmung möglich, aber im Allgemeinen keine Schreckreaktion.</i>
AC-2	<i>über 0,5 mA bis Grenzlinie b</i>	<i>Wahrnehmung und unwillkürliche Muskelkontraktionen wahrscheinlich, aber im Allgemeinen keine schädlichen physiologischen Wirkungen.</i>
AC-3	<i>Grenzlinie b bis Grenzlinie c₁</i>	<i>Starke unwillkürliche Muskelkontraktionen, Schwierigkeiten beim Atmen, Reversible Störungen der Herzfunktion, Immobilisierung (Muskelverkrampfung) kann auftreten. Wirkungen zunehmend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer. Im Allgemeinen ist kein organischer Schaden zu erwarten.</i>
AC-4 ¹⁾	<i>über der Grenzlinie c₁</i>	<i>Es können pathophysiologische Wirkungen auftreten wie Herzstillstand, Atemstillstand und Verbrennungen oder andere Zellschaden. Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend mit Stromstärke und Durchströmungsdauer.</i>
	<i>c₁ – c₂</i>	<i>AC-4.1 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend bis etwa 5 %</i>
	<i>c₂ – c₃</i>	<i>AC-4.2 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern ansteigend bis etwa 50 %</i>
	<i>über der Grenzlinie c₃</i>	<i>AC-4.3 Wahrscheinlichkeit von Herzkammerflimmern über 50 %</i>
1) <i>Bei Durchströmungsdauer unter 200 ms tritt Herzkammerflimmern nur auf, wenn die entsprechenden Schwellenwerte in der vulnerablen Periode überschritten werden. Hinsichtlich des Herzkammerflimmerns bezieht sich Bild 20 auf die Wirkungen des Stromes beim Stromweg von der linken Hand zu den Füßen. Bei anderen Stromwegen muss der Herzstromfaktor berücksichtigt werden.</i>		

Anmerkung zu Tabelle 14:

Die Verweise in Tabelle 14 beziehen sich auf die Quelle, also auf die DIN IEC/TS 60479-1:2007-05 [39] und nicht auf diese Arbeit.

Mithilfe der vorangegangenen Abbildung 37 kann bei einer festgelegten Durchströmungsdauer t die maximal zulässige Berührungsspannung U_B wie folgt berechnet werden:

$$U_{B,max} = I_B(t) \cdot 1000 \Omega \quad (7)$$

Anmerkung: In Gleichung (7) wird der Widerstand des menschlichen Körpers z.B. mit 1000Ω angenommen.

4.8.5.4.2.2 Normalbetrieb

Abbildung 38 zeigt die ermittelten, maximal auftretenden Berührungs- bzw. Schrittspannungen der verschiedenen Erder-Konfigurationen bei einem Erderstrom von 1 A in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes (vgl. Abbildung 31) sowie die entsprechenden, in 4.8.5.4.2.1 erläuterten, Grenzen der maximal zulässigen Berührungs- bzw. Schrittspannungen für Niederspannungsnetze im TN-System für den Normalbetrieb.

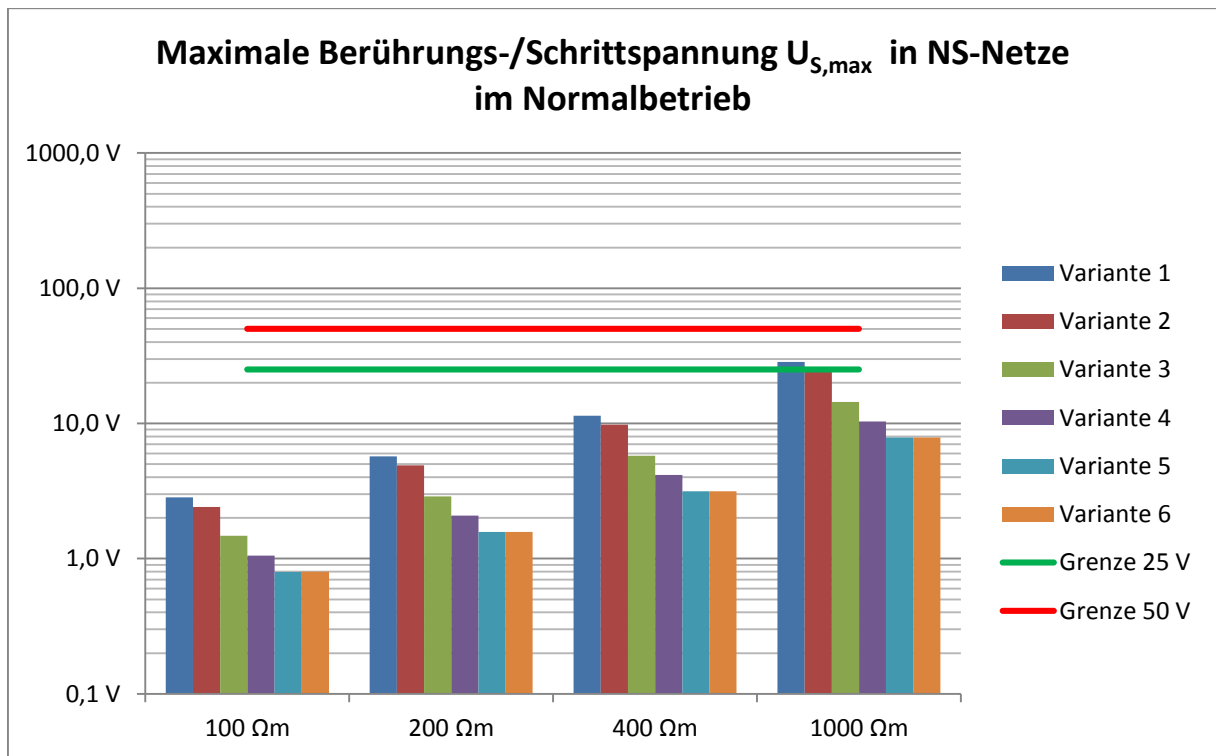


Abbildung 38: Maximale Berührungs- bzw. Schrittspannung $U_{S,max}$ abhängig vom spezifischen Erdwiderstand bei 1 A Erderstrom im Normalbetrieb NS-Netze im TN-System (25/50 V)

Anmerkung: In Abbildung 38 sind die Berührungs- bzw. Schrittspannungen auf einen Erderstrom von 1 A bezogen dargestellt. Für die Beurteilung der in der Praxis auftretenden Fälle müssen die in der Abbildung dargestellten Spannungswerte mit dem über die Erdungsanlage fließenden Strom multipliziert werden. Die tatsächlichen Grenzen für die Spannungswerte stellen die jeweiligen Quellenspannungen dar.

4.8.5.4.2.3 Fehlerfall, Stromflussdauer < 0,4 s bzw. < 5 s

Abbildung 39 zeigt die ermittelten, maximal auftretenden Berührungs- bzw. Schrittspannungen der verschiedenen Erder-Konfigurationen bei einem Erderstrom von 1 A in Abhängigkeit des spezifischen Erdwiderstandes (vgl. Abbildung 31) sowie die entsprechenden, in 4.8.5.4.2.1 erläuterten, Grenzen der maximal zulässigen Berührungs- bzw. Schrittspannungen für Niederspannungsnetze im TN-System für den Fehlerfall mit einer Stromflussdauer kleiner 0,4 s bzw. kleiner 5 s.

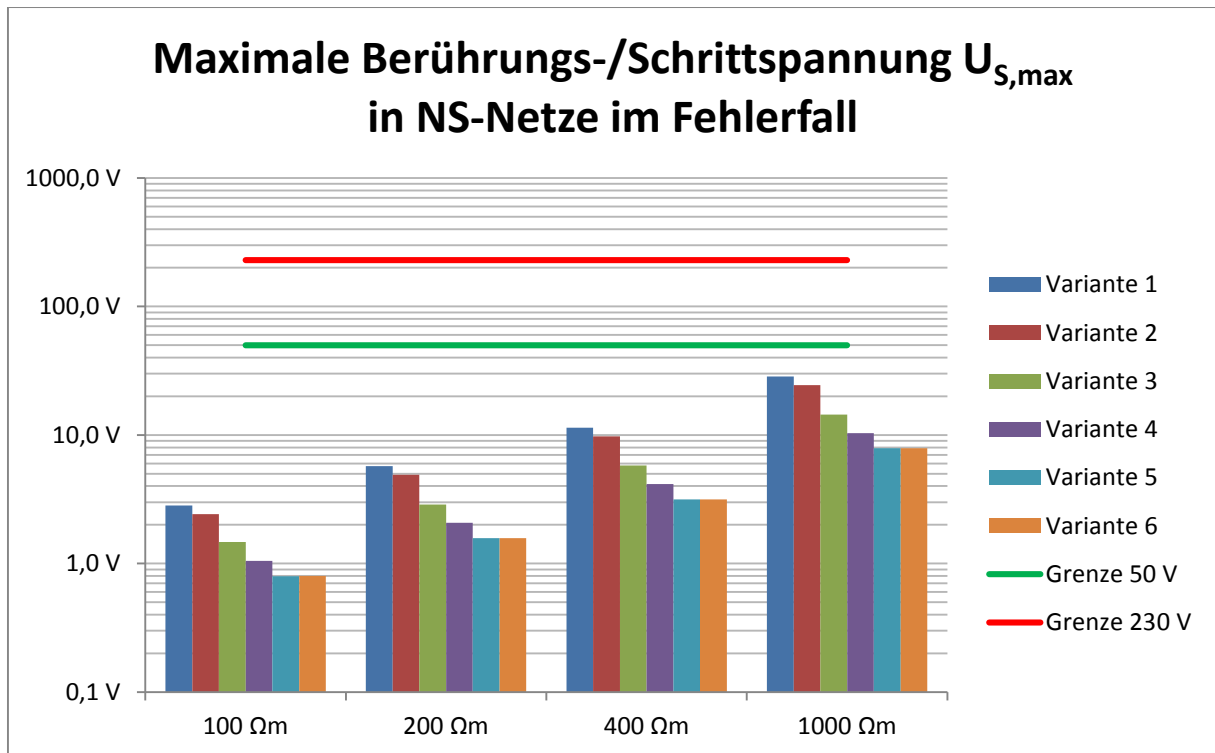


Abbildung 39: Maximale Berührungs- bzw. Schrittspannung $U_{S,max}$ abhängig vom spezifischen Erdwiderstand bei 1 A Erderstrom im Fehlerfall für NS-Netze im TN-System (50/230 V)

Die in Abbildung 39 eingetragene Grenze von 230 V (Nennspannung) gilt für eine Stromeinwirkdauer auf den menschlichen Körper von weniger als 400 ms. Das ist umgerechnet jener Wert für den Körperstrom von 230 mA, der nach Abbildung 37 an der Grenze zu Bereich AC-4 (nach Tabelle 14) liegt und somit bereits zu pathophysiologischen Wirkungen wie Herzstillstand, Atemstillstand oder Verbrennungen führen kann. Die Grenze von 50 V gilt hingegen für eine Stromeinwirkdauer von weniger als 5 s

Anmerkung: In Abbildung 39 sind die Berührungs- bzw. Schrittspannungen auf einen Erderstrom von 1 A bezogen dargestellt. Für die Beurteilung der in der Praxis auftretenden Fälle müssen die in der Abbildung dargestellten Spannungswerte mit dem über die Erdungsanlage fließenden Strom multipliziert werden. Die tatsächlichen Grenzen für die Spannungswerte stellen die jeweiligen Quellenspannungen dar.

5 Mindestquerschnitt von Schutzerdungsleitern

Für die ordnungsgemäße Funktion einer Erdungs- und Potenzialausgleichsanlage ist die vorschriftenkonforme Projektierung aber auch Dimensionierung unerlässlich. Die Erfahrungen zeigen, dass gerade bei der Auswahl des Querschnittes des Schutzerdungsleiters oft nicht normenkonforme Kompromisse eingegangen werden. Diese wiederum können sich im Fehlerfall einerseits als äußerst nachteilig für den Weiterbestand der elektrischen Anlage erweisen, andererseits aber auch zur Gefahrenquelle für Leib und Leben werden (Stromtragfähigkeit, Erwärmung, Beeinträchtigung der Isolierung bzw. Verlust des Basisschutzes, Brandgefahr, elektrischer Schlag).

Daher wird in den folgenden Ausführungen die vorschriftenkonforme Berechnung des Mindestquerschnitts von Schutzerdungsleitern nach ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2], Abschnitt 21.3.1 detailliert beschrieben.

5.1 Normative Berechnungsvorschriften

5.1.1 Gängige Verteiltransformatoren und deren Kurzschlussströme

Gemäß ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2] fließt in die Berechnung des Mindestquerschnitts für Schutzerdungsleiter der Fehlerstrom mit ein, siehe weiter unten Formel (11). Dieser entspricht im Wesentlichen dem Kurzschlussstrom eines Verteiltransformators.

Zur Ermittlung dieses Kurzschlussstromes wird zuerst der sekundäre Nennstrom eines Verteiltransformators $I_{N,sek}$ aus der Nennleistung S_T sowie der sekundärseitigen Nennspannung $U_{N,sek}$ ermittelt.

$$I_{N,sek} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{N,sek}} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} \quad (8)$$

Daraus lässt sich unter Berücksichtigung der relativen Kurzschlussspannung u_k der sekundäre Kurzschlussstrom $I_{k,sek}$ wie folgt berechnen:

$$I_{k,sek} = 1,1 \cdot \frac{100 \%}{u_k} \cdot I_{N,sek} \quad (9)$$

Anmerkung: Der Faktor 1,1 in Gleichung (9) berücksichtigt hierbei den maximal zulässigen Bereich der Netzspannung (obere Grenze) gemäß den Anforderungen der ÖVE/ÖNORM EN 50160:2011-03-01 [40].



In Tabelle 15 sind die Werte für den sekundären Kurzschlussstrom $I_{k,sek}$ abhängig von der Nennleistung S_T unterschiedlicher Verteiltransformatoren (vgl. Leistungstypen gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50588-1:2016-04-01 [41]) und verschiedener Werte für die relative Kurzschlussspannung u_k zusammengestellt.

Tabelle 15: Sekundäre Nenn- und Kurzschlussströme bei Verteiltransformatoren

		u_k			
		4%	6%	8%	10%
S_T	$I_{N,sek}$	$I_{k,sek}$	$I_{k,sek}$	$I_{k,sek}$	$I_{k,sek}$
kVA	A	kA	kA	kA	kA
100	144,3	4,0	2,6	2,0	1,6
160	230,9	6,4	4,2	3,2	2,5
200	288,7	7,9	5,3	4,0	3,2
250	360,8	9,9	6,6	5,0	4,0
400	577,4	15,9	10,6	7,9	6,4
630	909,3	25,0	16,7	12,5	10,0
1000	1443,4	39,7	26,5	19,8	15,9
1600	2309,4	63,5	42,3	31,8	25,4
2000	2886,8	79,4	52,9	39,7	31,8
2500	3608,4	99,2	66,2	49,6	39,7
3150	4546,6	125,0	83,4	62,5	50,0
5000	7216,9	198,5	132,3	99,2	79,4
6300	9093,3	250,1	166,7	125,0	100,0

5.1.2 Ermittlung des Faktors k

Wesentlichen Einfluss auf die Berechnung des Mindestquerschnittes des Schutzerdungsleiters nimmt auch der Faktor k welcher abhängig vom Werkstoff des Leiters, von der Isolierung des Leiters sowie von dessen Anfangs- und Endtemperatur ist. Gemäß ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2], Anhang F lässt sich dieser Faktor k mittels folgender Formel bestimmen:

$$k = \sqrt{\frac{Q_c \cdot (\beta + 20 \text{ °C})}{\rho_{20}} \cdot \ln\left(1 + \frac{\theta_f - \theta_i}{\beta + \theta_i}\right)} \quad (10)$$

Erläuterung der Formelzeichen gemäß [2]:

- Q_c volumetrische Wärmekapazität des Leiterwerkstoffes ($J/^\circ C \cdot mm^3$) bei 20 °C
- β Reziprokwert des Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstandes bei 0 °C für den Leiter ($^\circ C$)
- ρ_{20} spezifischer elektrischer Widerstand des Leiterwerkstoffes bei 20 °C ($\Omega \cdot mm$)
- θ_i Anfangstemperatur des Leiters ($^\circ C$)
- θ_f Endtemperatur des Leiters ($^\circ C$)

In Tabelle 16 sind die entsprechenden, in der obigen Erläuterung genannten Parameter für verschiedene Leiterwerkstoffe gegenübergestellt.

Tabelle 16: Werte der Parameter für verschiedene Leiterwerkstoffe (Tabelle F-1 aus [2])

Werkstoff	$\beta^{(a)}$	$Q_c^{(b)}$	ρ_{20}	$\sqrt{\frac{Q_c \cdot (\beta + 20 \text{ °C})}{\rho_{20}}}$
	$^\circ C$	$\frac{J}{^\circ C \cdot mm^3}$	$\Omega \cdot mm$	$\frac{A \cdot \sqrt{s}}{mm^2}$
Kupfer	234,5	$3,45 \cdot 10^{-3}$	$17,241 \cdot 10^{-6}$	225,7
Aluminium	228	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$28,264 \cdot 10^{-6}$	148,1
Blei	230	$1,45 \cdot 10^{-3}$	$214 \cdot 10^{-6}$	41,2
Stahl	202	$3,8 \cdot 10^{-3}$	$138 \cdot 10^{-6}$	78,2

(a) Werte sind abgeleitet gemäß Tabelle 1 von IEC 60287-1-1:2006
 (b) Werte sind abgeleitet gemäß Tabelle E2 von IEC 60853-2:1989

Die nachfolgenden Tabellen bilden eine Übersicht über mögliche Isolierungsarten bzw. Konfigurationen des Schutzleiters sowie den zugehörig berechneten Werten für den Parameter k nach ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2]. Dabei wird auf folgende Konfigurationen von Schutzleitern gemäß [2] eingegangen:

- a) „isolierte Schutzerdungsleiter, die nicht Bestandteil von Kabeln und Leitungen und nicht mit anderen Kabeln und Leitungen gebündelt sind“, (Tabelle 17)
- b) „blanke Schutzerdungsleiter in Berührung mit Umhüllungen von Kabeln und Leitungen, jedoch ohne Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen“, (Tabelle 18)
- c) „Schutzerdungsleiter, die als Ader innerhalb von Kabeln und Leitungen enthalten sind oder in gemeinsamer Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen oder mit Aderleitungen verlegt sind“, (Tabelle 19)
- d) „Schutzerdungsleiter als metallene Umhüllung von Kabeln und Leitungen, zB als Bewehrung, Metallmantel, konzentrischer Leiter usw.“ (Tabelle 20) und
- e) „blanke Schutzerdungsleiter in Fällen, in denen keine Gefährdung benachbarter Teile infolge der angegebenen Temperaturen entsteht“. (Tabelle 21)

Tabelle 17: Werte von k für isolierte Schutzerdungsleiter, die nicht Bestandteil von Kabeln und Leitungen und nicht mit anderen Kabeln und Leitungen gebündelt sind (Tabelle F-2 aus [2])

Leiterisolierung	Temperatur ^(b)		Leiterwerkstoff		
	Anfang	Ende	Kupfer	Aluminium	Stahl
	°C	°C	Wert für $k^{(c)}$	Wert für $k^{(c)}$	Wert für $k^{(c)}$
70 °C PVC	30	160/140 ^(a)	142,7/133,1 ^(a)	94,6/88,3 ^(a)	52,2/48,7 ^(a)
90 °C PVC	30	160/140 ^(a)	142,7/133,1 ^(a)	94,6/88,3 ^(a)	52,2/48,7 ^(a)
90 °C Duroplast	30	250	175,6	116,3	63,9
60 °C Gummi	30	200	159,0	105,4	58,0
85 °C Gummi	30	220	166,0	110,0	60,5
Silikon-Kautschuk	30	350	200,9	133,0	72,8

^(a) Bei PVC-isolierten Leitern mit Querschnitten über 300 mm² ist der kleinere Wert anzuwenden.
^(b) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.
^(c) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k .

Tabelle 18: Werte von k für blanke Schutzerdungsleiter in Berührung mit Umhüllungen von Kabeln und Leitungen, jedoch ohne Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen (Tabelle F-3 aus [2])

Leiterisolierung	Temperatur ^(a)		Leiterwerkstoff		
	Anfang	Ende	Kupfer	Aluminium	Stahl
	°C	°C	Wert für $k^{(b)}$	Wert für $k^{(b)}$	Wert für $k^{(b)}$
PVC	30	200	159,0	105,4	58,0
Polyethylen	30	150	138,0	91,5	50,5
Ölbeständige Kautschuk (CSP)	30	220	166,0	110,0	60,5

^(a) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.
^(b) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k .

Tabelle 19: Werte von k für Schutzerdungsleiter, die als Ader innerhalb von Kabeln und Leitungen enthalten sind oder in gemeinsamer Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen oder mit Aderleitungen verlegt sind (Tabelle F-4 aus [2])

Leiterisolierung	Temperatur ^(b)		Leiterwerkstoff		
	Anfang	Ende	Kupfer	Aluminium	Stahl
	°C	°C	Wert für k ^(c)	Wert für k ^(c)	Wert für k ^(c)
70 °C PVC	70	160/140 ^(a)	114,8/102,7 ^(a)	76,1/68,0 ^(a)	41,8/37,4 ^(a)
90 °C PVC	90	160/140 ^(a)	99,7/85,4 ^(a)	66,1/56,6 ^(a)	36,2/31,1 ^(a)
90 °C Duroplast	90	250	142,9	94,6	51,7
60 °C Gummi	60	200	140,7	93,2	51,2
85 °C Gummi	85	220	134,0	88,7	48,5
Silikon-Kautschuk	180	350	132,3	87,4	47,4

^(a) Bei PVC-isolierten Leitern mit Querschnitten über 300 mm² ist der kleinere Wert anzuwenden.
^(b) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.
^(c) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k.

Tabelle 20: Werte von k für Schutzerdungsleiter als metallene Umhüllung von Kabeln und Leitungen, zB als Bewehrung, Metallmantel, konzentrischer Leiter usw. (Tabelle F-5 aus [2])

Leiterisolierung	Temperatur ^(a)		Leiterwerkstoff			
	Anfang	Ende	Kupfer	Aluminium	Blei	Stahl
	°C	°C	Wert für k ^(c)	Wert für k ^(c)	Wert für k ^(c)	Wert für k ^(c)
70 °C PVC	60	200	140,7	93,2	25,8	51,2
90 °C PVC	80	200	128,3	85,0	23,5	46,6
90 °C Duroplast	80	200	128,3	85,0	23,5	46,6
60 °C Gummi	85	200	125,1	82,9	23,0	45,4
85 °C Gummi	75	220	139,9	92,6	25,7	50,7
Mineral PVC-umhüllt^(b)	70	200	134,6	---	---	---
reines Mineral	105	250	134,6	---	---	---

^(a) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.
^(b) Diese Werte dürfen auch für blanke Leiter angewendet werden, bei denen die Möglichkeit einer Berührung mit brennbarem Material besteht.
^(c) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k.

Tabelle 21: Werte von k für blanke Schutzerdungsleiter in Fällen, in denen keine Gefährdung benachbarter Teile infolge der angegebenen Temperaturen entsteht (Tabelle F-6 aus [2])

Bedingungen	Anfangs-Temperatur	Leiterwerkstoff					
		Kupfer		Aluminium		Stahl	
		max. Temp.	Wert für k	max. Temp.	Wert für k	max. Temp.	Wert für k
	°C	°C	°C	°C	°C	°C	
sichtbar und im abgegrenzten Bereich	30	500	228,1	300	125,3	500	82,3
normale Bedingungen	30	200	159,0	200	105,4	200	58,0
Feuergefährdung	30	150	138,0	150	91,5	150	50,5



5.1.3 Mindestquerschnitt von Schutzleitern

Schließlich errechnet sich der Mindestquerschnitt von Schutzleitern mit Hilfe des Fehlerstromes I , der Ansprechzeit t der Schutzeinrichtung sowie dem zuvor beschriebenen Faktor k laut ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2], Abschnitt 21.3.1.1 nach folgender Formel:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{k} \quad (11)$$

Erläuterung der Formelzeichen gemäß [2]:

- S* Querschnitt des Schutzerdungsleiters in mm^2
I Effektivwert des zu erwartenden Fehlerstromes in A, der bei einem Fehler mit vernachlässigbarer Impedanz durch die Schutzeinrichtung fließen kann (siehe IEC 60949)
t Ansprechzeit der Schutzeinrichtung für die automatische Abschaltung der Stromversorgung in s
k Faktor, der vom Werkstoff des Schutzerdungsleiters, von der Isolierung und anderen Teilen sowie von der Anfangs- und Endtemperatur des Leiters abhängig ist

Die folgenden Tabellen (Tabelle 23 bis Tabelle 27 in Kapitel 5.4) dienen als beispielhafte Darstellung der unterschiedlichen Mindestquerschnitte für die verschiedenen Konfigurationen eines Schutzleiters (vgl. Tabelle 17 bis Tabelle 21 in Kapitel 5.1.2) in Abhängigkeit der Leiterisolierung bzw. der entsprechenden Bedingungen sowie in Abhängigkeit der Verteiltransformator-Leistung.

Dabei wurden folgende Annahmen getroffen:

Leiterwerkstoff:	Kupfer
Ansprechzeit der Schutzeinrichtung:	$t = 0,5 \text{ s}$
relative Kurzschlussspannung des Trafos:	$u_k = 4 \%$

Anmerkung: Mit Hilfe der beim Autor erhältlichen bzw. am Institut für Elektrische Anlagen und Netze der Technischen Universität Graz verfügbaren Excel⁸-Datei können zusätzlich folgende Kombinationen berechnet werden:

Leiterwerkstoff:	<i>Kupfer; Aluminium; Stahl; Blei</i>
Ansprechzeit der Schutzeinrichtung t :	<i>0,1 s; 0,15 s; 0,3 s; 0,4 s; 0,5 s; 1 s 1,5 s; 2 s; 2,5 s; 3 s; 4 s; 5 s</i>
rel. Kurzschlusspg. des Trafos u_k :	<i>4 %; 5 %; 6 %; 7 %; 8 %; 9 %; 10 %</i>

⁸ Excel – Tabellenkalkulationssoftware der US-amerikanischen Firma Microsoft Corporation

5.2 Berechnungsbeispiel zur Ermittlung des Mindestquerschnitts von Schutzerdungsleitern

Zum Zwecke der Nachvollziehbarkeit der tabellarischen Ergebnisse in Kapitel 5.4. sowie um die Berechnung für einen konkreten Fall zu erleichtern, wird nachfolgend ein Berechnungsbeispiel durchgeführt.

Sämtliche, dabei getroffene Annahmen sind in Tabelle 22 zusammengestellt.

Tabelle 22: Annahmen Berechnungsbeispiel

Funktion	Begleiterder
Leiterwerkstoff	Kupfer
Konfiguration	Konfiguration b) vgl. Tabelle 18 (blanke Schutzerdungsleiter in Berührung mit Umhüllungen von Kabeln und Leitungen, jedoch ohne Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen)
Leistung des Verteiltransformators	$S_T = 630 \text{ kVA}$
Relative Kurzschlussspannung des Verteiltransformators	$u_k = 4 \%$
Ansprechzeit der Schutzeinrichtung	$t = 0,5 \text{ s}$
volumetrische Wärmekapazität des Leiterwerkstoffes	$Q_c = 3,45 \cdot 10^{-3} \text{ J}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{mm}^3)$ bei $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Reziprokwert des Temperaturkoeffizienten des spezifischen Widerstandes bei $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ für den Leiter	$\beta = 234,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
spezifischer elektrischer Widerstand des Leiterwerkstoffes bei $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$	$\rho_{20} = 17,241 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{mm}$
Anfangstemperatur des Leiters	$\theta_i = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Endtemperatur des Leiter	$\theta_f = 150 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Zuerst wird anhand der Daten des Verteiltransformators dessen sekundärer Kurzschlussstrom ermittelt, dieser entspricht dem zu erwartenden Fehlerstrom durch den Schutzleiter.

Nach Formel (8) errechnet sich der sekundäre Nennstrom des Verteiltransformators wie folgt:

$$I_{N,sek} = \frac{S_T}{\sqrt{3} \cdot U_{N,sek}} = \frac{630 \text{ kVA}}{\sqrt{3} \cdot 400 \text{ V}} = 909,3 \text{ A} \quad (12)$$

Daraus lässt sich unter Berücksichtigung der relativen Kurzschlussspannung der sekundäre Kurzschlussstrom mit nachfolgender Formel (9) berechnen:

$$I_{k,sek} = 1,1 \cdot \frac{100 \%}{u_k} \cdot I_{N,sek} = \frac{100 \%}{4 \%} \cdot 909,3 A = 25,0 kA \quad (13)$$

Mit Hilfe von Formel (10) lässt sich der Faktor k berechnen:

$$\begin{aligned} k &= \sqrt{\frac{Q_c \cdot (\beta + 20^\circ C)}{\rho_{20}} \cdot \ln\left(1 + \frac{\theta_f - \theta_i}{\beta + \theta_i}\right)} \\ &= \sqrt{\frac{3,45 \cdot 10^{-3} \frac{J}{^\circ C \cdot mm^3} \cdot (234,5^\circ C + 20^\circ C)}{17,241 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot mm} \cdot \ln\left(1 + \frac{150^\circ C - 30^\circ C}{234,5^\circ C + 30^\circ C}\right)} \quad (14) \\ &= 225,67 \sqrt{\frac{J}{^\circ C \cdot mm^3} \cdot ^\circ C} \cdot 0,61 = 138,03 \frac{A \cdot \sqrt{s}}{mm^2} \end{aligned}$$

Schließlich errechnet sich der Mindestquerschnitt für den Schutzleiter S nach Formel (11) wie folgt:

$$S = \frac{\sqrt{I^2 \cdot t}}{k} = \frac{\sqrt{(I_{k,sek})^2 \cdot t}}{k} = \frac{\sqrt{(25,0 kA)^2 \cdot 0,5 s}}{138,03 \frac{A \cdot \sqrt{s}}{mm^2}} = 128,12 mm^2 \quad (15)$$

Der mit Hilfe von Formel (15) berechnete Mindestquerschnitt von **S ≈ 128 mm²** findet sich in Tabelle 24 (Kapitel 5.4) grün hinterlegt.



5.3 Verwendung der Tabellen

Das folgende Beispiel dient als Erläuterung zur Verwendung der in Kapitel 5.4 dargestellten Tabellen (Tabelle 23 bis Tabelle 27)).

Des Weiteren kann das eben genannte Beispiel sinngemäß auch zur Verwendung der in Kapitel 5.1.3 erwähnten Excel-Datei angewendet werden.

i. Auswahl der Schutzleiter-Konfiguration (siehe Kapitel 5.1.2):

*z.B. Konfiguration b)
(blanke Schutzerdungsleiter in Berührung mit Umhüllungen von Kabeln und Leitungen, jedoch ohne Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen)*

ii. Auswahl des Leiterwerkstoffes des Schutzleiters:

z.B. Kupfer

iii. Auswahl der Ansprechzeit der Schutzeinrichtung:

z.B. $t = 0,5 \text{ s}$

iv. Auswahl der relativen Kurzschlussspannung:

z.B. $u_k = 4 \%$

→ Daraus ergibt sich die Verwendung von Tabelle 24.

v. Auswahl der Leistung des entsprechenden Verteiltransformators:

z.B. $S_T = 630 \text{ kVA}$

→ Daraus ergibt sich der sekundäre Kurzschlussstrom zu

$$I_{k,sek} = 25,0 \text{ kA}$$

vi. Auswahl der Leiterisolierung:

z.B. Polyethylen

vii. Es ergibt sich ein Mindestquerschnitt von:

$$S = 128 \text{ mm}^2$$

(in Tabelle 24 grün hinterlegt)

5.4 Tabellen für Mindestquerschnitte von Schutzleitern unterschiedlicher Konfigurationen (beispielhafter Auszug mit entsprechenden Annahmen)

Mit Hilfe der folgenden Tabellen (Tabelle 23 bis Tabelle 27) bzw. der zuvor beschriebenen Excel-Mappe lässt sich der Mindestquerschnitt eines Schutzerdungsleiters für eine bestimmte Konfiguration ermitteln. Um die Verwendung der nachfolgenden Tabellen zu erleichtern, ist in Abbildung 40 das in Kapitel 5.2 und 5.3 erläuterte Beispiel als Flussdiagramm dargestellt.

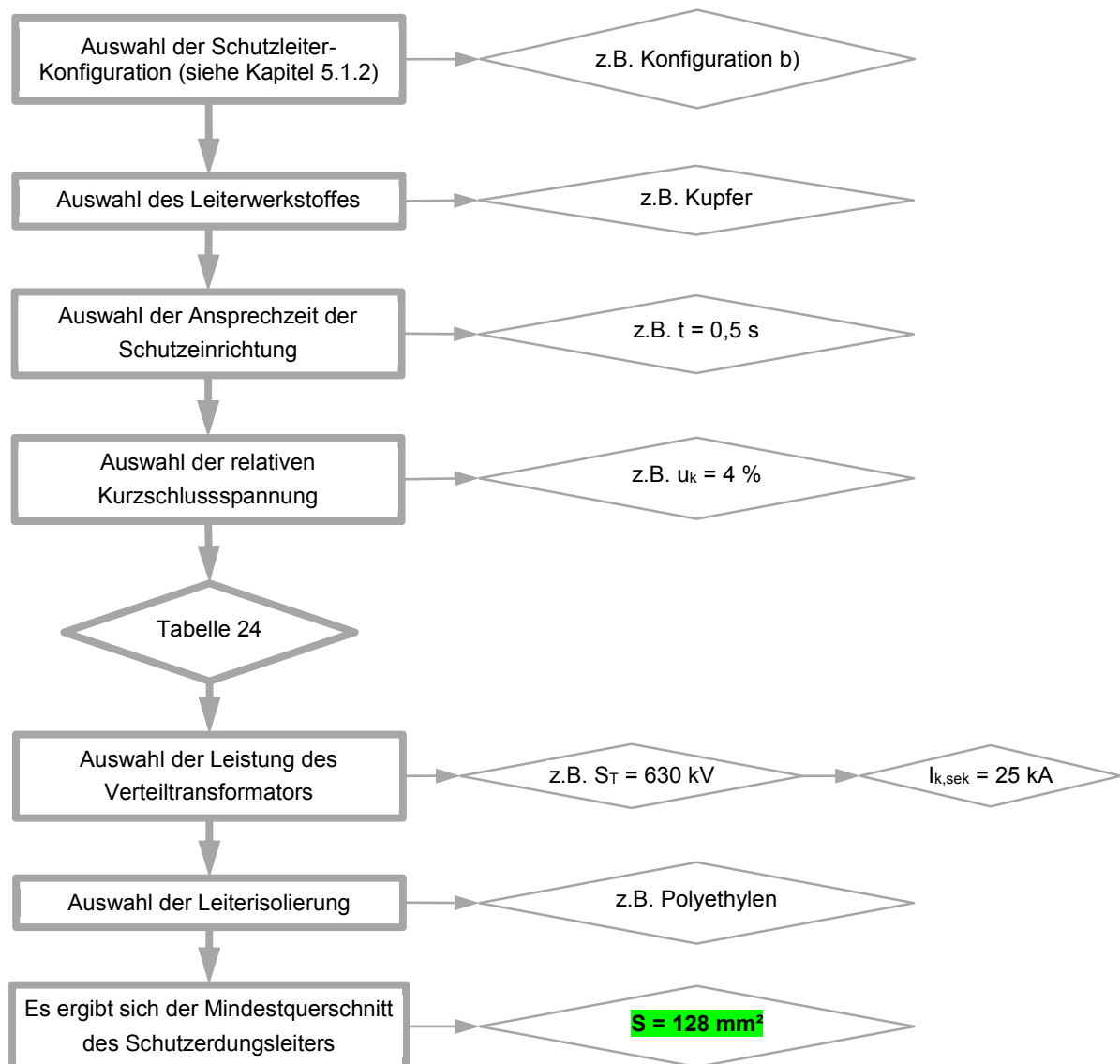


Abbildung 40: Flussdiagramm zum Auslesen der Tabellen

Tabelle 23: Mindestquerschnitt für isolierte Schutzerdungsleiter, die nicht Bestandteil von Kabeln und Leitungen und nicht mit anderen Kabeln und Leitungen gebündelt sind, Leiterwerkstoff Kupfer, Ansprechzeit $t = 0,5$ s, relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ % (vgl. Tabelle F-2 aus [2])

Leiterwerkstoff	t	u_k	S _T in kVA															
			100	160	200	250	400	630	1000	1600	2000	2500	3150	5000	6300			
Kupfer	0,5 s	4 %	144,3	230,9	288,7	360,8	577,4	909,3	1443,4	2309,4	2886,8	3608,4	4546,6	7216,9	9093,3			
			I _{N,sek} in A															
			I _{k,sek} in kA															
			4,0	6,4	7,9	9,9	15,9	25,0	39,7	63,5	79,4	99,2	125,0	198,5	250,1			
			S in mm ²															
			$k^{(a),(c)}$															
			$A \cdot \sqrt{S}$ mm ²															
70 °C PVC	30	160	140	142,7	133,1	20	31	39	49	79	124	197	337	422	527	664	1055	1329
90 °C PVC	30	160	140	142,7	133,1	20	31	39	49	79	124	197	337	422	527	664	1055	1329
90 °C Duroplast	30	250	---	175,6	---	16	26	32	40	64	101	160	256	320	400	504	799	1007
60 °C Gummi	30	200	---	159,0	---	18	28	35	44	71	111	177	282	353	441	556	883	1112
85 °C Gummi	30	220	---	166,0	---	17	27	34	42	68	106	169	270	338	423	532	845	1065
Silikon-Kautschuk	30	350	---	200,9	---	14	22	28	35	56	88	140	223	279	349	440	698	880

(a) Bei PVC-isolierten Leitern mit Querschnitten über 300 mm² ist der kleinere Wert anzuwenden.
 (b) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.
 (c) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k.

Tabelle 23 beinhaltet eine Übersicht über Mindestquerschnitte für Schutzerdungsleiter S in mm² für den in 5.1.2 beschriebenen Fall a) unter Berücksichtigung folgender Annahmen:

- Leiterwerkstoff Kupfer,
- Ansprechzeit der Schutzeinrichtung $t = 0,5$ s,
- relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ %

Tabelle 24: Mindestquerschnitt für blanke Schutzerdungsleiter in Berührung mit Umhüllungen von Kabeln und Leitungen, jedoch ohne Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen, Leiterwerkstoff Kupfer, Ansprechzeit $t = 0,5$ s, relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ % (vgl. Tabelle F-3 aus [2])

Leiterwerkstoff	t	u_k	S _T in kVA												
			100	160	200	250	400	630	1000	1600	2000	2500	3150	5000	6300
Kupfer	0,5 s	4 %	144,3	230,9	288,7	360,8	577,4	909,3	1443,4	2309,4	2886,8	3608,4	4546,6	7216,9	9093,3
Leiterisolierung	Temperatur ^(a)		I _{N,sek} in A												
	Anfang	Ende	I _{k,sek} in kA												
	°C	°C	4,0	6,4	7,9	9,9	15,9	25,0	39,7	63,5	79,4	99,2	125,0	198,5	250,1
		$A \cdot \sqrt{s}$ mm ²	S in mm ²												
PVC	30	200	18	28	35	44	71	111	177	282	353	441	556	883	1112
Polyethylen	30	150	20	33	41	51	81	128	203	325	407	508	641	1017	1281
ölbeständiger Kautschuk (CSP)	30	220	17	27	34	42	68	106	169	270	338	423	532	845	1065

^(a) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.

^(b) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k.

Tabelle 24 beinhaltet eine Übersicht über Mindestquerschnitte für Schutzerdungsleiter S in mm² für den in 5.1.2 beschriebenen Fall b) unter Berücksichtigung folgender Annahmen:

- Leiterwerkstoff Kupfer,
- Ansprechzeit der Schutzeinrichtung $t = 0,5$ s,
- relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ %

Tabelle 25: Mindestquerschnitt für Schutzerdungsleiter, die als Ader innerhalb von Kabeln und Leitungen enthalten sind oder in gemeinsamer Bündelung mit anderen Kabeln und Leitungen oder mit Aderleitungen verlegt sind, Leiterwerkstoff Kupfer, Ansprechzeit $t = 0,5$ s, relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ %
 ((vgl. Tabelle F-3 aus [2])vgl. Tabelle F-4 aus [2])

Leiterwerkstoff	t	u_k	S_T in kVA															
			100	160	200	250	400	630	1000	1600	2000	2500	3150	5000	6300			
Kupfer	0,5 s	4 %	144,3	230,9	288,7	360,8	577,4	909,3	1443,4	2309,4	2886,8	3608,4	4546,6	7216,9	9093,3			
Leiterisolierung	Temperatur ^(b)		$I_{k,sek}$ in A															
	Anfang	Ende ^(e)	$I_{k,sek}$ in kA															
	°C	°C	4,0	6,4	7,9	9,9	15,9	25,0	39,7	63,5	79,4	99,2	125,0	198,5	250,1			
			S in mm ²															
			$k^{(a),(c)}$															
			$A \cdot \sqrt{s}$ mm ²															
70 °C PVC	70	160	140	114,8	102,7	24	39	49	61	98	154	244	437	547	684	861	1367	1723
90 °C PVC	90	160	140	99,7	85,4	28	45	56	70	113	177	281	526	657	821	1035	1643	2070
90 °C Duroplast	90	250	---	142,9	---	20	31	39	49	79	124	196	314	393	491	619	982	1238
60 °C Gummi	60	200	---	140,7	---	20	32	40	50	80	126	199	319	399	499	628	997	1256
85 °C Gummi	85	220	---	134,0	---	21	34	42	52	84	132	209	335	419	524	660	1047	1320
Silikon-Kautschuk	180	350	---	132,3	---	21	34	42	53	85	134	212	339	424	530	668	1061	1337

^(a) Bei PVC-isolierten Leitern mit Querschnitten über 300 mm² ist der kleinere Wert anzuwenden.
^(b) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.
^(c) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k.

Tabelle 25 beinhaltet eine Übersicht über Mindestquerschnitte für Schutzerdungsleiter S in mm² für den in 5.1.2 beschriebenen Fall b) unter Berücksichtigung folgender Annahmen:

- Leiterwerkstoff Kupfer,
- Ansprechzeit der Schutzeinrichtung $t = 0,5$ s,
- relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ %

Tabelle 26: Mindestquerschnitt für Schutzerdungsleiter als metallene Umhüllung von Kabeln und Leitungen, z.B. als Bewehrung, Metallmantel, konzentrischer Leiter usw., Leiterwerkstoff Kupfer, Ansprechzeit $t = 0,5$ s, relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ % (vgl. Tabelle F-5 aus [2])

Leiterwerkstoff	t	u_k	S _T in kVA												
			100	160	200	250	400	630	1000	1600	2000	2500	3150	5000	6300
Kupfer	0,5 s	4 %	144,3	230,9	288,7	360,8	577,4	909,3	1443,4	2309,4	2886,8	3608,4	4546,6	7216,9	9093,3
Leiterisolierung	Temperatur ^(a)		I _{N,sek} in A												
	Anfang	Ende	I _{k,sek} in kA												
	°C	°C	4,0	6,4	7,9	9,9	15,9	25,0	39,7	63,5	79,4	99,2	125,0	198,5	250,1
		$\frac{A \cdot \sqrt{s}}{mm^2}$	S in mm ²												
70 °C PVC	60	200	20	32	40	50	80	126	199	319	399	499	628	997	1256
90 °C PVC	80	200	22	35	44	55	88	138	219	350	438	547	689	1094	1378
90 °C Duroplast	80	200	22	35	44	55	88	138	219	350	438	547	689	1094	1378
60 °C Gummi	85	200	22	36	45	56	90	141	224	359	449	561	707	1122	1413
85 °C Gummi	75	220	20	32	40	50	80	126	201	321	401	502	632	1003	1264
Mineral PVC- umhüllt ^(b)	70	200	21	33	42	52	83	131	209	334	417	521	657	1043	1314
reines Mineral	105	250	21	33	42	52	83	131	209	334	417	521	657	1043	1314

(a) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.
 (b) Diese Werte dürfen auch für blanke Leiter angewendet werden, bei denen die Möglichkeit einer Berührung mit brennbarem Material besteht.
 (c) ...Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k.

Tabelle 26 beinhaltet eine Übersicht über Mindestquerschnitte für Schutzerdungsleiter S in mm² für den in 5.1.2 beschriebenen Fall b) unter Berücksichtigung folgender Annahmen:

- Leiterwerkstoff Kupfer,
- Ansprechzeit der Schutzeinrichtung $t = 0,5$ s,
- relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ %

Tabelle 27: Mindestquerschnitt für blanke Schutzerdungsleiter in Fällen, in denen keine Gefährdung benachbarter Teile infolge der angegebenen Temperaturen entsteht, Leiterwerkstoff Kupfer, Ansprechzeit $t = 0,5$ s, relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ % (vgl. Tabelle F-6 aus [2])

Leiterwerkstoff	t	u_k	S_T in kVA												
			100	160	200	250	400	630	1000	1600	2000	2500	3150	5000	6300
Kupfer	0,5 s	4 %	144,3	230,9	288,7	360,8	577,4	909,3	1443,4	2309,4	2886,8	3608,4	4546,6	7216,9	9093,3
Leiterisolierung	Temperatur ^(a)		$I_{n,sek}$ in A												
	Anfang	Ende	$I_{k,sek}$ in kA												
	°C	°C	4,0	6,4	7,9	9,9	15,9	25,0	39,7	63,5	79,4	99,2	125,0	198,5	250,1
		$\frac{A \cdot \sqrt{s}}{mm^2}$	S in mm²												
sichtbar und im abgegrenzten Bereich	30	500	12	20	25	31	49	78	123	197	246	308	388	615	775
normale Bedingungen	30	200	18	28	35	44	71	111	177	282	353	441	556	883	1112
Feuergefährdung	30	150	20	33	41	51	81	128	203	325	407	508	641	1017	1281

^(a) Temperaturgrenzwerte für verschiedene Arten der Isolierung sind in IEC 60724 enthalten.

^(b) Bezüglich des Verfahrens zur Berechnung siehe Formel für k.

Tabelle 27 beinhaltet eine Übersicht über Mindestquerschnitte für Schutzerdungsleiter S in mm² für den in 5.1.2 beschriebenen Fall b) unter Berücksichtigung folgender Annahmen:

- Leiterwerkstoff Kupfer,
- Ansprechzeit der Schutzeinrichtung $t = 0,5$ s,
- relative Kurzschlussspannung $u_k = 4$ %

6 Diskussion

6.1 Zu Kapitel 3 – Überprüfung von DC-Ladestationen

Durch die Entwicklung und den Aufbau des Messverteilers sowie durch die ersten Versuche konnten wesentliche Erfahrungen bzw. Erkenntnisse zur Funktion und zum Verhalten einer DC-Ladestation – einerseits während des Normalbetriebs, andererseits im Fehlerfall – erworben werden. Mit Hilfe des Messverteilers ist es erfolgreich gelungen, Fehlersimulationen hinsichtlich der Unterbrechung der DC-Leistungsleitungen, des PE-Leiters sowie sämtlicher Signalleitungen, widerstandsbehaftete Erdschlüsse und widerstandsbehaftete Kurzschlüsse durchzuführen. Die Analyse der Messdaten hinsichtlich Spannungs- bzw. Strommaximalwerte, die Abschaltzeiten sowie das generelle Verhalten der Ladestation im fehlerfreien und im fehlerbehafteten Betrieb fließen in weiterer Folge in die Entwicklung der Prüfroutinen bzw. in ein Konzept für ein entsprechendes Prüfgerät für DC-Ladestationen mit ein. Zukünftig sind weitere Versuche an DC-Ladestationen von anderen Herstellern geplant um die Ergebnisse der ersten Messungen zu verifizieren. (vgl. [5])

Im Zuge der vorliegenden Arbeit ist es gelungen, eine Kooperation mit einem regionalen, international etablierten Hersteller von Prüfständen einzugehen, um im Zuge eines bereits angenommen bzw. genehmigten Projektes – gefördert von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) – gemeinsam ein entsprechendes Prüfgerät zur Überprüfung der Schutzmaßnahmen zum Schutz von Personen gegen elektrischen Schlag zu entwickeln.

6.2 Zu Kapitel 4 – Erdungsanlagen von DC-Ladestationen

Für unterschiedliche Anwendungen und Einsatzbereiche existieren verschiedene Ausführungsformen von Erdern, welche je nach Boden- bzw. Erdreichbeschaffenheit sowie Umgebungsbedingungen entsprechend einzusetzen sind. Am Beispiel der Erdungsanlage einer DC-Ladestation lässt sich erkennen, dass die zur Einhaltung sämtlicher, normativer Vorgaben notwendige Ausführungsform bzw. -variante stark vom vorhandenen spezifischen Erdwiderstand abhängt. Zudem muss bei der Dimensionierung der maximal auftretende Fehlerstrom (abhängig von der Sternpunktbehandlung der Quelle sowie der Netzebene/Spannungshöhe), welcher maßgebend für die Höhe der maximal auftretenden Berührungs-/Schrittspannung ist, Berücksichtigung finden. Für einen Zusammenschluss einer Niederspannungs- mit einer Mittelspannungserdungsanlage gelten außerdem andere normative Grenzen als für separat geführte Niederspannungs- und Hochspannungs-Erdungsanlagen.

Grundsätzlich wird vor der Errichtung einer Erdungsanlage für eine DC-Ladestation eine Messung des spezifischen Erdwiderstandes (bspw. mit Hilfe der Methode nach Wenner oder



nach Schlumberger) sowie eine Analyse der näheren Umgebung hinsichtlich beeinflussender Erdungssysteme von Anlagen abweichender Nennspannung und Netzform empfohlen. In weiterer Folge können die entsprechend gültigen Grenzwerte der maximal erlaubten Berührungs-/Schrittspannungen ermittelt und geeignete Konfigurationen von Erdungsanlagen zur Gewährleistung des sicheren Betriebs hinsichtlich des Schutzes von Personen gegen elektrischen Schlag ausgewählt werden.

Sofern Ladestationen in dicht bebautem Gebiet errichtet werden, ist davon auszugehen, dass sich die Erdungsanlage einer solchen neuen DC-Ladestation in das (in Kapitel 4.2 definierte) sogenannte globale Erdungssystem eingliedert. In Folge dessen kann im urbanen bzw. dicht besiedelten Gebiet (ab etwa 7 Objekten mit Fundamenterdern gemäß [27] in der näheren Umgebung und bei einem spezifischen Erdwiderstand von $\rho < 200 \Omega\text{m}$) auf die Errichtung von Elementen zur Potenzialsteuerung (wie z.B. der in den Varianten 5 & 6 nach Kapitel 4.8.1 beschriebene mäanderförmige Erder) verzichtet werden.

Überall dort, wo nicht mit einer hohen Vermaschung durch ein globales Erdungssystem gerechnet werden kann, ist eine engmaschige Erdungsanlage (beispielsweise rechteckig verlegter Bänderder mit einem hohen Grad an Vermaschung) zu empfehlen. Sollte dies baulich nicht möglich sein, sind geeignete Maßnahmen wie z.B. Standortisolierung oder Potenzialsteuerung im Umfeld der Ladestation zu empfehlen. Zusätzlich sind gegebenenfalls geeignete Blitzschutzmaßnahmen erforderlich.

Es wird darauf hingewiesen, dass grundsätzlich keine pauschalen Aussagen hinsichtlich sämtlicher Aufstellungsvarianten und Standortsituationen von Ladestationen getroffen werden und Abwandlungen der beispielhaften Anordnung eine gesonderte Analyse erfordern können.

6.3 Zu Kapitel 5 – Mindestquerschnitt von Schutzerdungsleitern

Kapitel 5 zeigt die normative Berechnung des Mindestquerschnittes eines Schutzerdungsleiters gemäß ÖVE/ÖNORM E 8001-1:2010-03-01 [2], Abschnitt 21.3.1. Anhand eines Berechnungsbeispiels wird die Vorgehensweise im Detail erörtert, beispielhaft sind Tabellen für verschiedene Schutzleiterkonfigurationen, Leiterwerkstoffe sowie Auslösezeiten bei unterschiedlichen Transformatorenkennwerten angegeben. Ergänzend ist eine Microsoft Excel Mappe verfügbar welche eine Auswahl sämtlicher Kombinationen der beschriebenen Konfigurationen, Werkstoffe und Auslösezeiten ermöglicht und die entsprechenden Mindestquerschnitte errechnet.

Um eine normenkonforme Errichtung einer Erdungsanlage zu gewährleisten, sind die durch die angegebene Berechnung ermittelten Mindestquerschnitte von Schutzerdungsleitern unbedingt einzuhalten.

Es wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass es sich bei den errechneten Querschnitten um Mindestquerschnitte handelt, eine Verwendung höherer Querschnitte ist demnach zulässig und gegebenenfalls aufgrund der niedrigeren Induktivitäten sinnvoll.

7 Literatur

- [1] *ÖVE/ÖNORM EN 62196-3 - Stecker, Steckdosen und Fahrzeugsteckvorrichtungen - [...] - Teil 3: [...] Fahrzeugsteckvorrichtungen zum dedizierten Laden mit Gleichstrom und als kombinierte Ausführung zum Laden mit Wechselstrom/Gleichstrom*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.06.2015.
- [2] *ÖVE/ÖNORM E 8001-1 - Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V, Teil 1: Begriffe und Schutz gegen elektrischen Schlag (Schutzmaßnahmen)*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.03.2010.
- [3] *ÖVE/ÖNORM EN 62196-2 - Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen - Teil 2: Anforderungen und Hauptmaße für die Kompatibilität und Austauschbarkeit von Stift- und Buchsensteckvor. f. Wechselst.*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.12.2017.
- [4] *ÖVE/ÖNORM EN 61851-1 - Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.03.2012.
- [5] D. Herbst et al., *Konzept und Prototyp zur Überprüfung der Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag von DC-Ladestationen für Elektrofahrzeuge*, 15. Symposium Energieinnovation, Graz, 2018.
- [6] *ÖVE/ÖNORM EN 62196-1 - Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Konduktives Laden von Elektrofahrzeugen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.07.2015.
- [7] *ÖVE/ÖNORM EN 61851-22 - Elektrische Ausrüstung von Elektro-Straßenfahrzeugen - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 22: Wechselstrom-Ladestation für Elektrofahrzeuge*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.12.2002.
- [8] *ÖVE/ÖNORM EN 61851-23 - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Teil 23: Gleichstromladestationen für Elektrofahrzeuge*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.12.2014.
- [9] *Bundesgesetz über Sicherheitsmaßnahmen, Normalisierung und Typisierung auf dem Gebiete der Elektrotechnik (Elektrotechnikgesetz 1992 – ETG 1992)*, Wien: Österreichisches Bundeskanzleramt, www.ris.bka.gv.at, StF: BGBl. Nr. 106/1993, idF BGBl. I Nr. 27/2017.
- [10] *Verordnung über den Schutz der Arbeitnehmer/innen vor Gefahren durch den elektrischen Strom (Elektroschutzverordnung 2012 – ESV 2012)*, Wien: Österreichisches



Bundeskanzleramt, www.ris.bka.gv.at, StF: BGBl. II Nr. 33/2012.

- [11] *Verordnung des Bundesministers für Wirtschaft und Arbeit über Sicherheit, Normalisierung und Typisierung elektrischer Betriebsmittel und Anlagen sowie sonstiger Anlagen im Gefährdungs- und Störungsbereich elektrischer Anlagen (... ETV 2002)*, Wien: Österreichisches Bundeskanzleramt, www.ris.bka.gv.at, StF: BGBl. II Nr. 222/2002, idF BGBl. II Nr. 229/2014.
- [12] *DIN VDE V 0122-2-300 - ENTWURF - Spezifikation zur Konformitätsprüfung zu IEC 61851-23, Anhang CC*, Berlin: VDE VERLAG GMBH, 04.2016.
- [13] *ÖVE/ÖNORM EN 61439-1 - Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen - Teil 1: Allgemeine Festlegungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.07.2012.
- [14] *IEC 60245-6 - Rubber insulated cables - Rated voltages up to and including 450/750 V - Part 6: Arc welding electrode cables*, Genf: IEC - International Electrotechnical Commission, 07.1994.
- [15] *IEC 60950-1 - Information technology equipment - Safety - Part 1: General requirements*, Genf: IEC - International Electrotechnical Commission, 12.2005.
- [16] *ÖVE/ÖNORM EN 61557-8 - Elektrische Sicherheit in Niederspannungsnetzen bis AC 1000 V und DC 1500 V – Geräte zum Prüfen, Messen oder Überwachen von Schutzmaßnahmen - Teil 8: Isolationsüberwachungsgeräte für IT-Systeme*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2016.
- [17] B. Jauk, *Bachelorarbeit - ARBEITSTITEL "Erst- und wiederkehrende Überprüfung von elektrischen Anlagen mit DC-Schnellladestationen"*, Graz: Technische Universität Graz, Institut für Elektrische Anlagen und Netze, 2018 (in Arbeit).
- [18] *ÖVE/ÖNORM E 8383 - Starkstromanlagen mit Nennwechselspannung über 1 kV*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.03.2000.
- [19] *ÖVE/ÖNORM EN 50522 - Erdung von Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.12.2011.
- [20] Bender GmbH & Co. KG, „Elektrische Sicherheit für die Elektromobilität,“ 2017. [Online]. Available: https://www.bender.de/fileadmin/content/Products/b/d/Emobility_PROSP_de.pdf. [Zugriff am 26.01.2018].
- [21] KFE - Kuratorium für Elektrotechnik, „Sicherheitsprotokolle,“ KFE - Kuratorium für Elektrotechnik, 2018. [Online]. Available: <https://shop.kfe.at/sicherheitsprotokolle>. [Zugriff am 12.07.2018].
- [22] *ÖVE/ÖNORM E 8001-6-61 - Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V Teil 6-61: Prüfungen - Erstprüfungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.07.2001.



- [23] *ÖVE/ÖNORM E 8001-6-62 - Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V Teil 6-62: Prüfungen - Wiederkehrende Prüfungen und Außerordentliche Prüfungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2003.
- [24] *ÖVE/ÖNORM E 8001-6-63 - Errichtung von elektrischen Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V - Teil 6-63: Prüfungen - Anlagenbuch und Prüfbefund*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2003.
- [25] Kristl, Seibt & Co. Gesellschaft m.b.H., *FFG-Basisprogramm Projektbeschreibung zu "Mobiles und stationäres prüfgerät für DC-Schnellladesäulen"*, Projekt-Nr. 868294, Graz, 2018.
- [26] *ÖVE/ÖNORM E 8014-1 - Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Begriffe*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.08.2006.
- [27] *ÖVE/ÖNORM E 8014-2 - Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V - Teil 2: Fundamenterder*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.08.2006.
- [28] *ÖVE/ÖNORM E 8014-3 - Errichtung von Erdungsanlagen für elektrische Anlagen mit Nennspannungen bis AC 1000 V und DC 1500 V - Teil 3: Besonderheiten von Erdungsanlagen in Gebäuden mit speziellen EMV-Anforderungen der informationstechnischen Einrichtungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.08.2006.
- [29] *ÖVE/ÖNORM EN 62305-3 - Blitzschutz - Teil 3: Schutz von baulichen Anlagen und Personen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2008.
- [30] *ÖVE/ÖNORM E 8384 - Erdungen in Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.05.2007.
- [31] *Bundesgesetz über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Arbeit (ArbeitnehmerInnenschutzgesetz – ASchG)*, Wien: Österreichisches Bundeskanzleramt, www.ris.bka.gv.at, StF: BGBl. Nr. 450/1994, idF BGBl. I Nr. 126/2017.
- [32] *ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 - Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV - Teil 1: Allgemeine Bestimmungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.01.2015.
- [33] T. Niemand und A. Schröder, *Erdungsanlagen, 2. vollständig überarbeitete Auflage*, Frankfurt am Main: VDE Verlag GmbH, Berlin, 2016.
- [34] P. Hasse, J. Wiesinger und W. Zischank, *Handbuch für Blitzschutz und Erdung, 5. Auflage*, München: Richard Pflaum Verlag GmbH & Co. KG, 2006.
- [35] S. Pack, *Transiente Beanspruchung elektrischer Betriebsmittel, Skriptum zur gleichnamigen Vorlesung, LV-Nr. 433.034*, Graz: Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement, 2018.



- [36] C. Wolf, *Stromladestation Schemaplan, Schnellladestation ABB*, Graz: Energie Graz GmbH & Co KG, 11.07.2016.
- [37] ÖVE/ÖNORM EN 61140 - *Schutz gegen elektrischen Schlag – Gemeinsame Anforderungen für Anlagen und Betriebsmittel*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.12.2016.
- [38] ÖVE-B 1:1976 - *Beeinflussung von Fernmeldeanlagen durch Wechselstromanlagen mit Nennspannungen über 1 kV*, Wien: ÖVE Österreichischer Verband für Elektrotechnik, 01.12.1976.
- [39] *DIN IEC/TS 60479-1 - Wirkung des elektrischen Stromes auf Mensch und Nutztiere - Teil 1: Allgemeine Aspekte*, Berlin: VDE VERLAG GMBH, 05.2007.
- [40] ÖVE/ÖNORM EN 50160 - *Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.03.2011.
- [41] ÖVE/ÖNORM EN 50588-1 - *Mittelleistungstransformatoren 50 Hz, mit einer höchsten Spannung für Betriebsmittel nicht über 36 kV -- Teil 1: Allgemeine Anforderungen*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.04.2016.
- [42] „Bedienungsanleitung PROFITEST MPRO MXTRA (3-349-647-01, 9/2.14),“ GMC-I Messtechnik GmbH, [Online]. Available: https://gossenmetrawatt.com/resources/zz_tam/profitest-edition/profitest-edition-ba_d.pdf. [Zugriff am 14 08 2018].
- [43] „Prüfbox für Ladestationen - D,“ MENNEKES Elektrotechnik GmbH & Co. KG, [Online]. Available: <https://www.chargeupyourday.de/pd/zubehoer/Pruefbox-fuer-Ladestationen-D-0000000600010f6f0001003a/>. [Zugriff am 14 08 2018].
- [44] *DIN 18014 - Fundamentender - Planung, Ausführung und Dokumentation*, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 03.2014.
- [45] OVE IEC TS 61439-7 *Niederspannungs-Schaltgerätekombinationen - Teil 7: Schaltgerätekombinationen für bestimmte Anwendungen wie Marinas, Campingplätze, Marktplätze, Ladestationen für Elektrofahrzeuge*, Wien: OVE/Austrian Standards Institut, 01.07.2016.

8 Anhang

8.1 Messdaten

8.1.1 Messung Nr. 1 (CCS)

Tabelle 28: Eckdaten zu Messung Nr. 1

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:07:21,752	13:35:33,164	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
EVCS-Type		EVCS -Serien-Nr.	Anschluss
ABB TERRA 53 CJG		3N929900000A	5 G 70 mm ²
EVCS -Standort		Ladeverfahren	
Energie Steiermark Betriebsgelände Parkgarage, E-Mobility-Testfläche Neuholdaugasse 56 8010 Graz		Combined Charging System (CCS)	
Elektrofahrzeug (EV)		Messgerät/Messsystem	
Marke: Volkswagen (VW) Type: e-up! FIN: WVVZZZAAGD900455 Kennzeichen: G-595RE		DEWETRON DEWE 2600	
Bemerkungen			
Normaler Ladevorgang, Unterbrechung Verriegelung, Unterbrechung Control Pilot (CP), Unterbrechung DC+, Unterbrechung PE, Erdschluss 100 kΩ, Erdschluss 40 kΩ,			

8.1.1.1 Fehlerfreier CCS-Ladevorgang (mit Unterbrechung der „Verriegelung“)

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:07:30,000	13:12:00,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt	
nicht erfasst	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt	
NEIN	keine Abschaltung	keine Abschaltung	

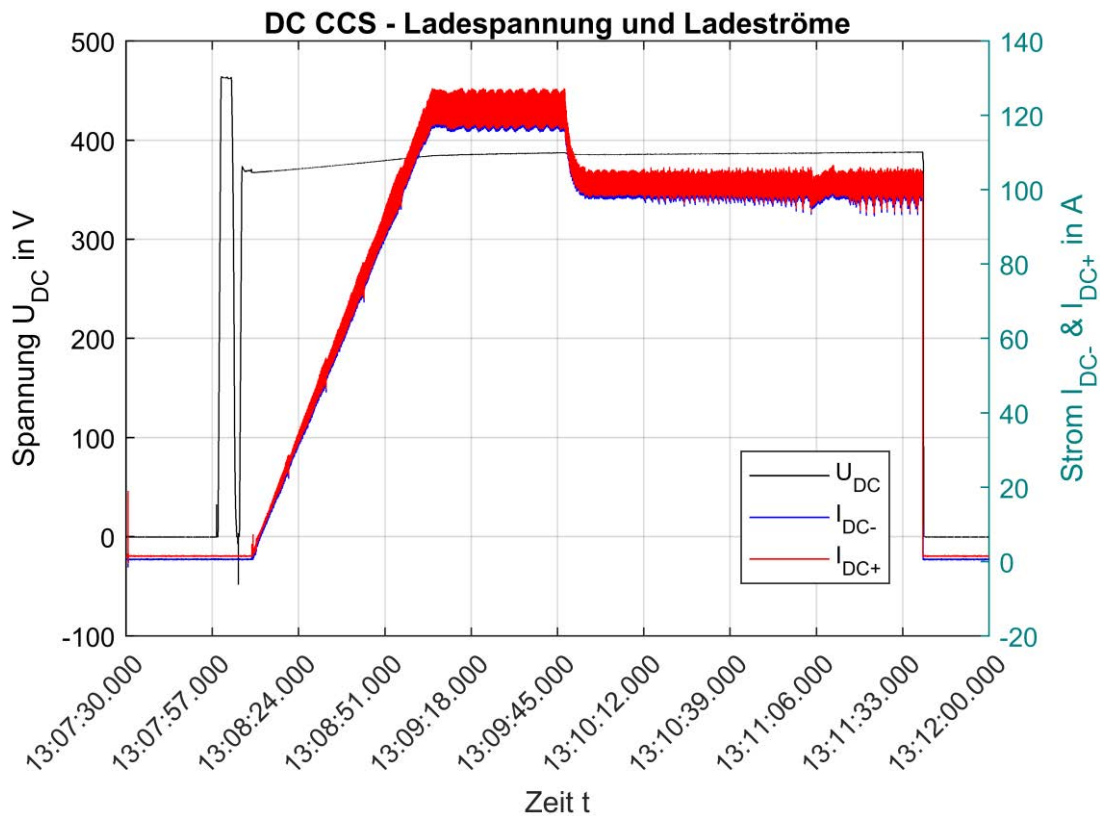


Abbildung 41: CCS, Ladespannung & Ladeströme, fehlerfrei [5]

8.1.1.2 CCS-Ladevorgang mit Unterbrechung des „CP“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:11:39,300	13:11:39,600	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
13:11:39,361		13:11:39,365	13:11:39,531
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA		00:00:00,004	00:00:00,170

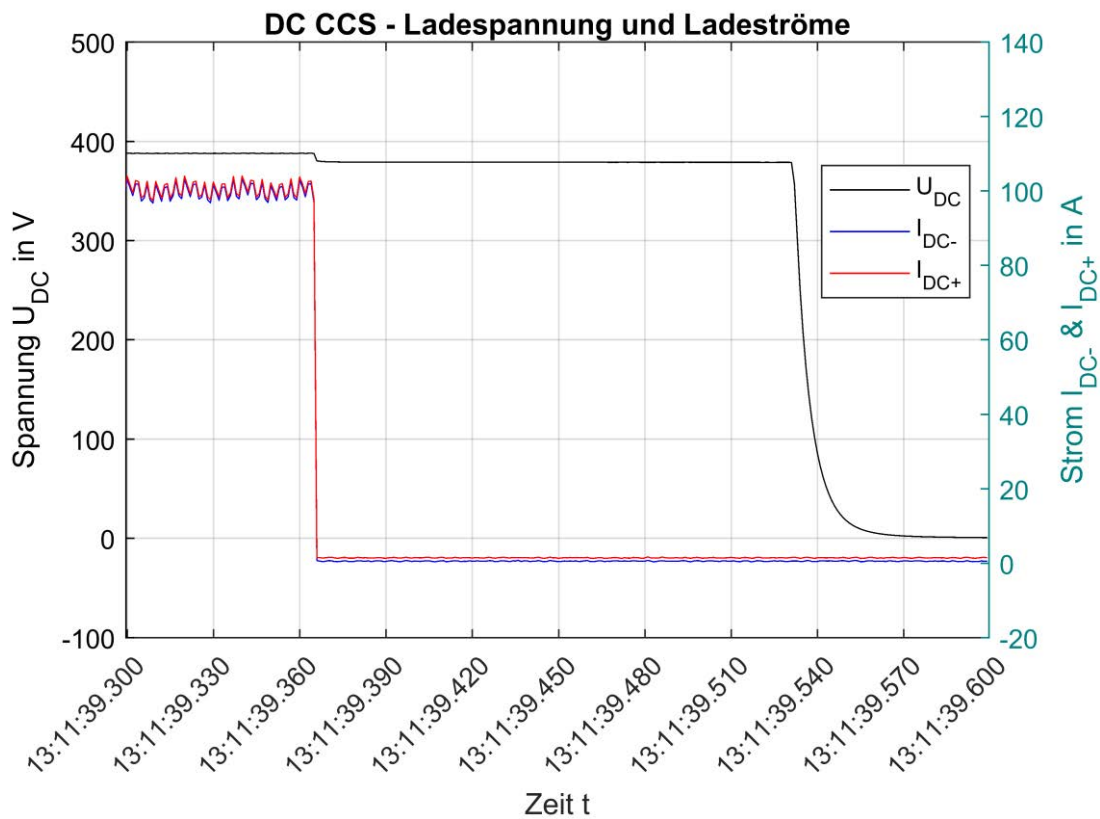


Abbildung 42: CCS, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung CP

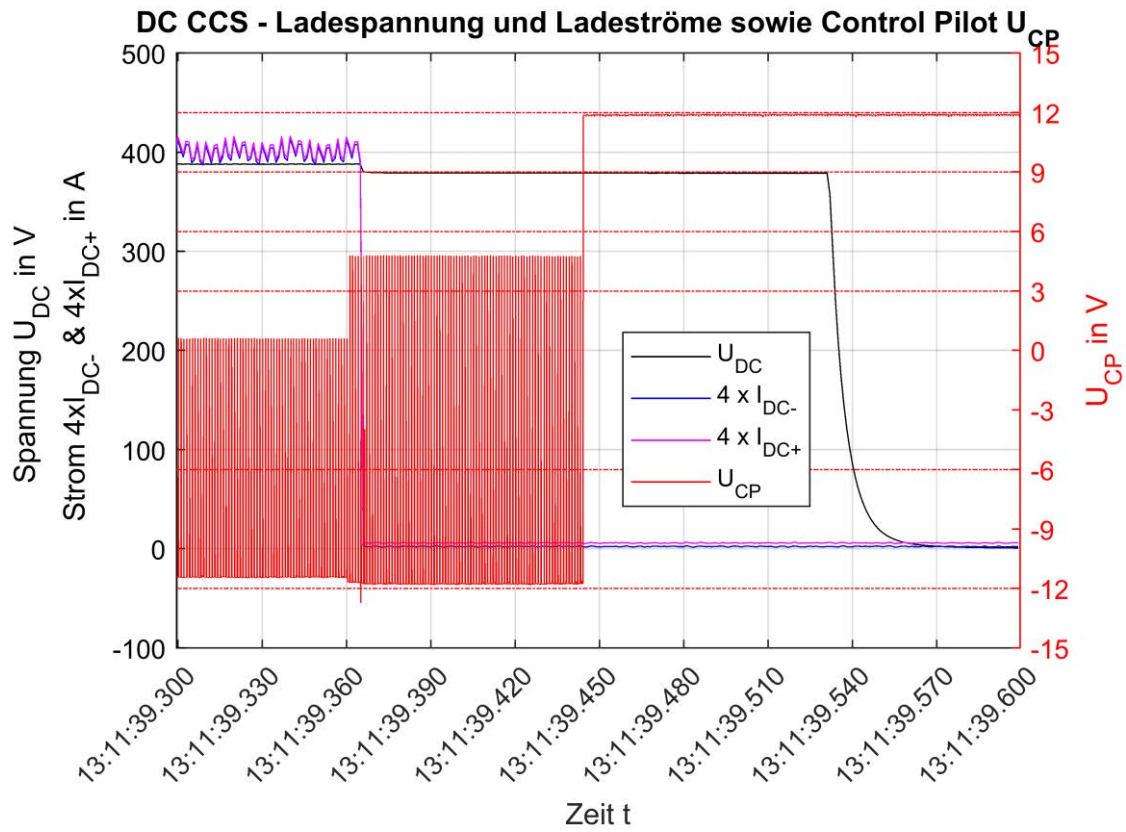


Abbildung 43: CCS, Ladespannung, Ladeströme & Steuersignal U_{CP}, Unterbrechung U_{CP}

8.1.1.3 CCS-Ladevorgang mit Unterbrechung des „DC+“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:15:42,800	13:15:44,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
13:15:43.005		13:15:43.005	13:15:43.219
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA		00:00:00,000	00:00:00,214

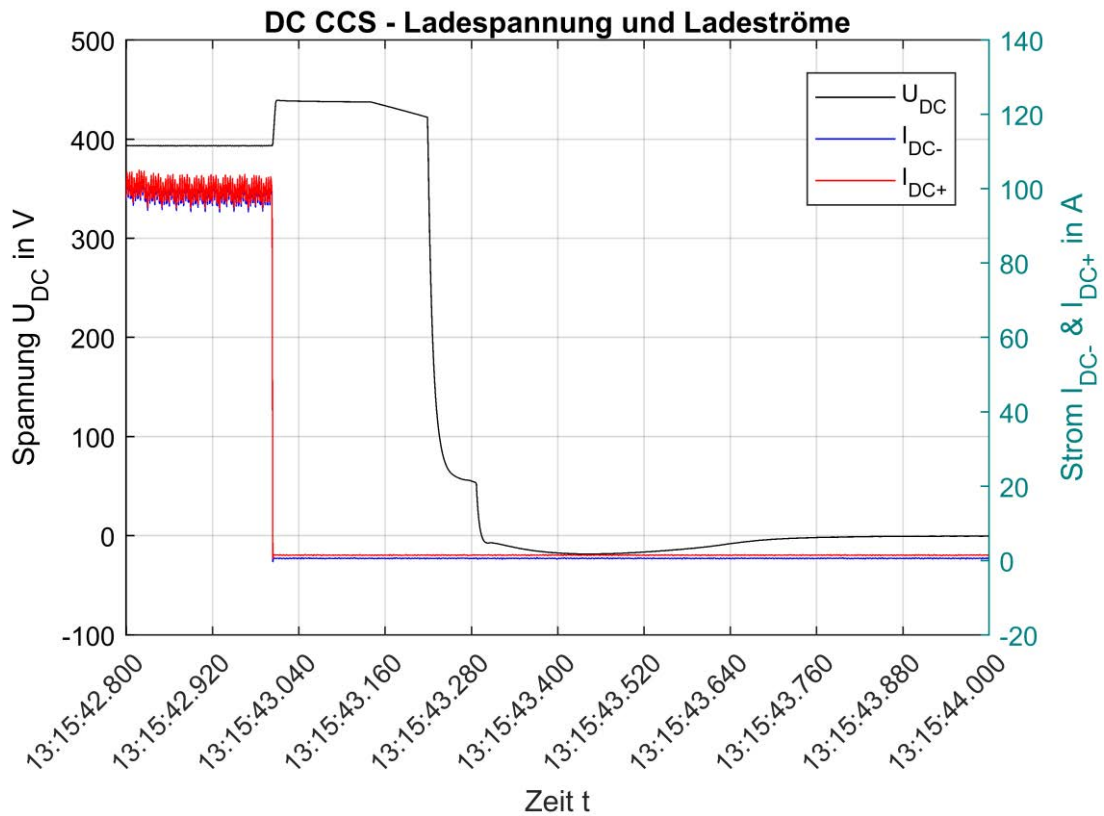


Abbildung 44: CCS, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung DC+

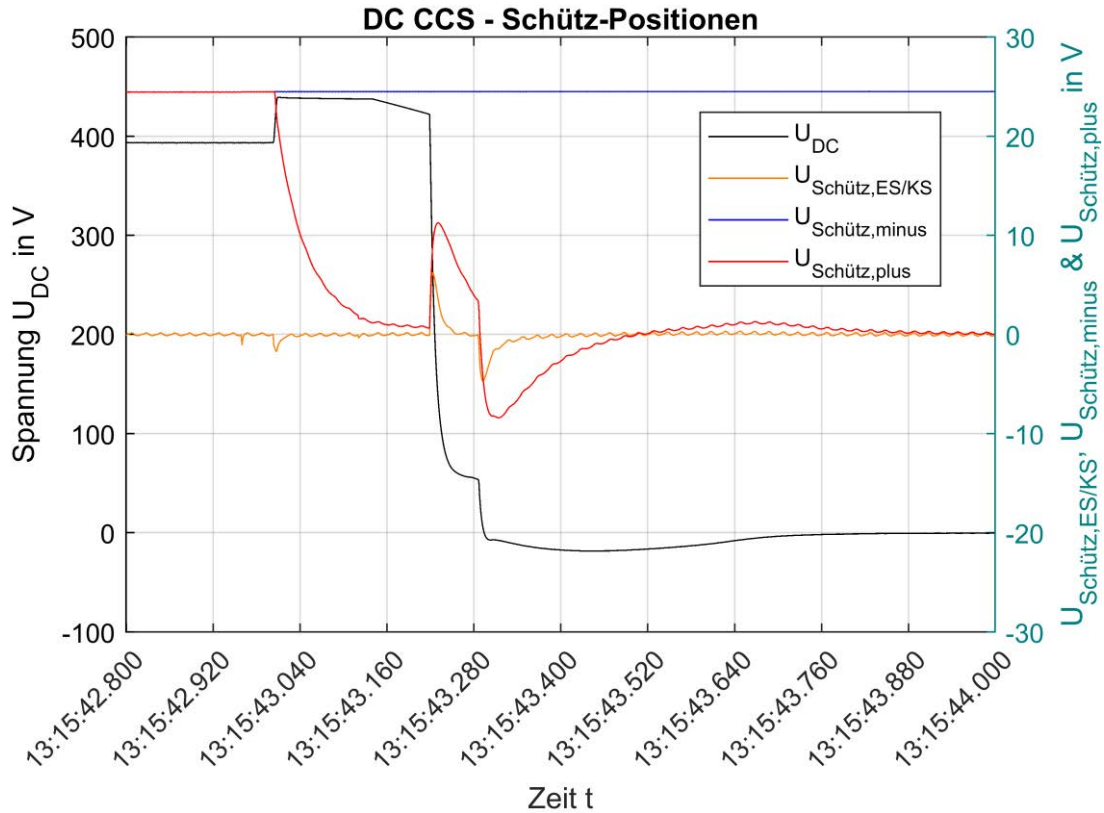


Abbildung 45: CCS, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung DC+

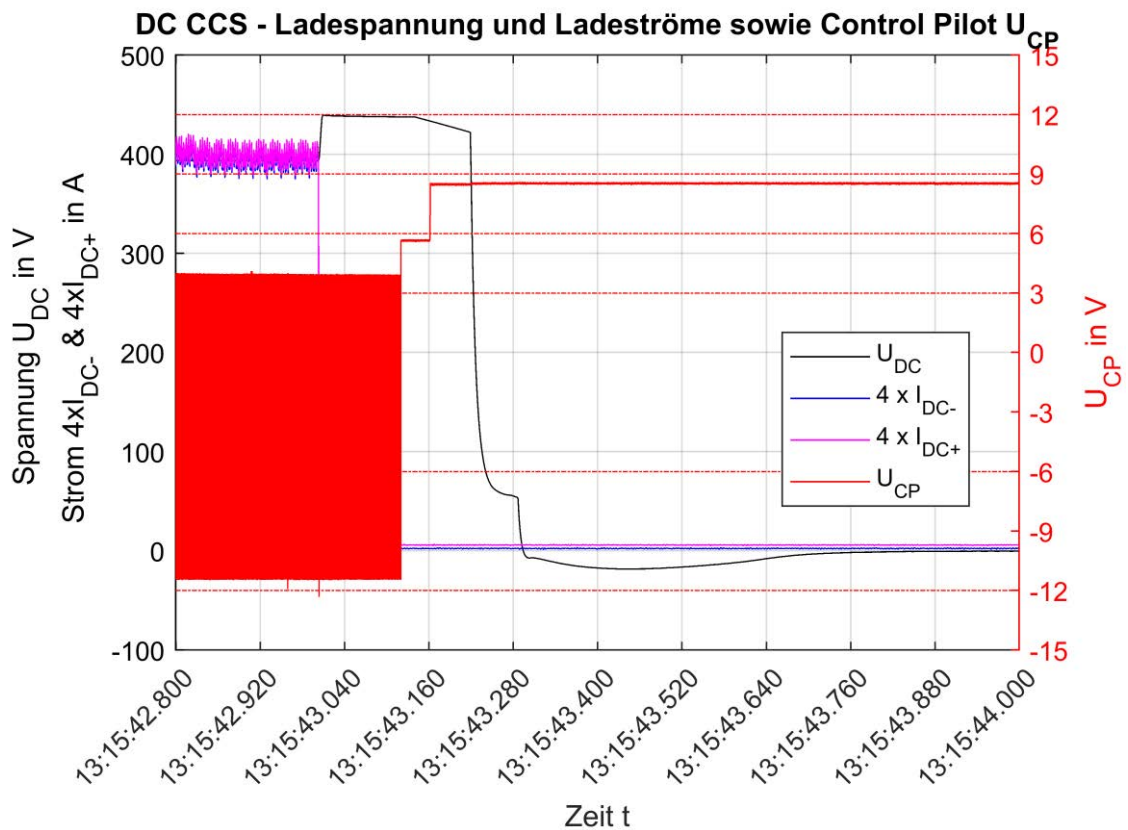


Abbildung 46: CCS, Ladespannung, Ladeströme & Steuersignal U_{CP} , Unterbrechung DC+

8.1.1.4 CCS-Ladevorgang mit Unterbrechung des „PE“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:18:12,000	13:18:12,500	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
13:18:12.070	13:18:12.204		13:18:12.390
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA	00:00:00.134		00:00:00.320

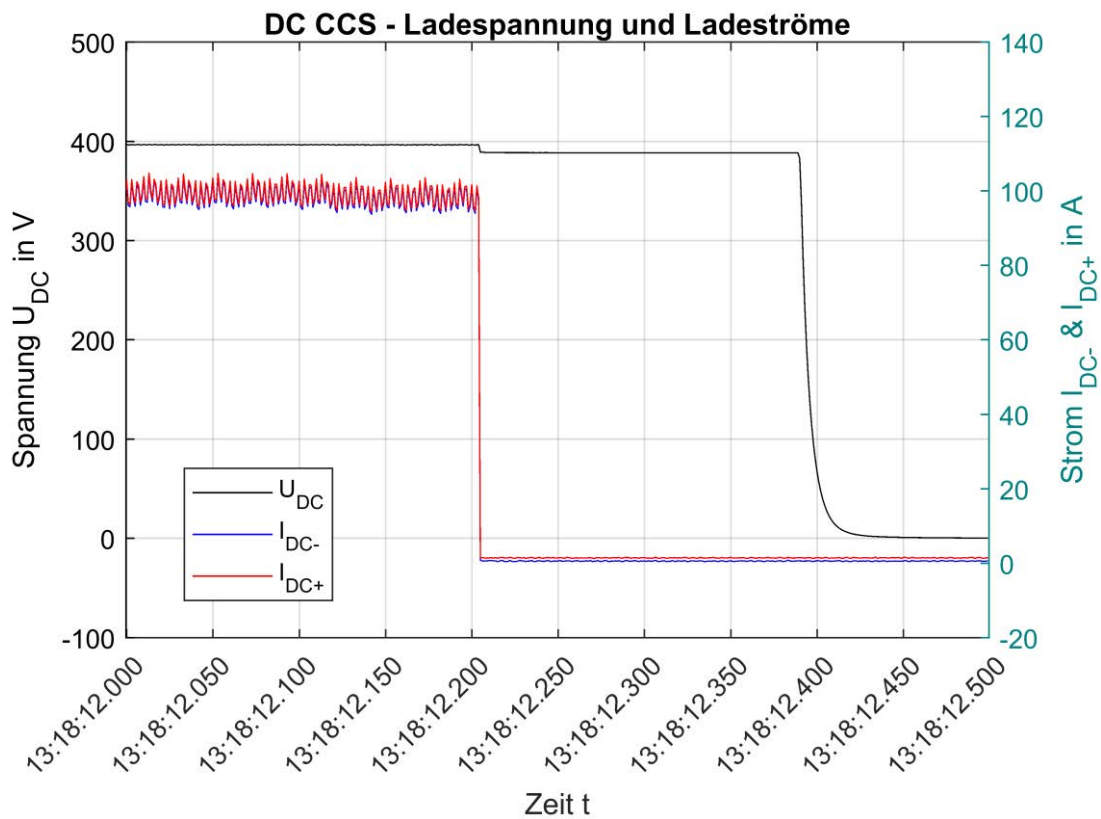


Abbildung 47: CCS, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung PE

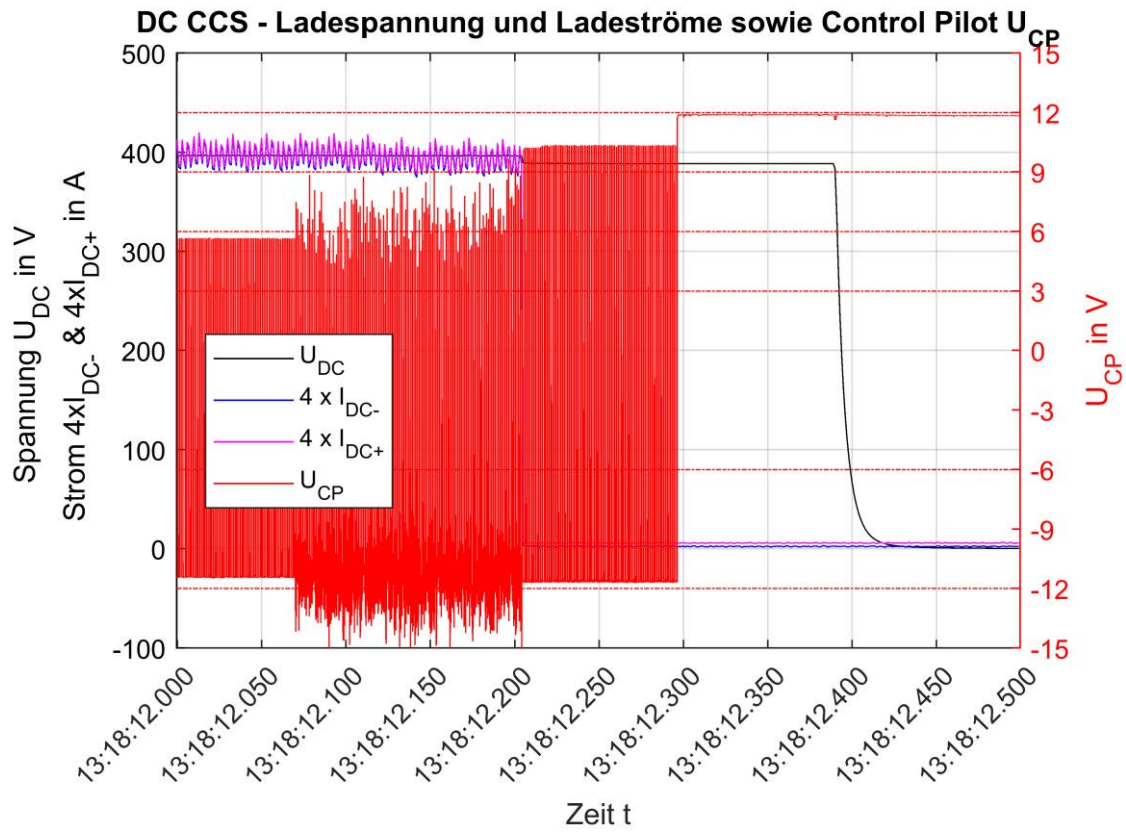


Abbildung 48: CCS, Ladespannung, Ladeströme & Steuersignal U_{CP} , Unterbrechung PE

8.1.1.5 CCS-Ladevorgang mit 100 k Ω -Erdschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:24:59,200	13:24:59,600	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
13:24:59.391		keine Abschaltung	keine Abschaltung
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
NEIN		keine Abschaltung	keine Abschaltung
Fehlerbeseitigung hh:mm:ss,ttt		Fehlerdauer hh:mm:ss,ttt	
13:25:17,986		00:00:18,595	

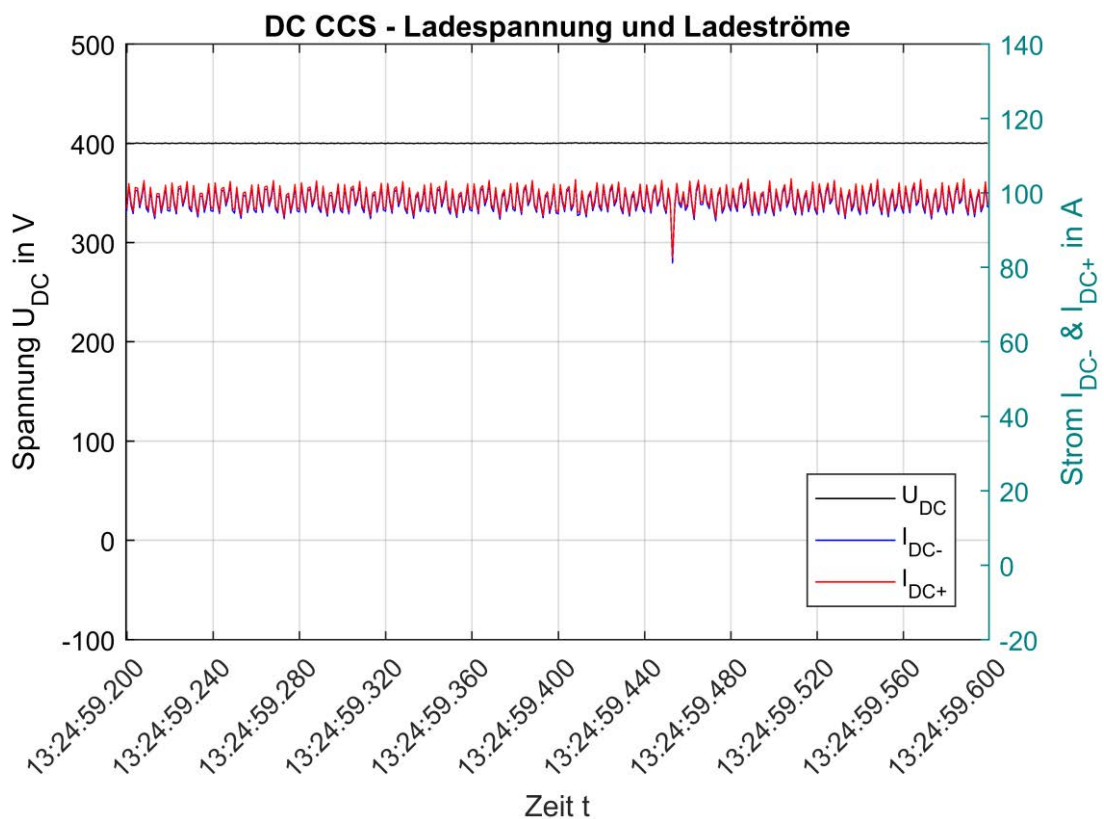


Abbildung 49: CCS, Ladespannung & Ladeströme, Erdschluss 100 k Ω

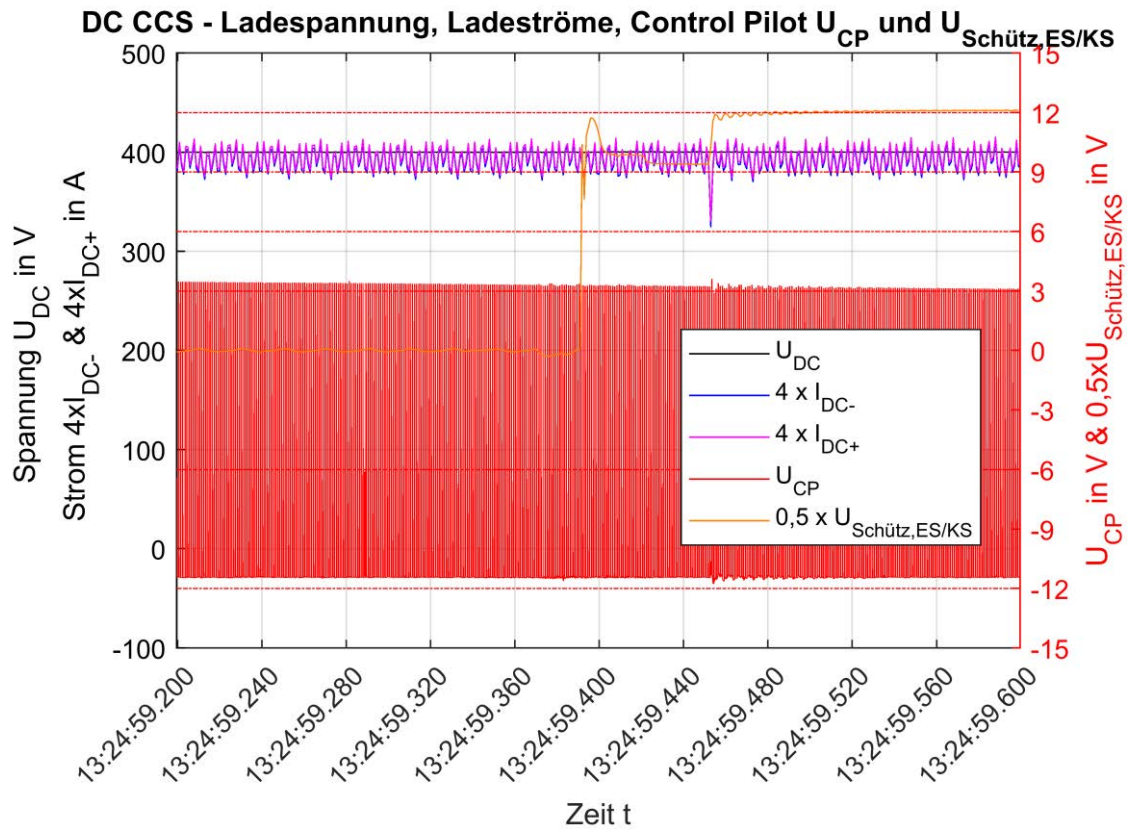


Abbildung 50: CCS, Ladespannung, Ladeströme, Steuersignal U_{CP} & Schütz-Position, Erdschluss 100 k Ω

8.1.1.6 CCS-Ladevorgang mit 40 kΩ-Erdschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:26:02,000	13:26:14,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
13:26:03.796	13:26:11.248		13:26:11.502
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA	00:00:07.452		00:00:07.706

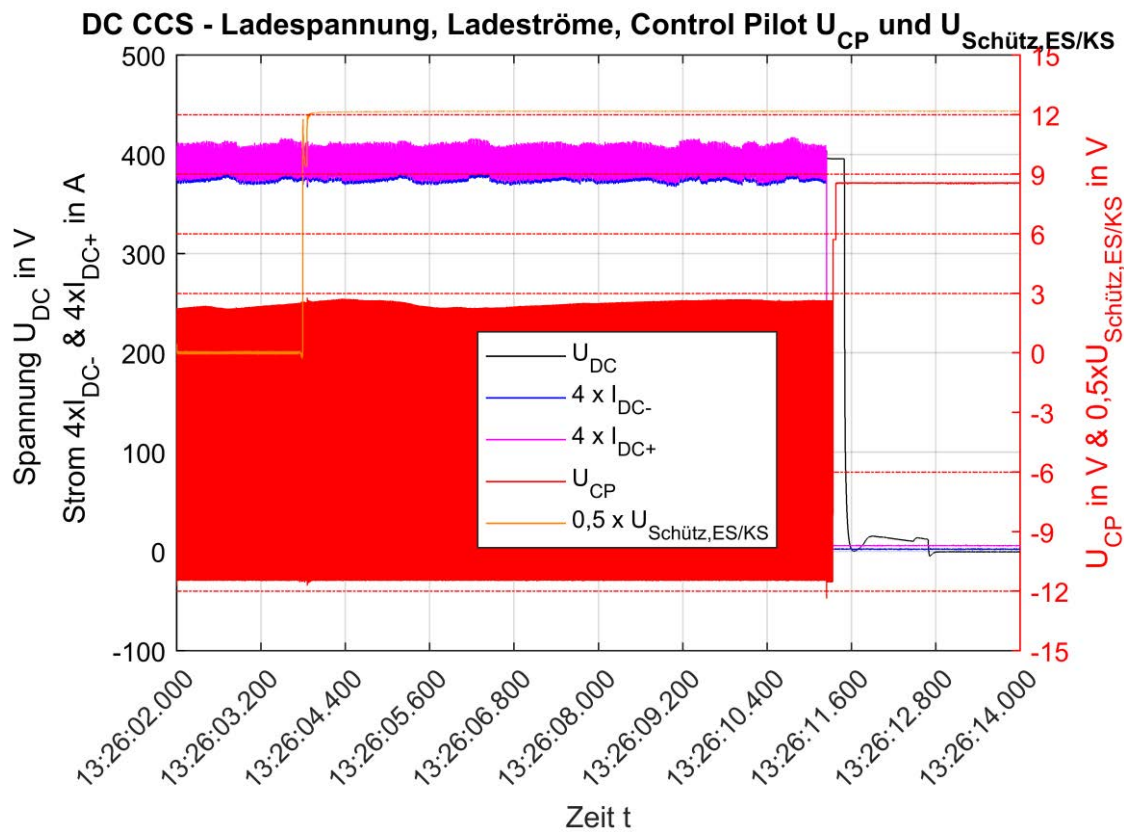


Abbildung 51: CCS, Ladespannung, Ladeströme, Steuersignal U_{CP} & Schütz-Position, Erdschluss 40 kΩ

8.1.1.7 CCS-Ladevorgang bei zuvor anliegendem 40 k Ω -Erdschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	13:31:15,000	13:32:15,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Dauer Handshake max. Spg. hh:mm:ss,ttt	Dauer Betriebsspannung hh:mm:ss,ttt	
13:26:03.796	00:00:03.265	00:00:09.571	
Abschaltung	Dauer Stromrampe hh:mm:ss,ttt		
JA	00:00:05.985		
Anmerkung			
Erdschluss mit 40 k Ω liegt an, danach beginnt Handshakeverfahren des Ladevorganges mit Anlegen der DC-Spannung. Bevor Strom hochgefahren wird, wird Fehler erkannt und abgeregelt.			

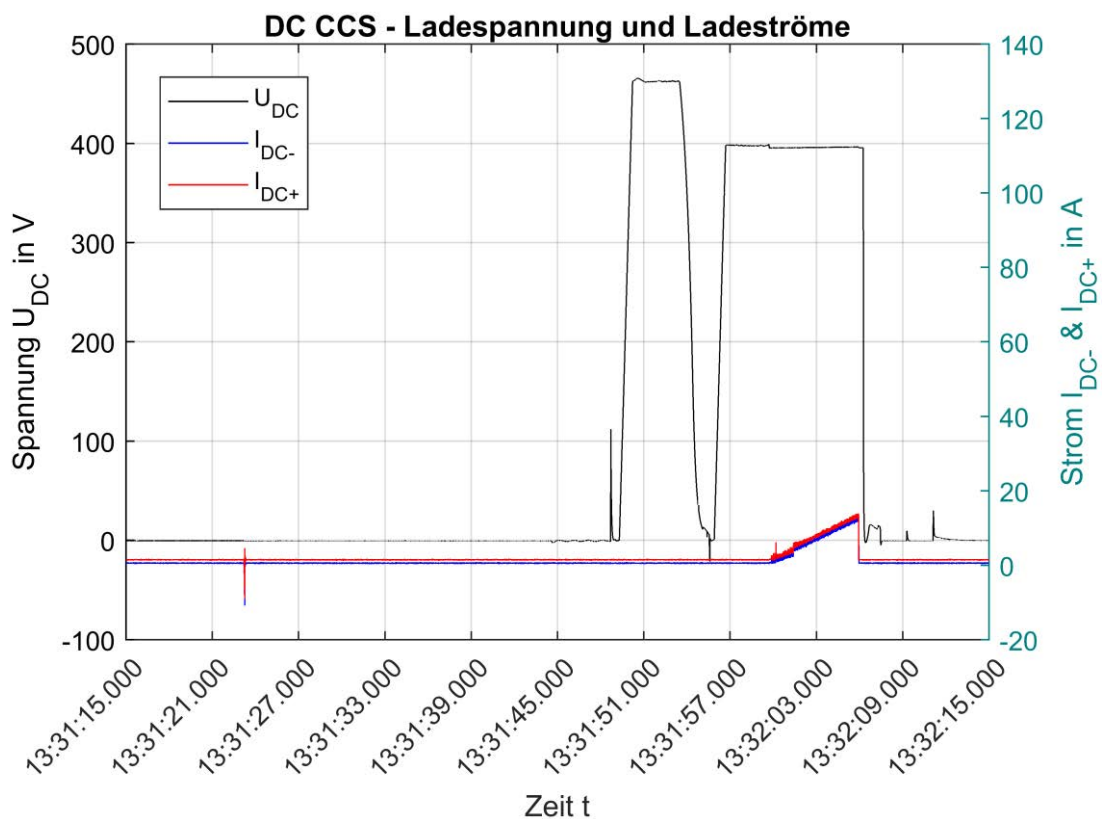


Abbildung 52: CCS, Ladespannung & Ladeströme, bereits anliegender Erdschluss 40 k Ω

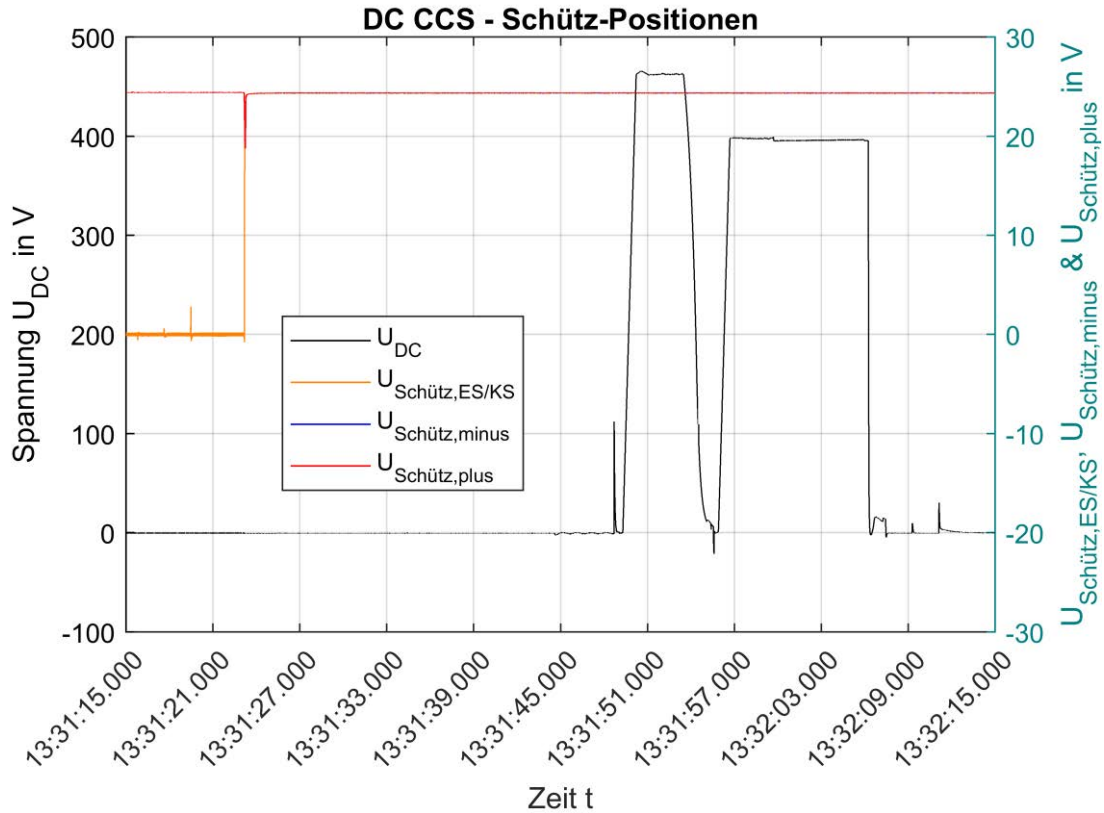


Abbildung 53: CCS, Ladespannung & Schütz-Positionen, bereits anliegender Erdschluss 40 k Ω

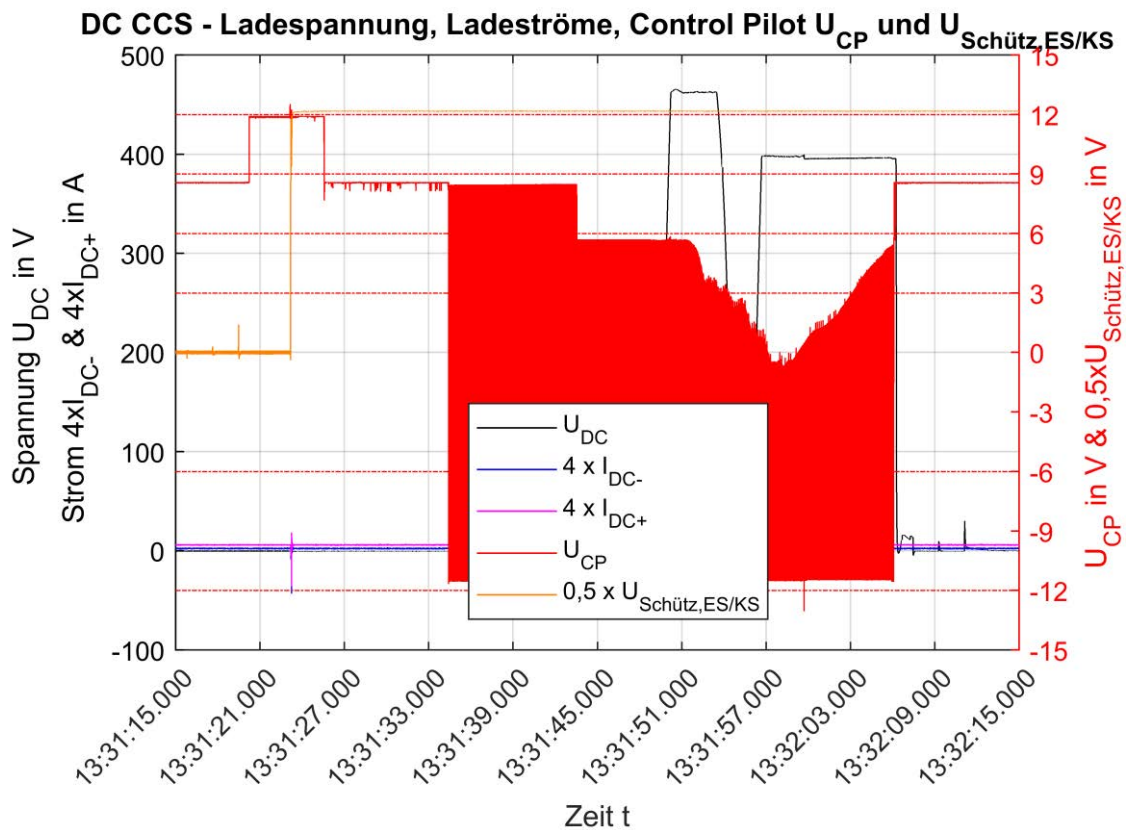


Abbildung 54: CCS, Ladespannung, Ladeströme, Steuersignal U_{CP} & Schütz-Position, bereits anliegender Erdschluss 40 k Ω



8.1.2 Messung Nr. 2 (CHAdeMO)

Tabelle 29: Eckdaten zu Messung Nr. 2

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei	
07.11.2017	11:27:46.259	12:58:04.907	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0000...3	
EVCS -Type		EVCS -Serien-Nr.		Anschluss
ABB TERRA 53 CJG		3N929900000A		5 G 70 mm ²
EVCS -Standort			Ladeverfahren	
Energie Steiermark Betriebsgelände Parkgarage, E-Mobility-Testfläche Neuholdaugasse 56 8010 Graz			CHAdeMO	
Elektrofahrzeug (EV)			Messgerät/Messsystem	
Marke: Peugeot Type: iOn Kennzeichen: G-34TNE			DEWETRON DEWE 2600	
Bemerkungen				
Normaler Ladevorgang, Unterbrechung connection check, Unterbrechung charging enable/disable, Unterbrechung charger start/stop 1, Unterbrechung charger start/stop 2, Unterbrechung CAN-H, Unterbrechung CAN-L, Unterbrechung DC+, Unterbrechung DC-, Unterbrechung PE, Erdschluss 100 k Ω , Erdschluss 40 k Ω , Kurzschluss 100 k Ω , Kurzschluss 40 k Ω , Kurzschluss 1 k Ω				

8.1.2.1 Fehlerfreier CHAdeMO-Ladevorgang

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:28:05,000	11:32:35,000	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0000
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt	
nicht erfasst	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt	
NEIN	keine Abschaltung	keine Abschaltung	

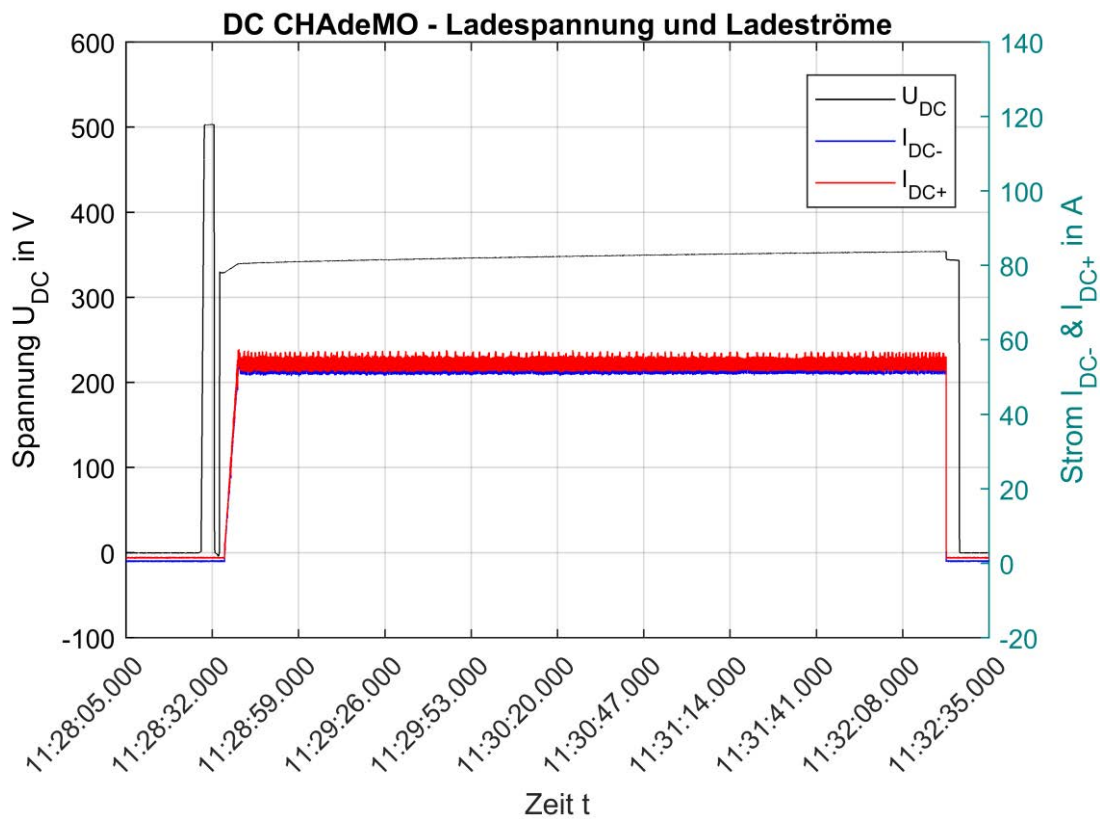


Abbildung 55: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, fehlerfrei

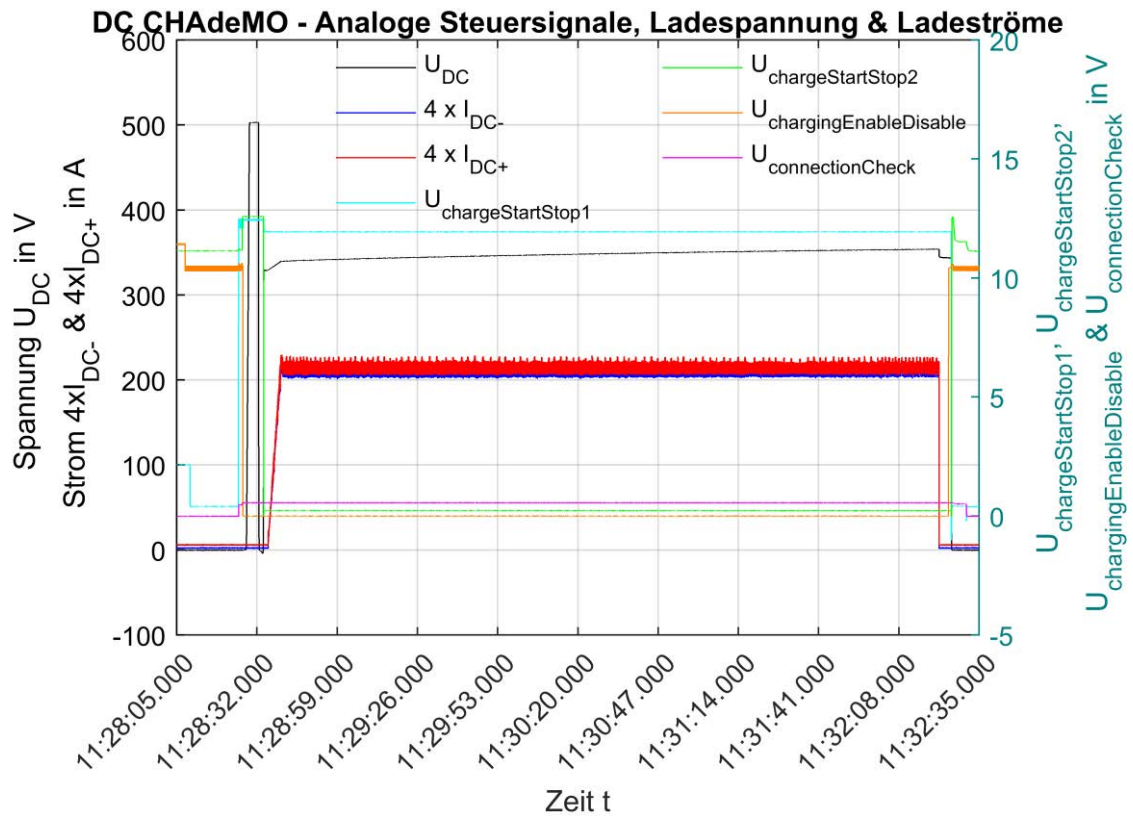


Abbildung 56: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, fehlerfrei [5]

8.1.2.2 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „connection check“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:39:10,400	11:39:12,400	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
11:39:10.539		11:39:10.734	11:39:11.860
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA		00:00:00.195	00:00:01.321

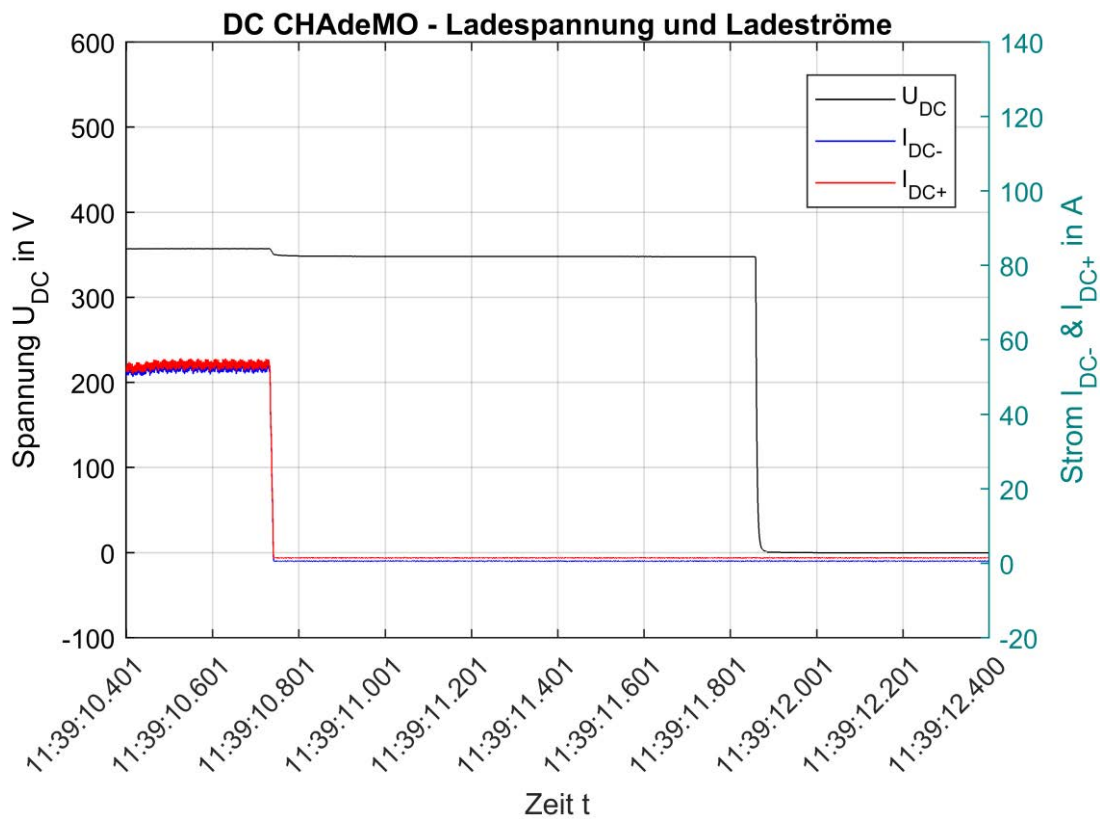


Abbildung 57: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung connection check

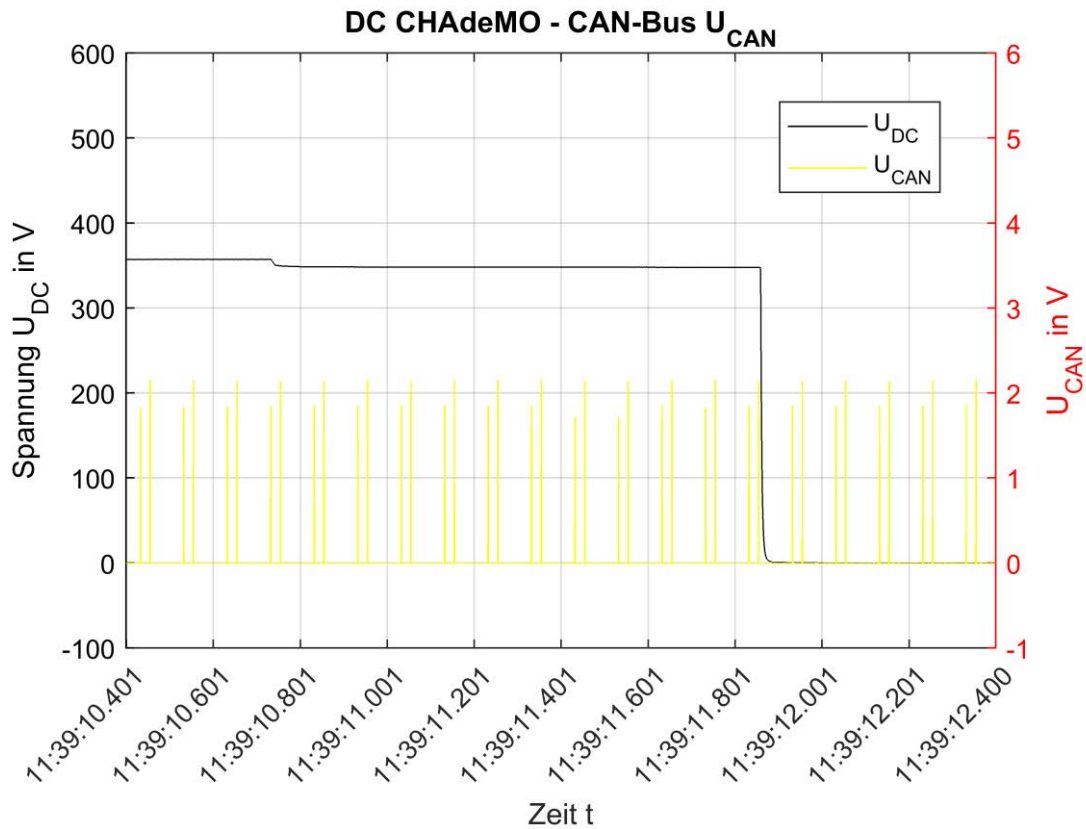


Abbildung 58: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung connection check

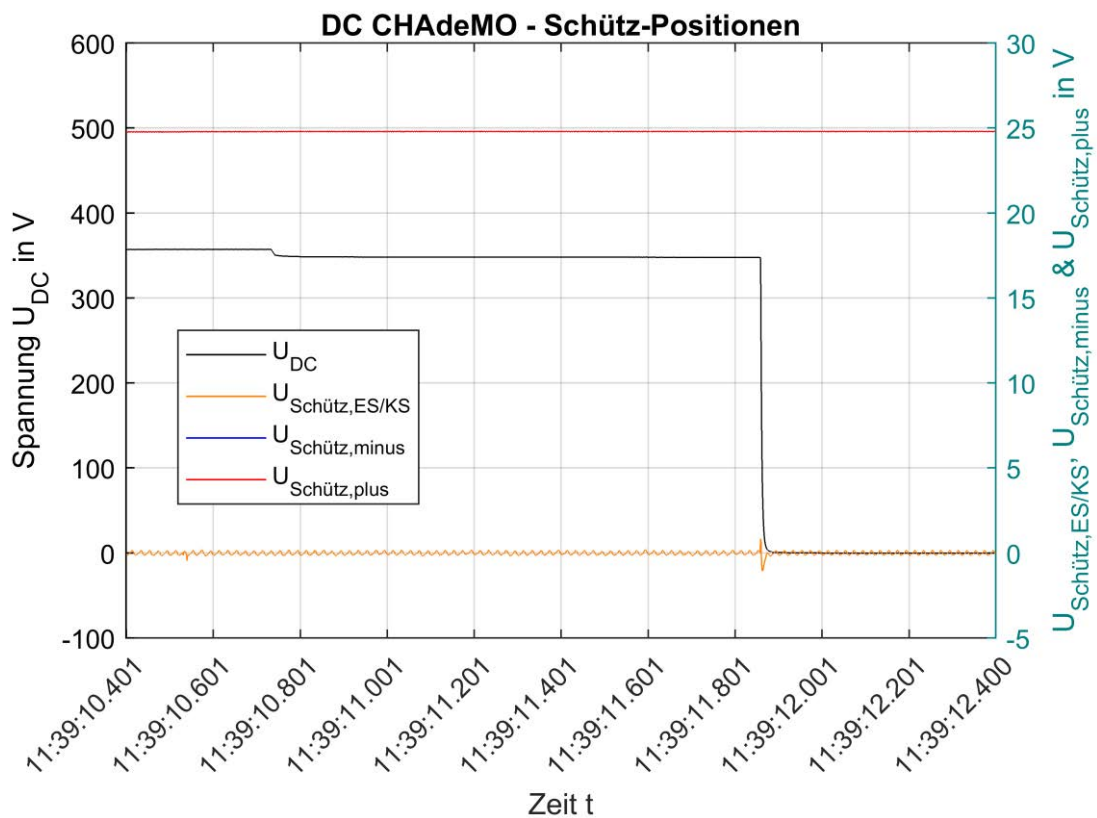


Abbildung 59: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung connection check

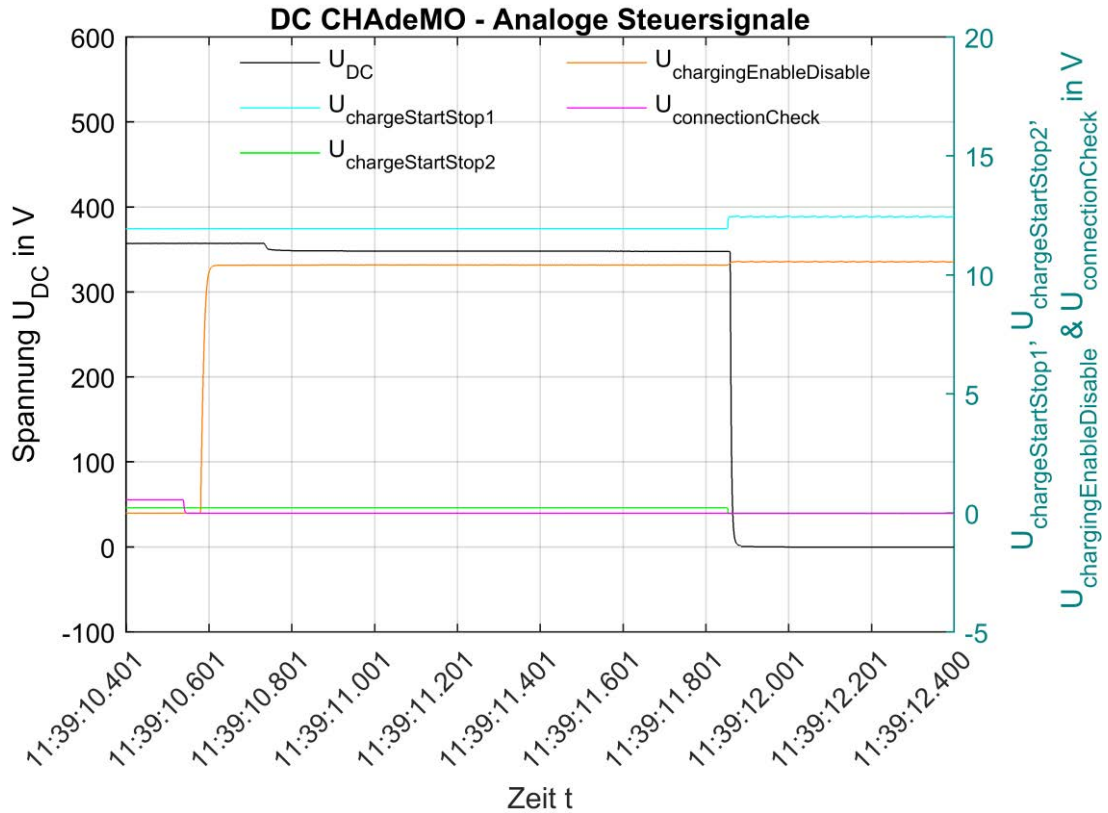


Abbildung 60: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung connection check

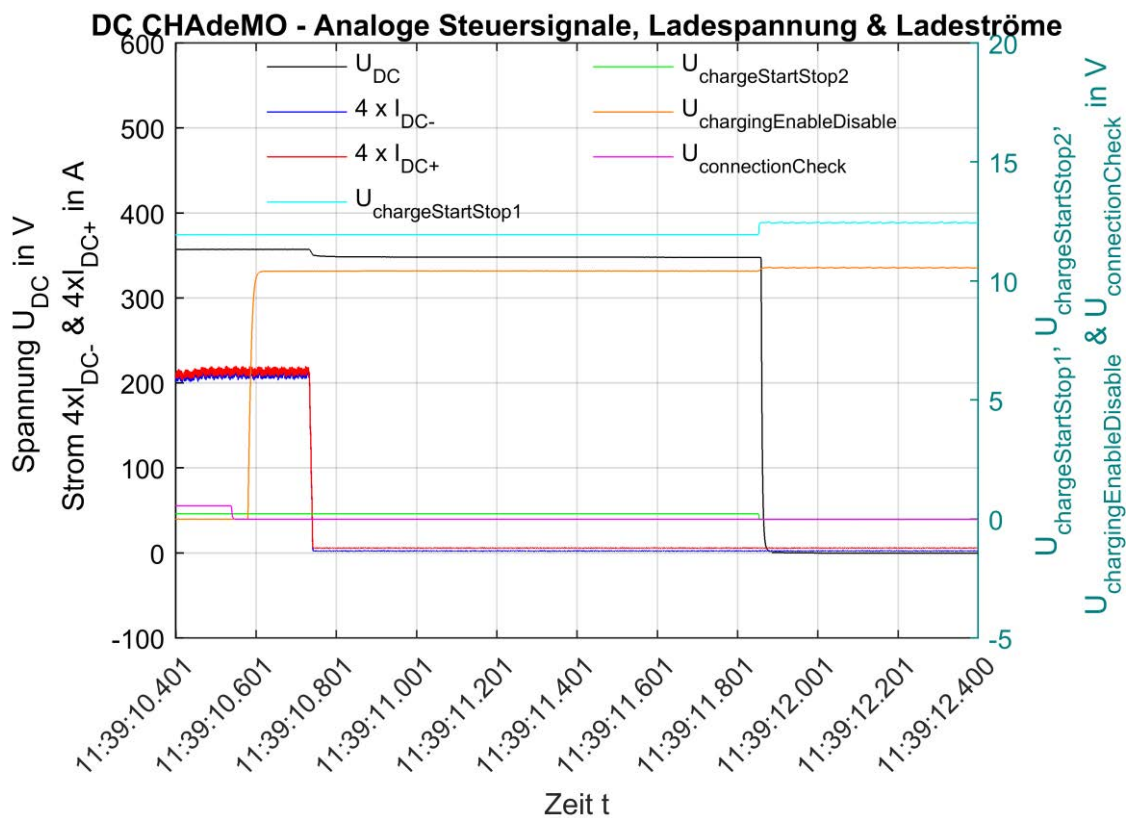


Abbildung 61: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung connection check

8.1.2.3 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „charging enable/disable“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:41:08,000	11:41:15,000	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
11:41:09.331	11:41:09.433		11:41:13.567
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA	00:00:00.102		00:00:04.236

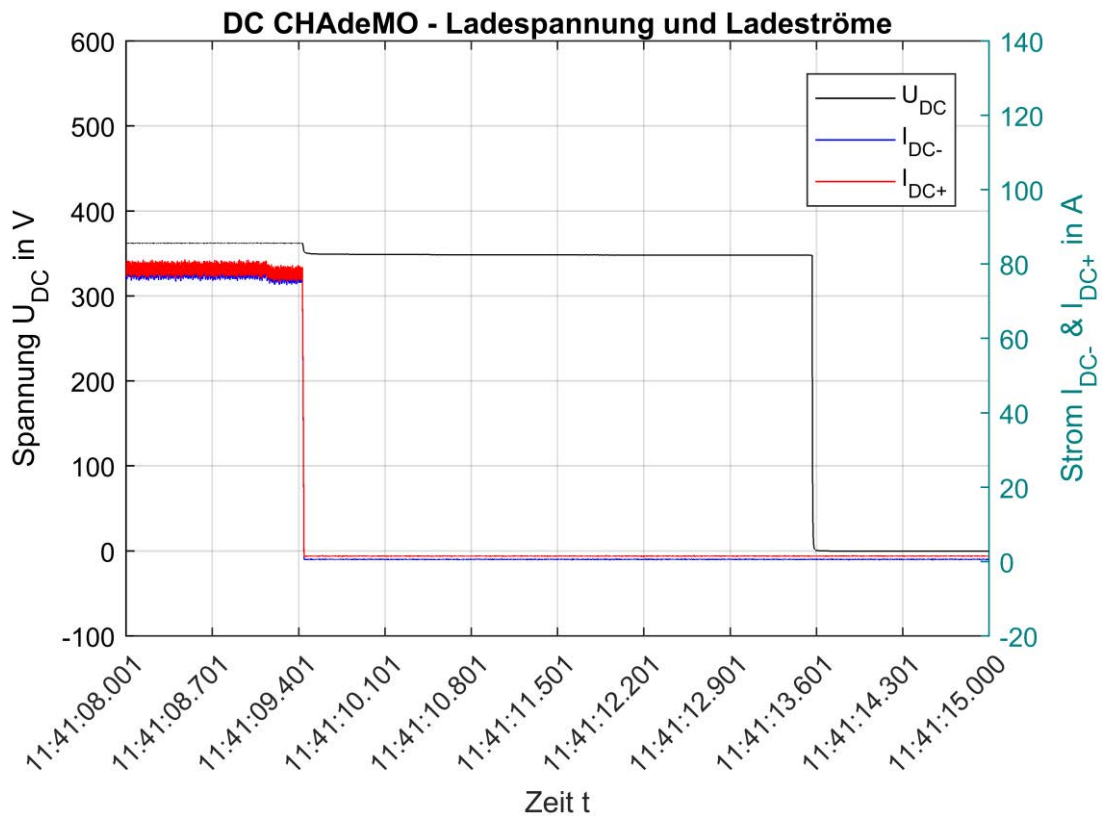


Abbildung 62: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung charging enable/disable

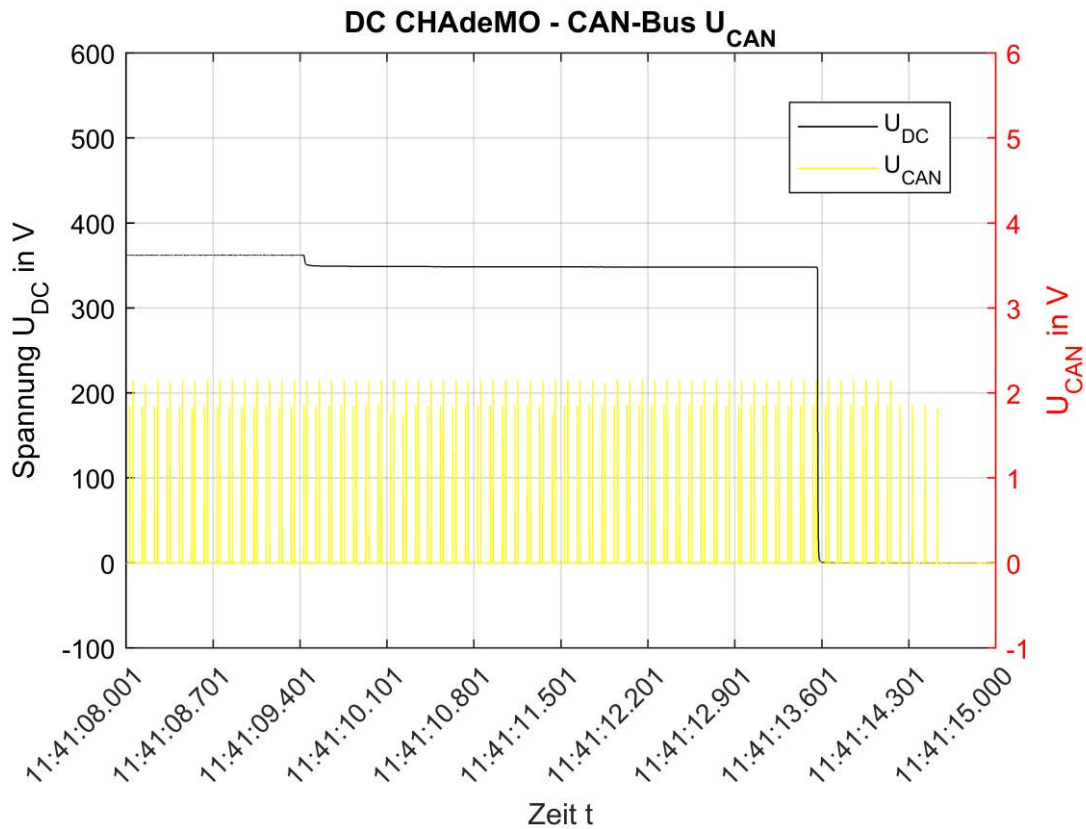


Abbildung 63: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung charging enable/disable

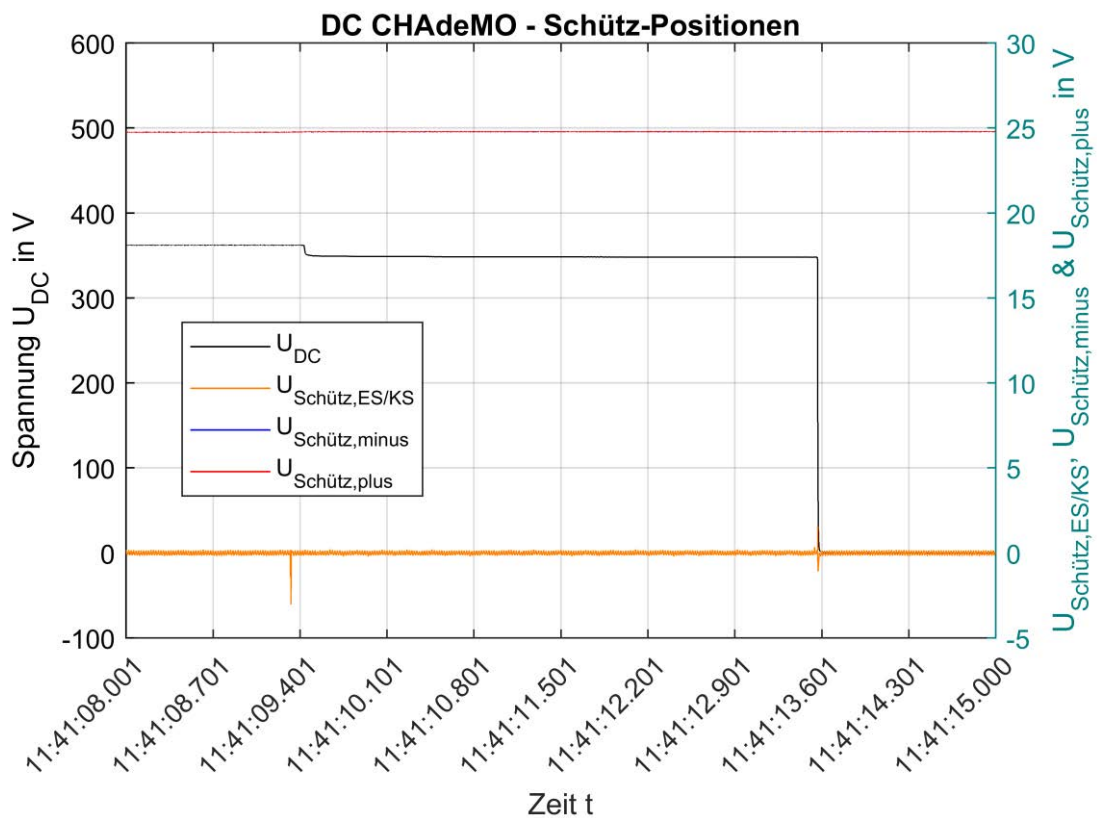


Abbildung 64: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung charging enable/disable

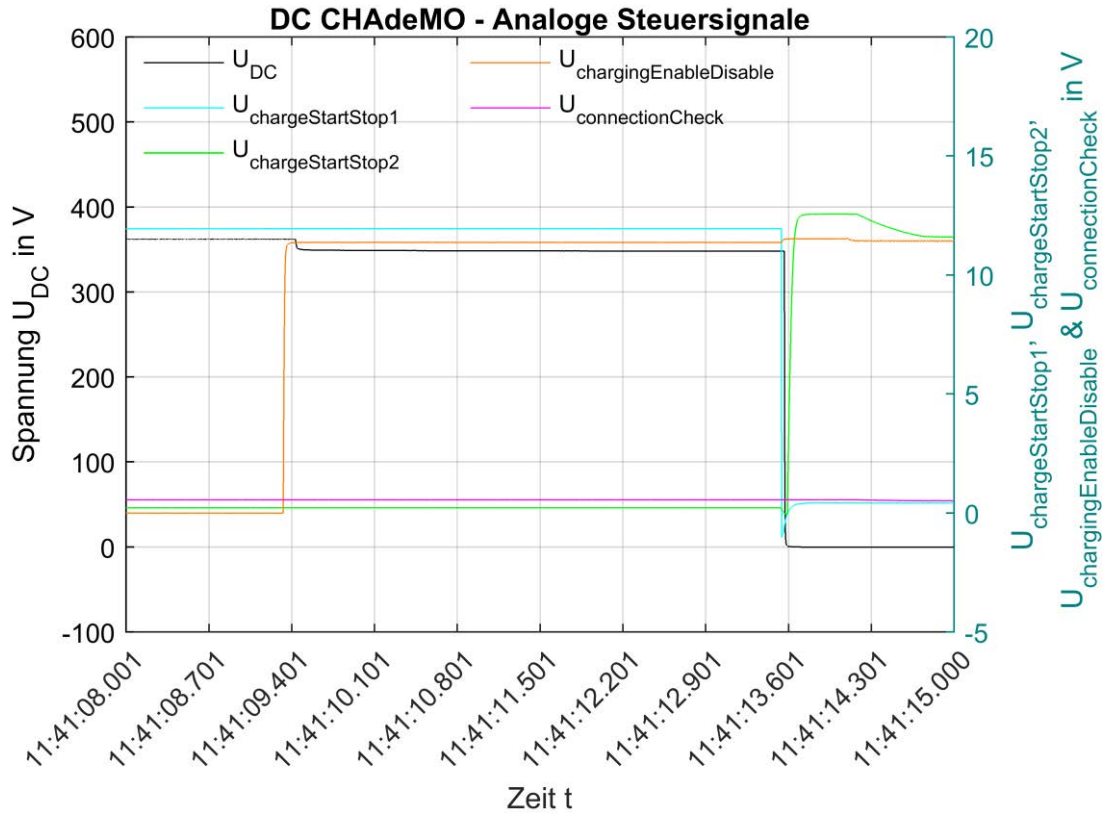


Abbildung 65: CHAdeMO, Ladespg. & analoge Steuersignale, Unterbrechung charging enable/disable

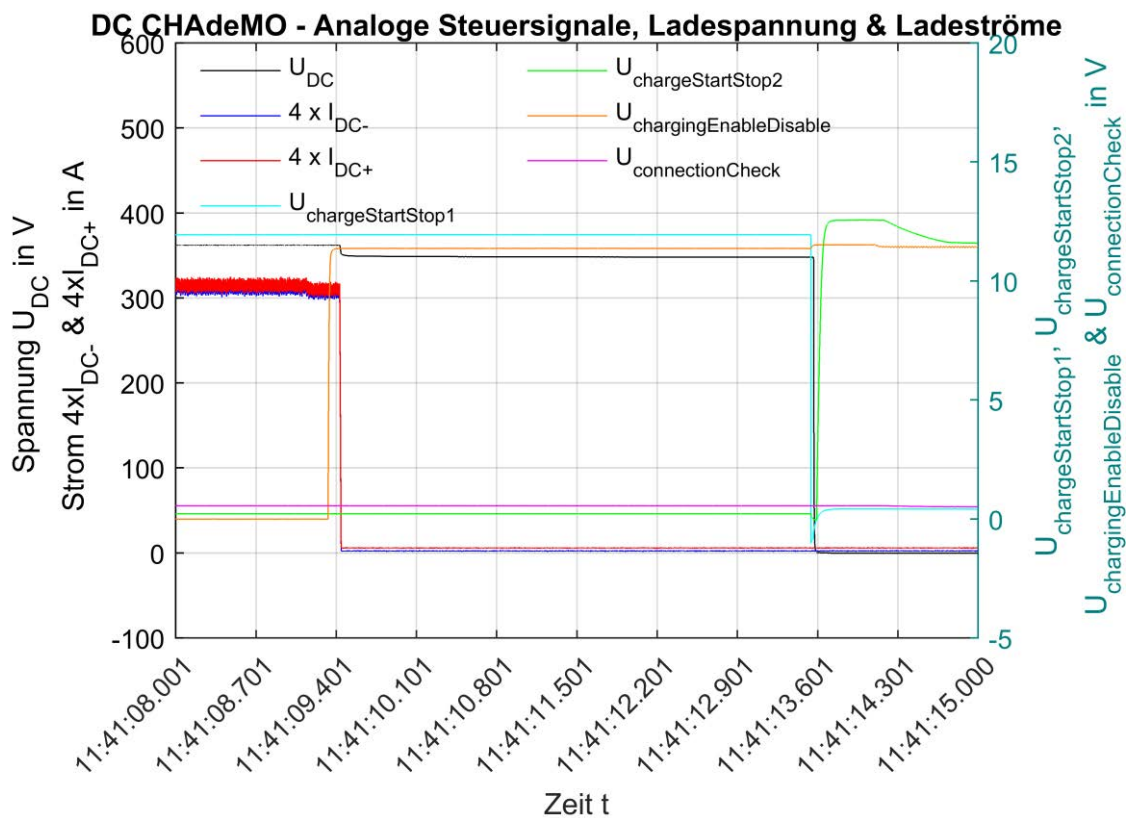


Abbildung 66: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung charging enable/disable

8.1.2.4 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „charging start/stop 1“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:42:25,000	11:42:25,250	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
11:42:25.017	11:42:25.023		11:42:25.156
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA	00:00:00.006		00:00:00.139

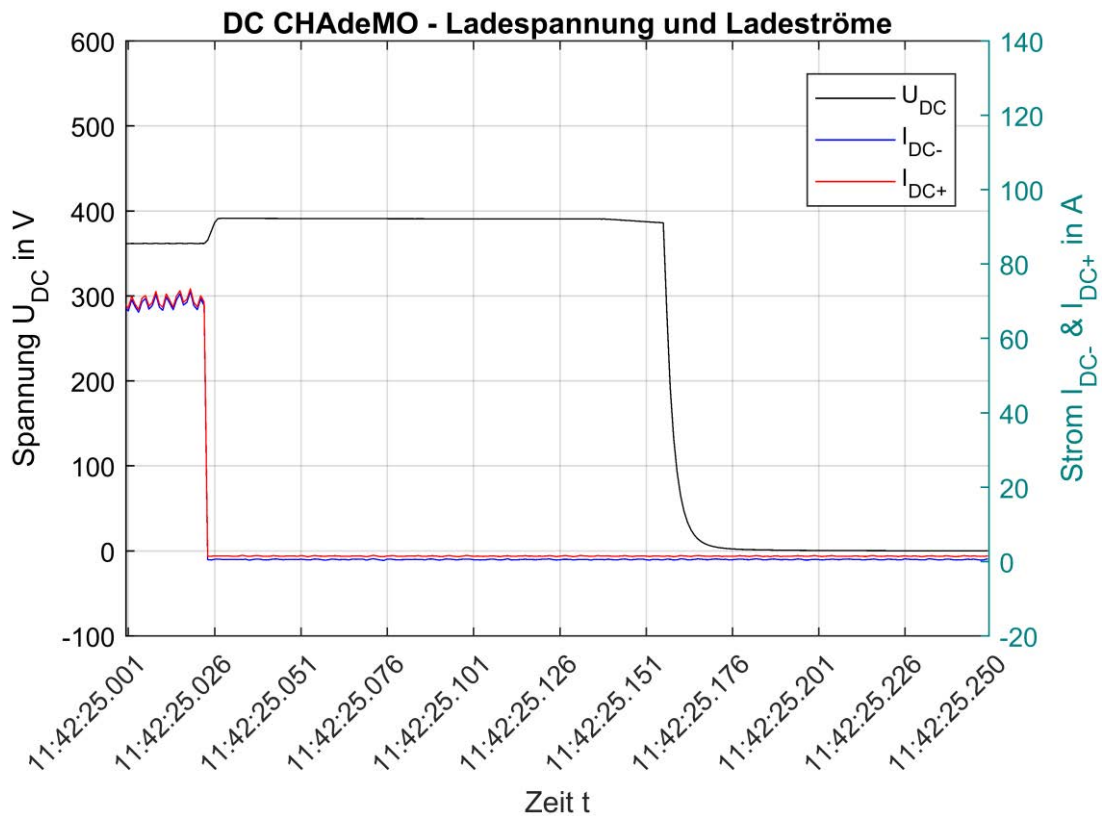


Abbildung 67: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung charging start/stop 1

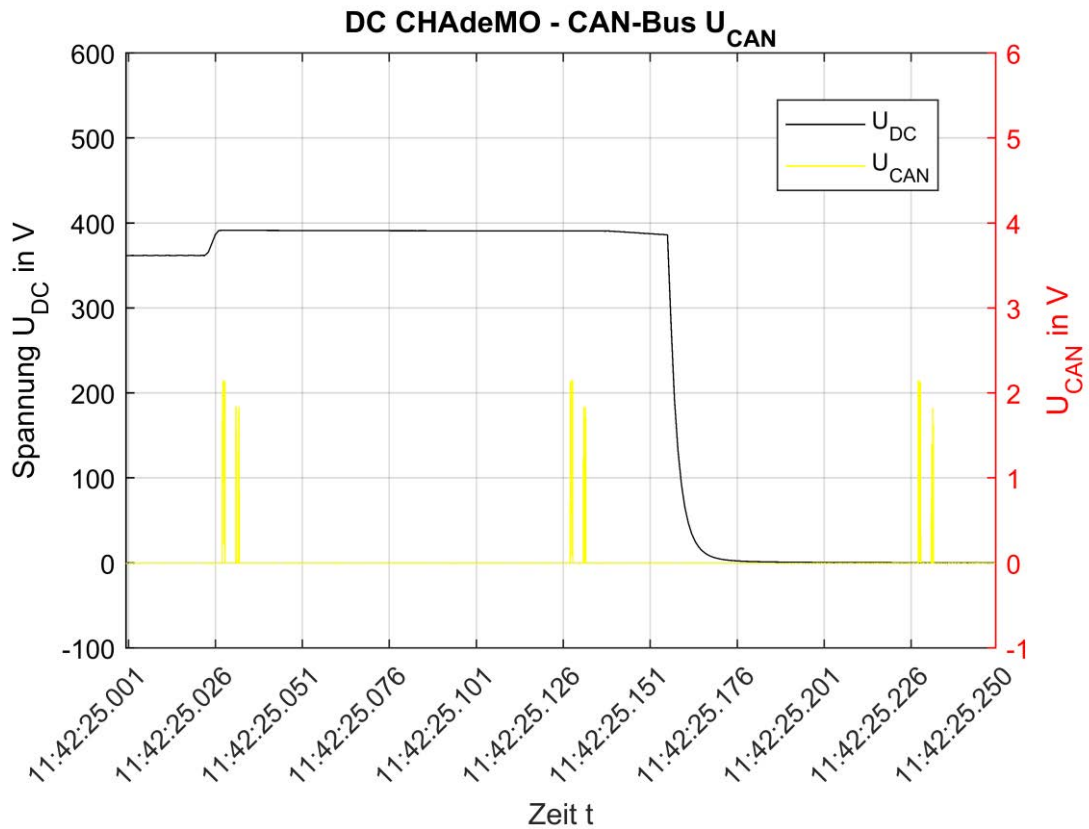


Abbildung 68: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung charging start/stop 1

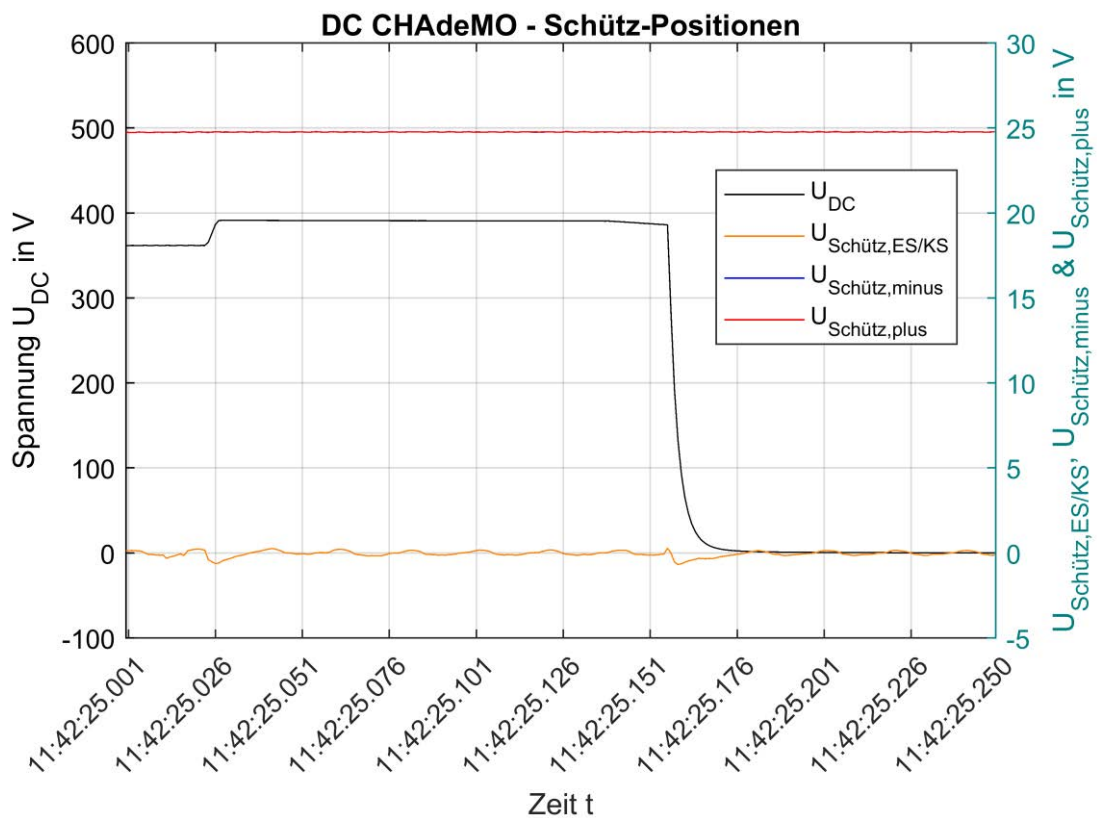


Abbildung 69: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung charging start/stop 1

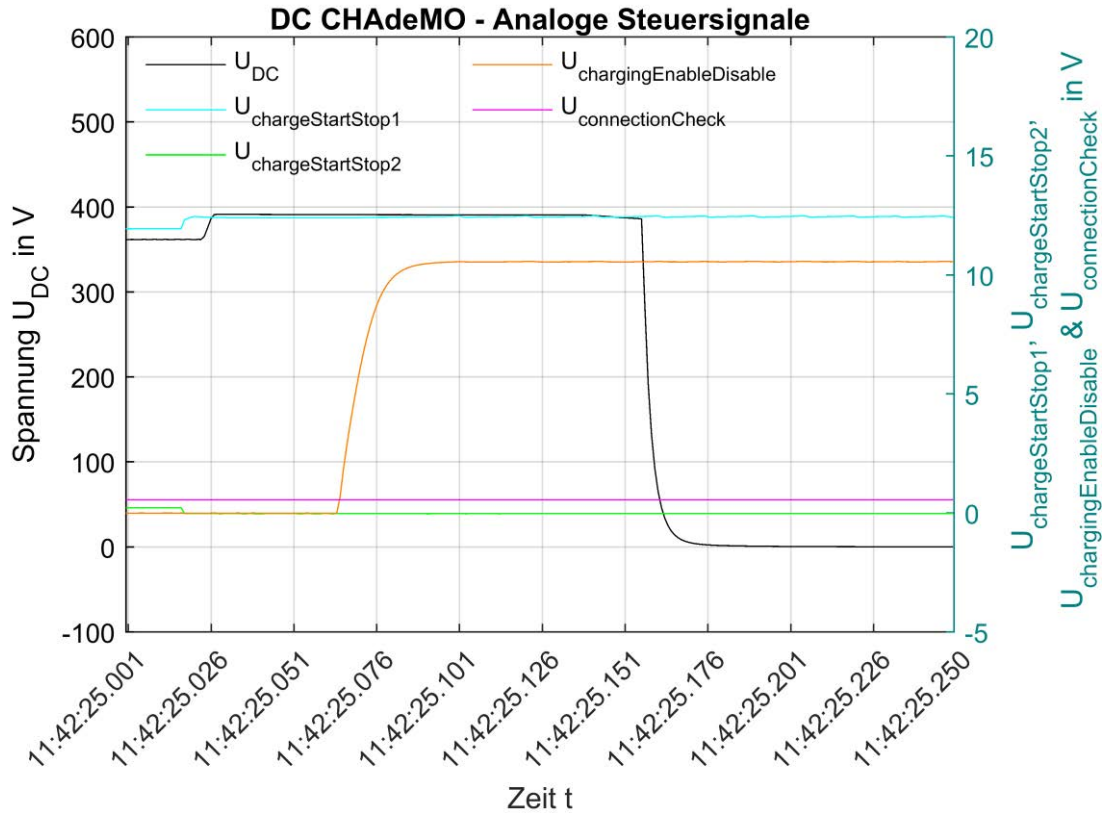


Abbildung 70: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung charging start/stop 1

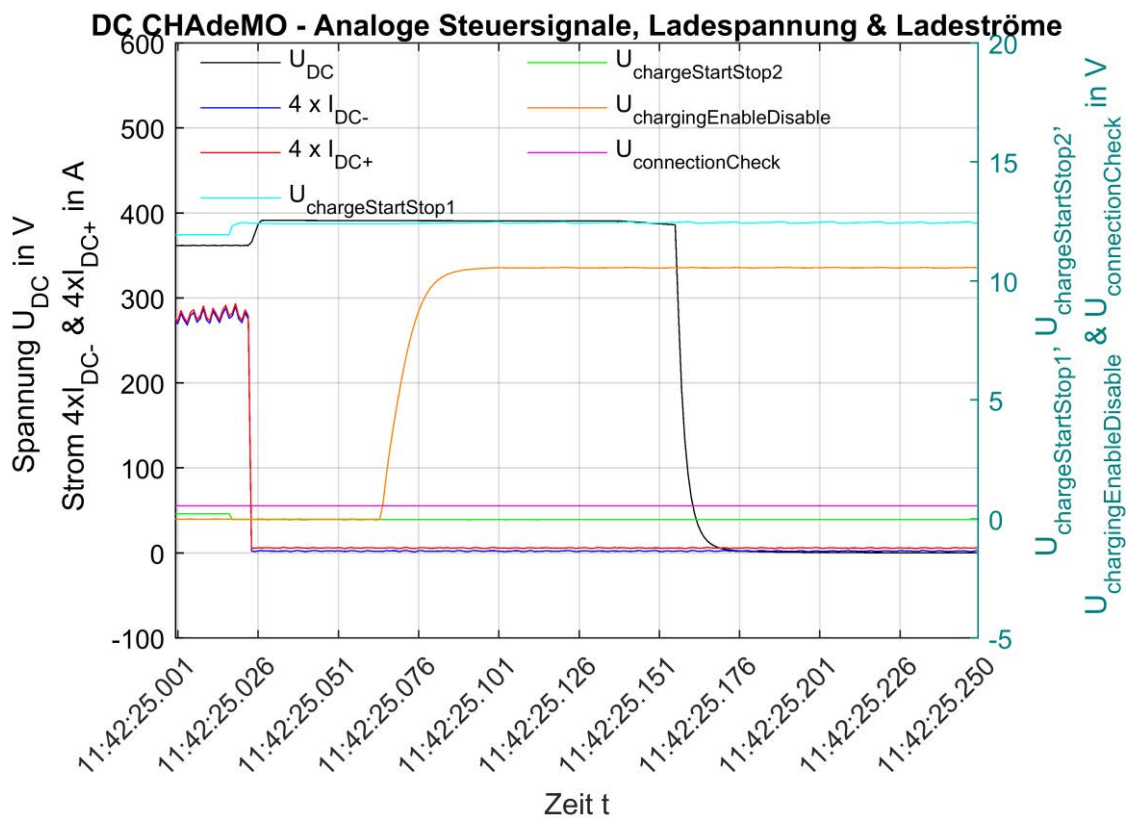


Abbildung 71: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung charging start/stop 1

8.1.2.5 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „charging start/stop 2“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:43:10,750	11:43:11,000	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
11:43:10.799	11:43:10.805		11:43:10.953
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA	00:00:00.006		00:00:00.154

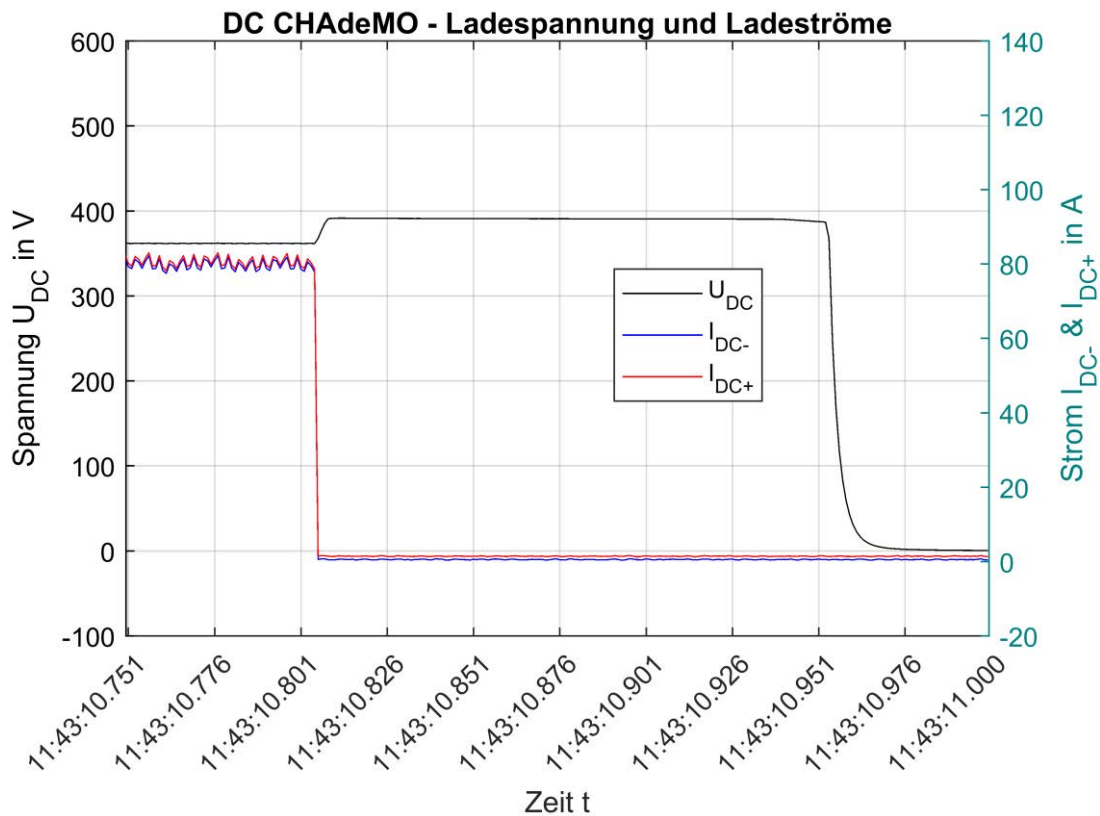


Abbildung 72: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung charging start/stop 2

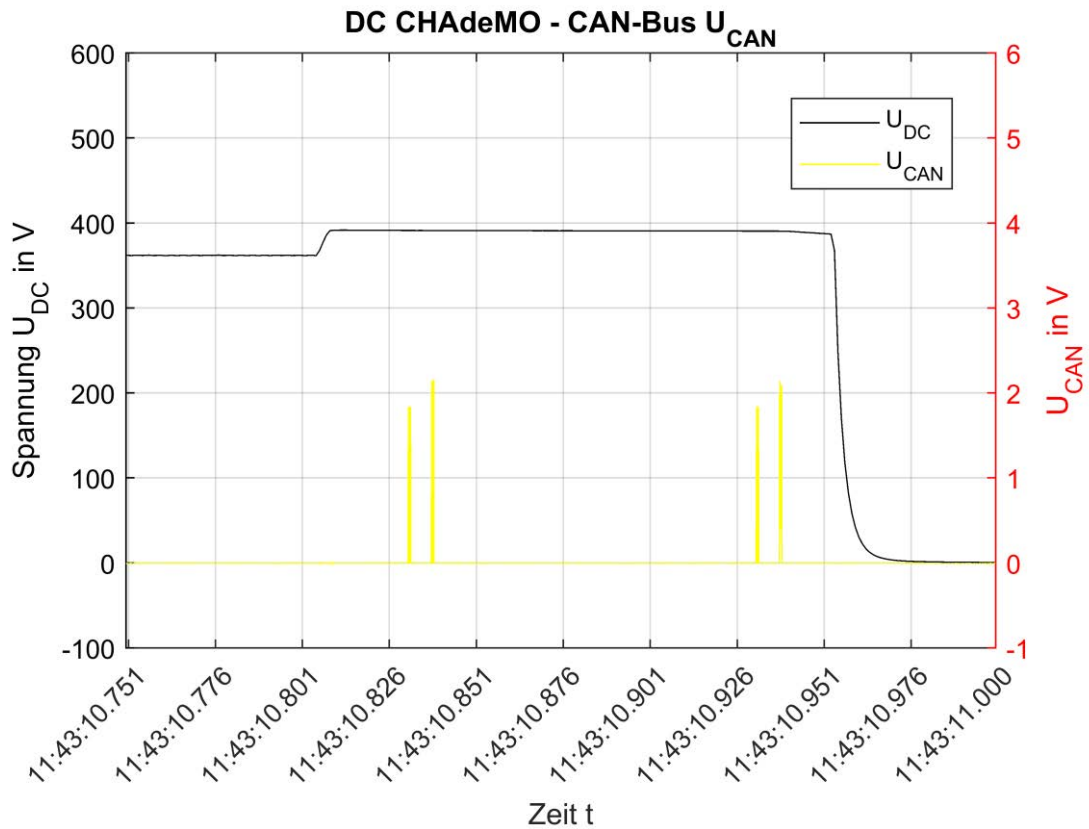


Abbildung 73: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung charging start/stop 2

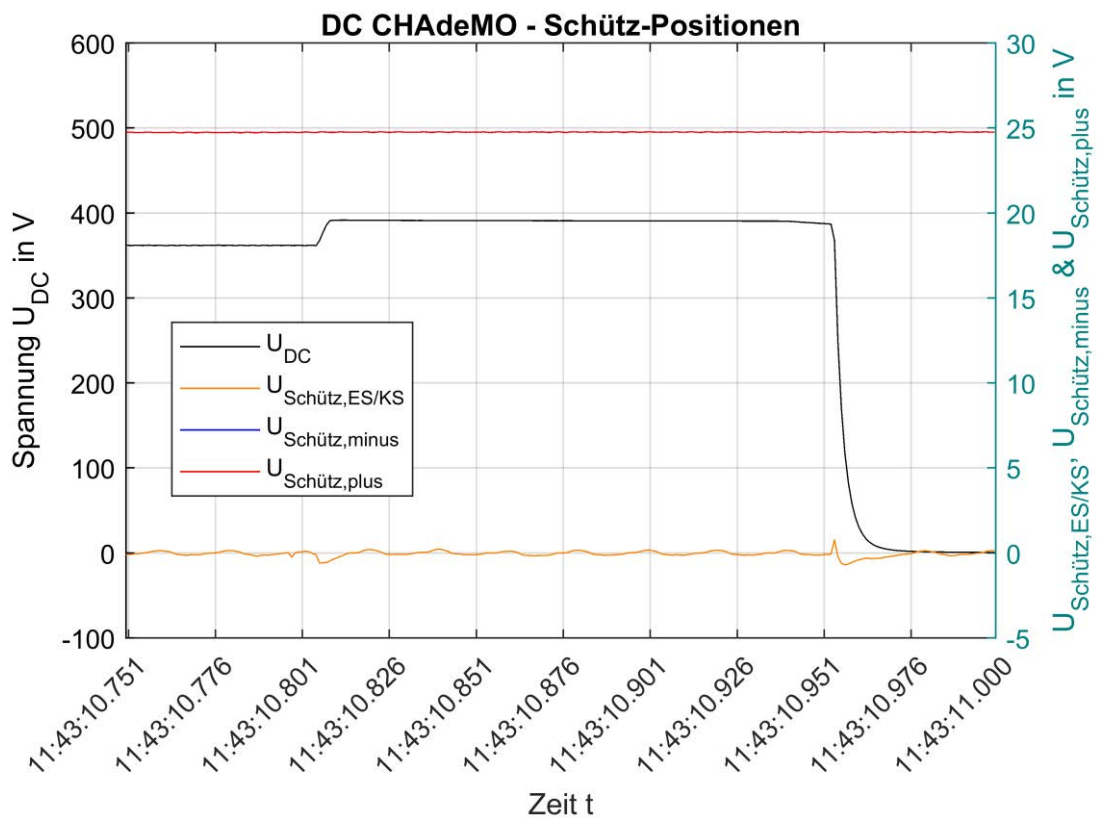


Abbildung 74: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung charging start/stop 2

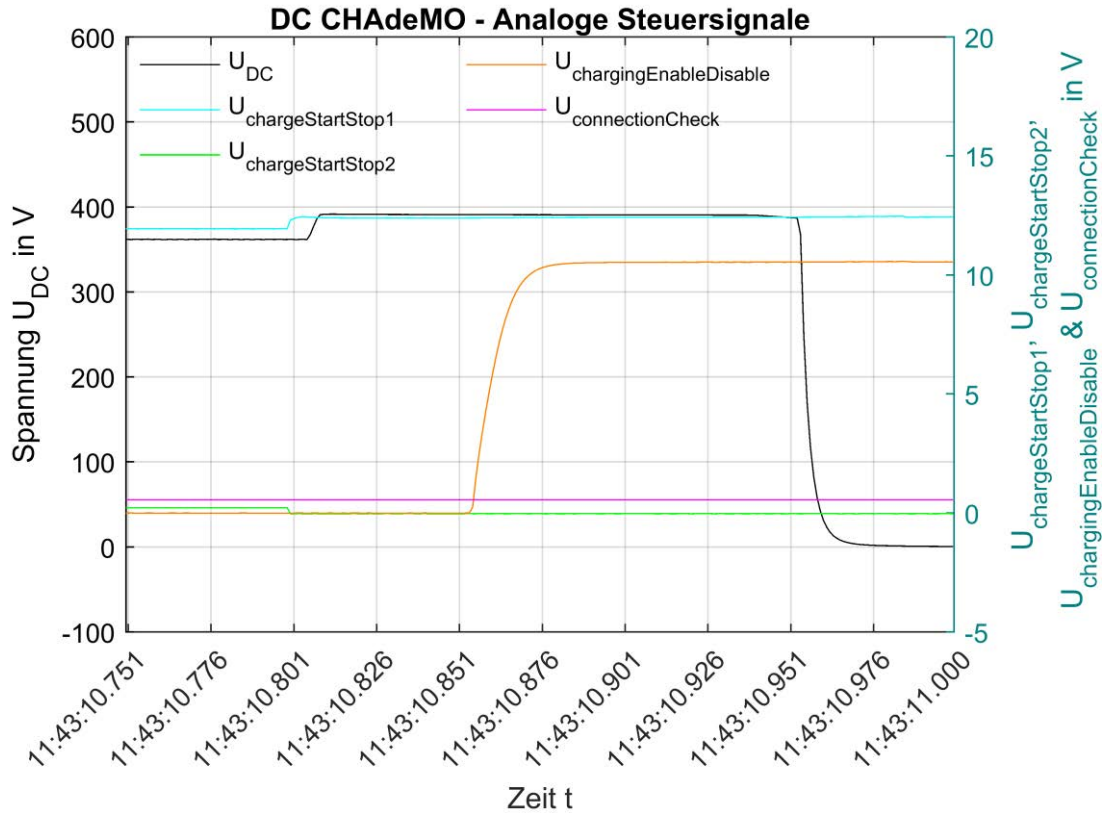


Abbildung 75: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung charging start/stop 2

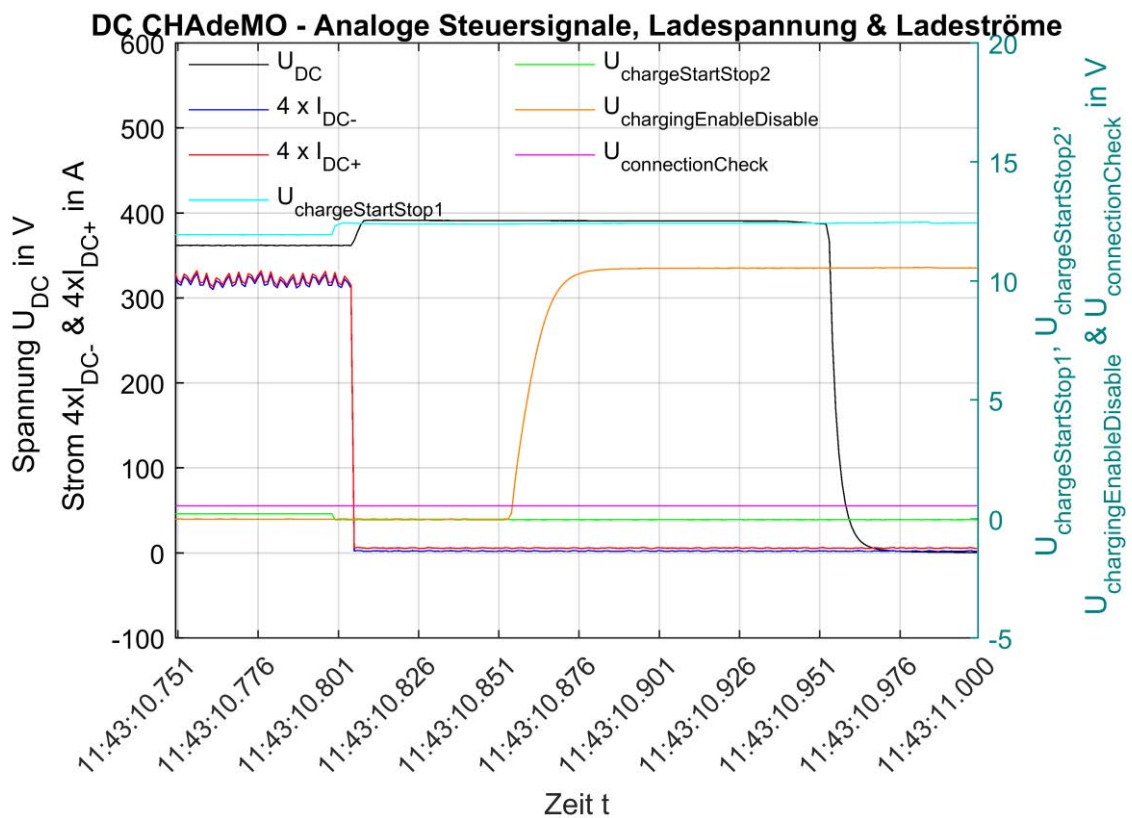


Abbildung 76: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung charging start/stop 2

8.1.2.6 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „CAN-H“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:44:21,000	11:44:23,000	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt	
11:44:21.336	11:44:22.365	11:44:22.559	
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt	
JA	00:00:01.028	00:00:01.222	

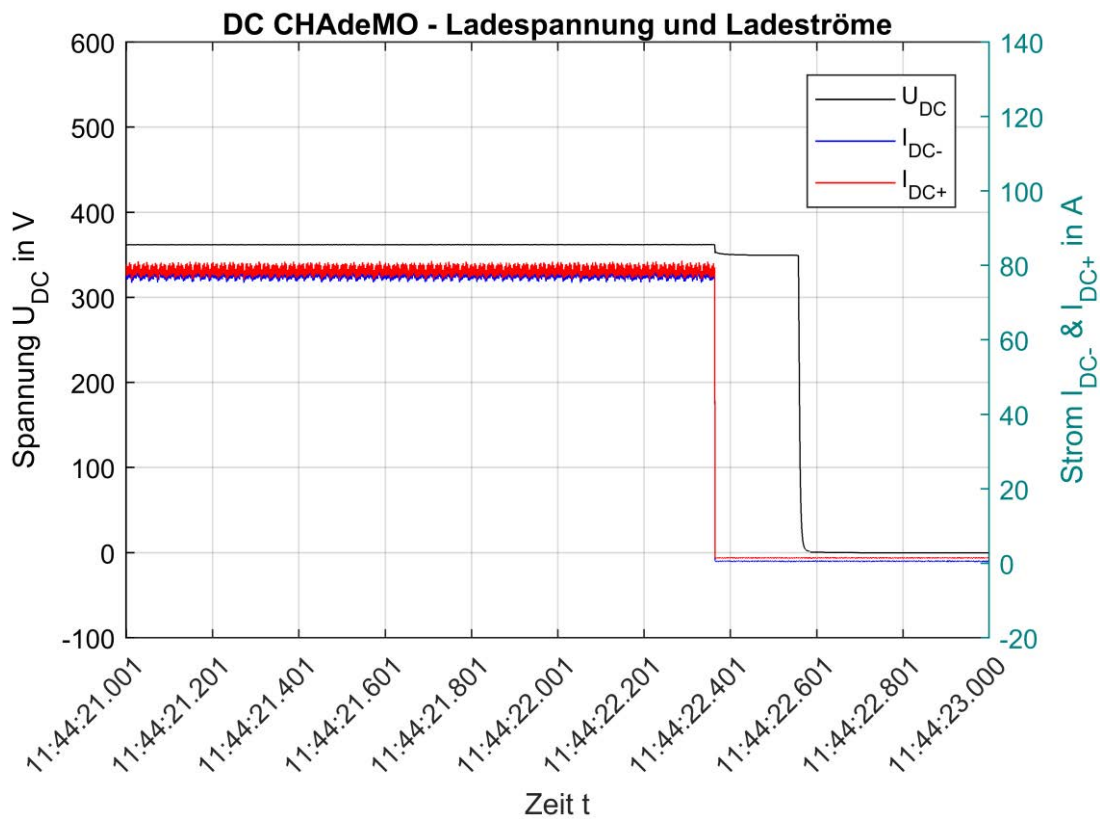


Abbildung 77: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung CAN-H

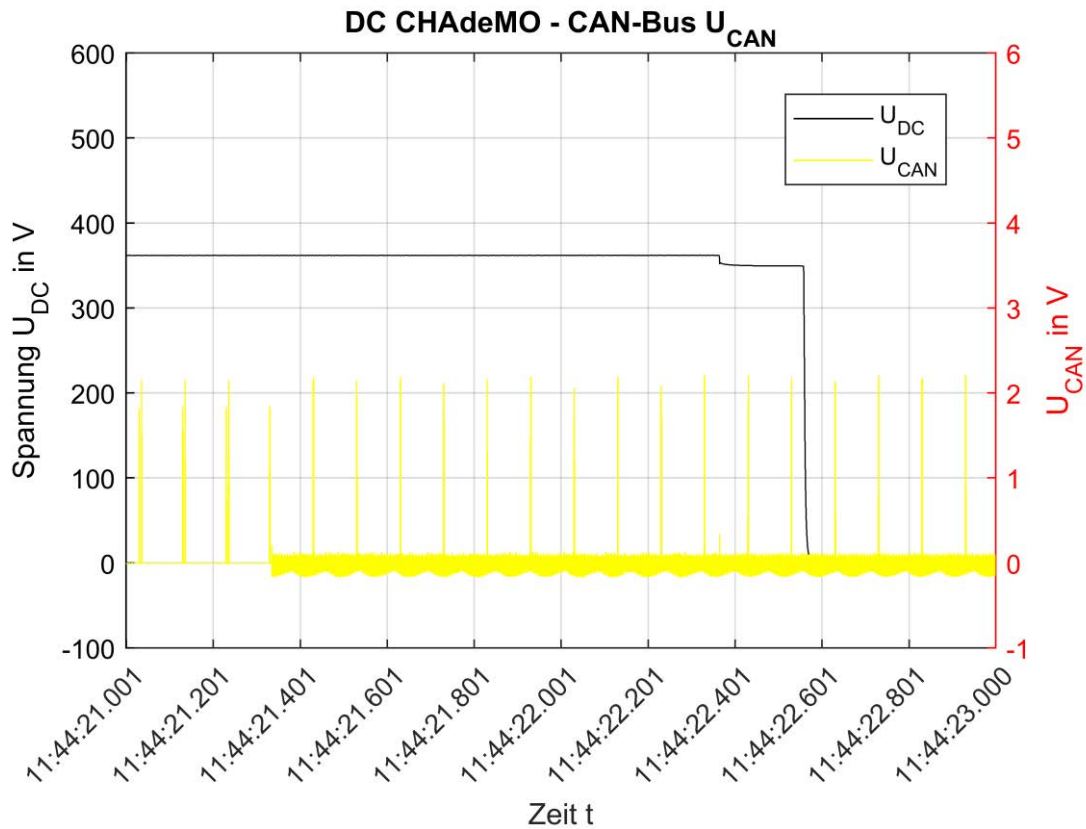


Abbildung 78: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung CAN-H

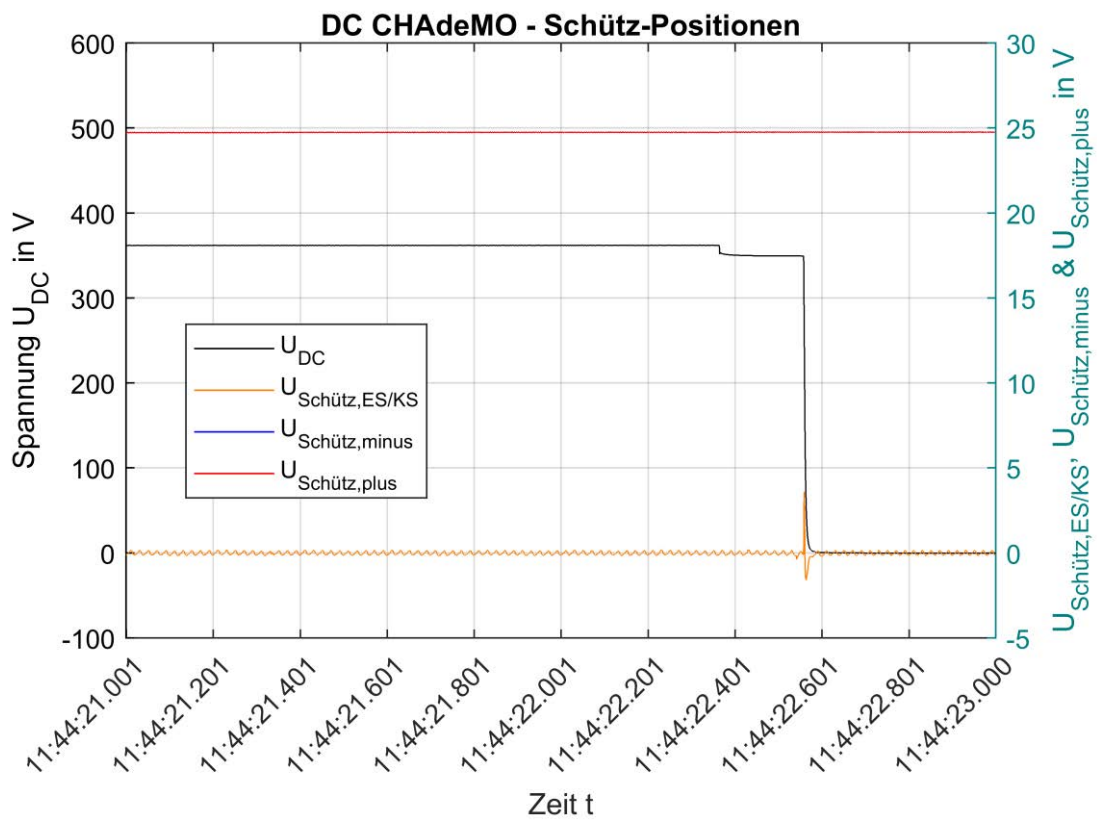


Abbildung 79: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung CAN-H

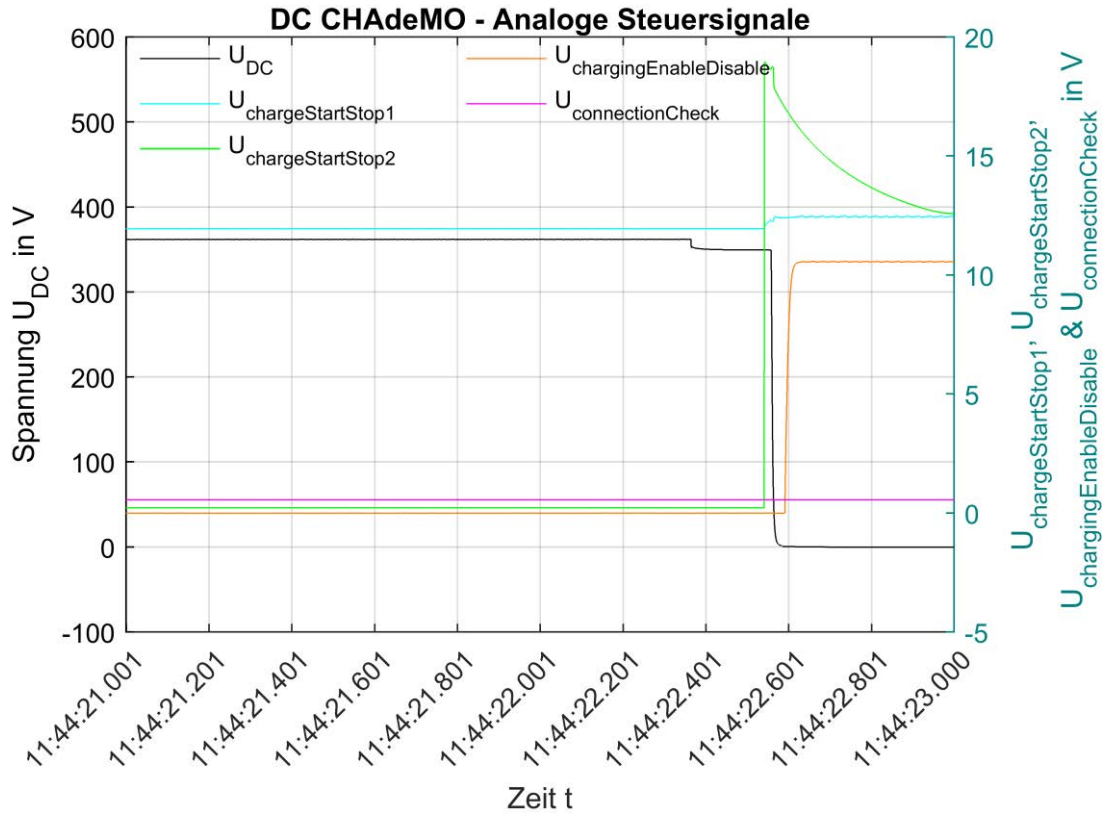


Abbildung 80: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung CAN-H

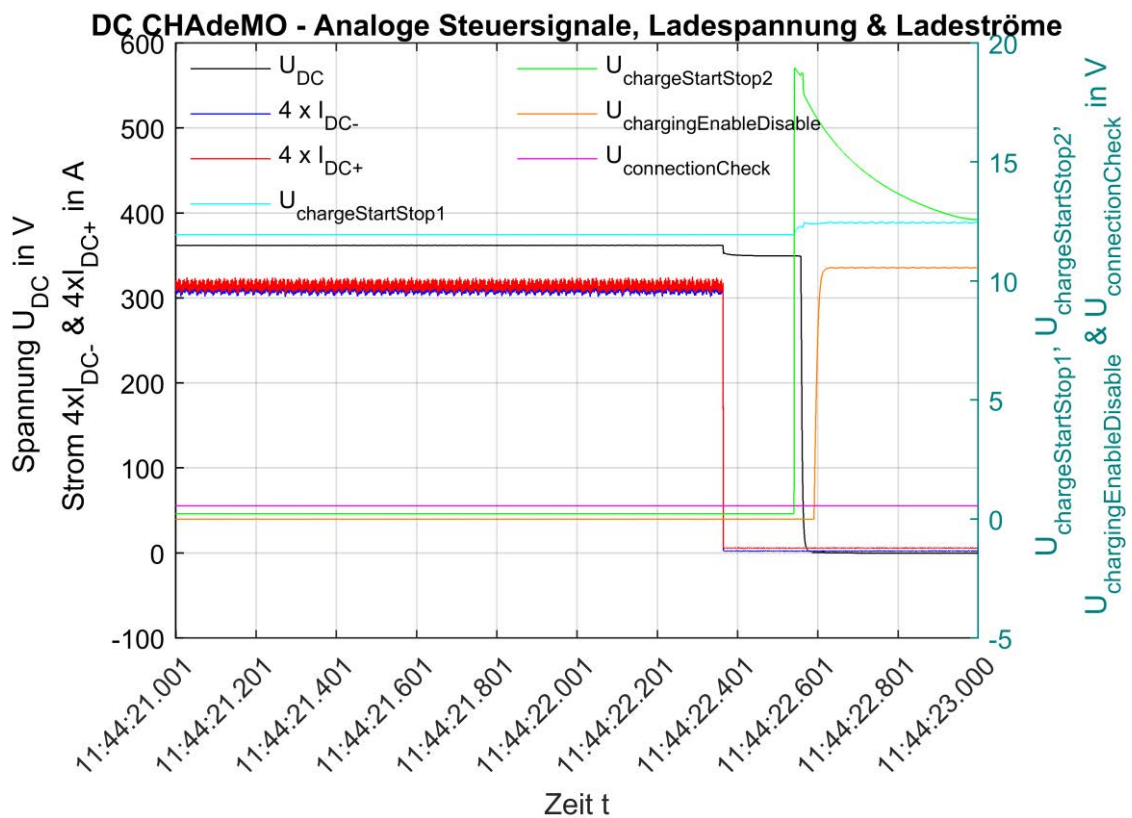


Abbildung 81: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung CAN-H

8.1.2.7 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „CAN-L“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:46:24,400	11:46:26,400	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
11:46:24.704	11:46:25.673		11:46:25.966
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA	00:00:00.969		00:00:01.262

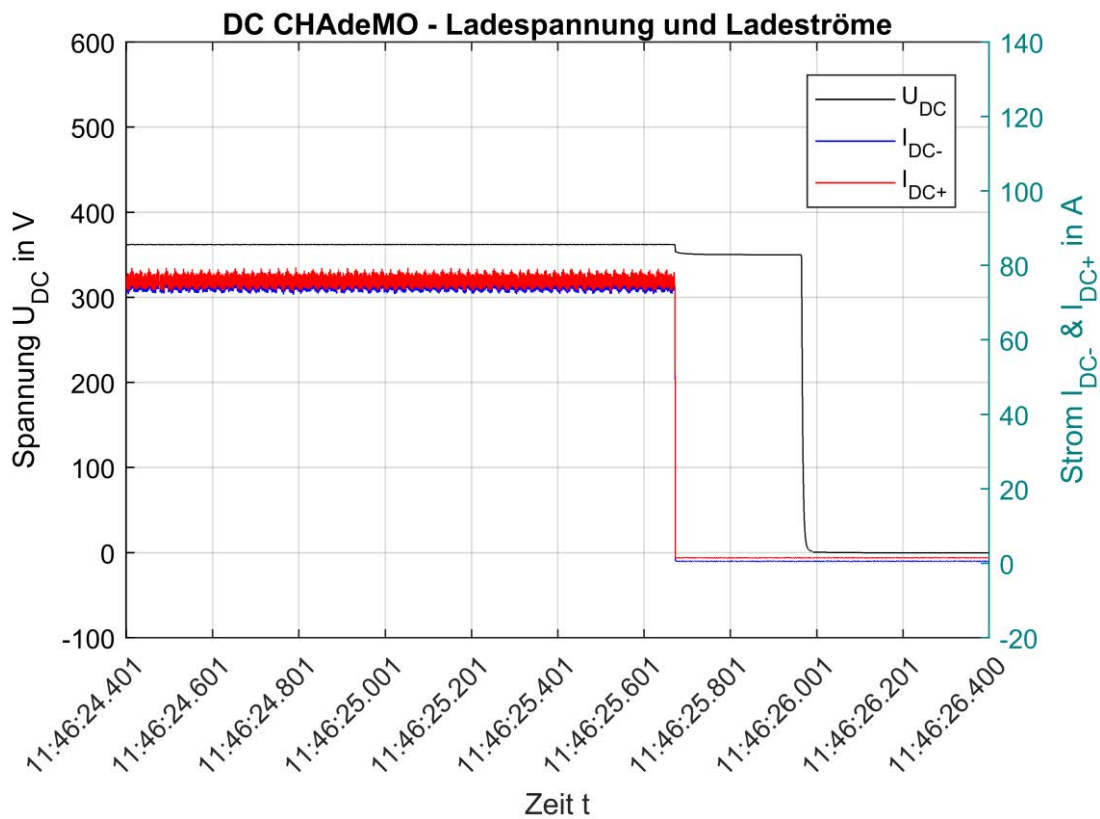


Abbildung 82: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung CAN-L

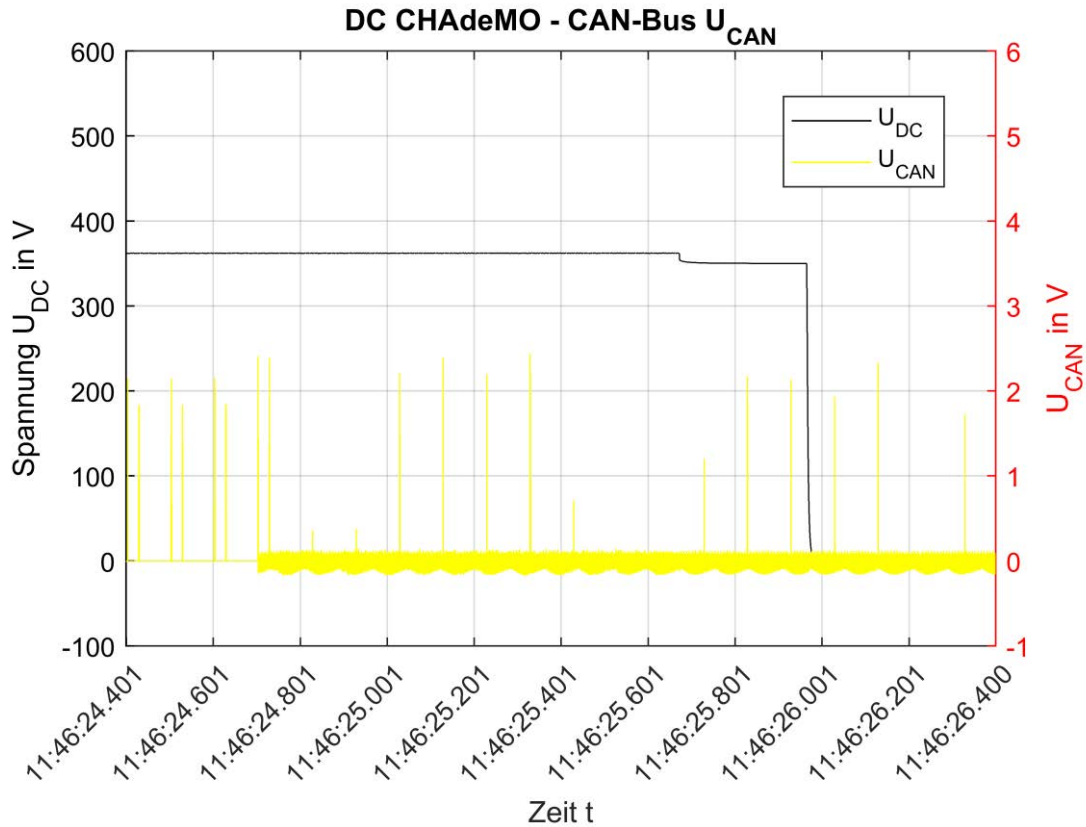


Abbildung 83: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung CAN-L

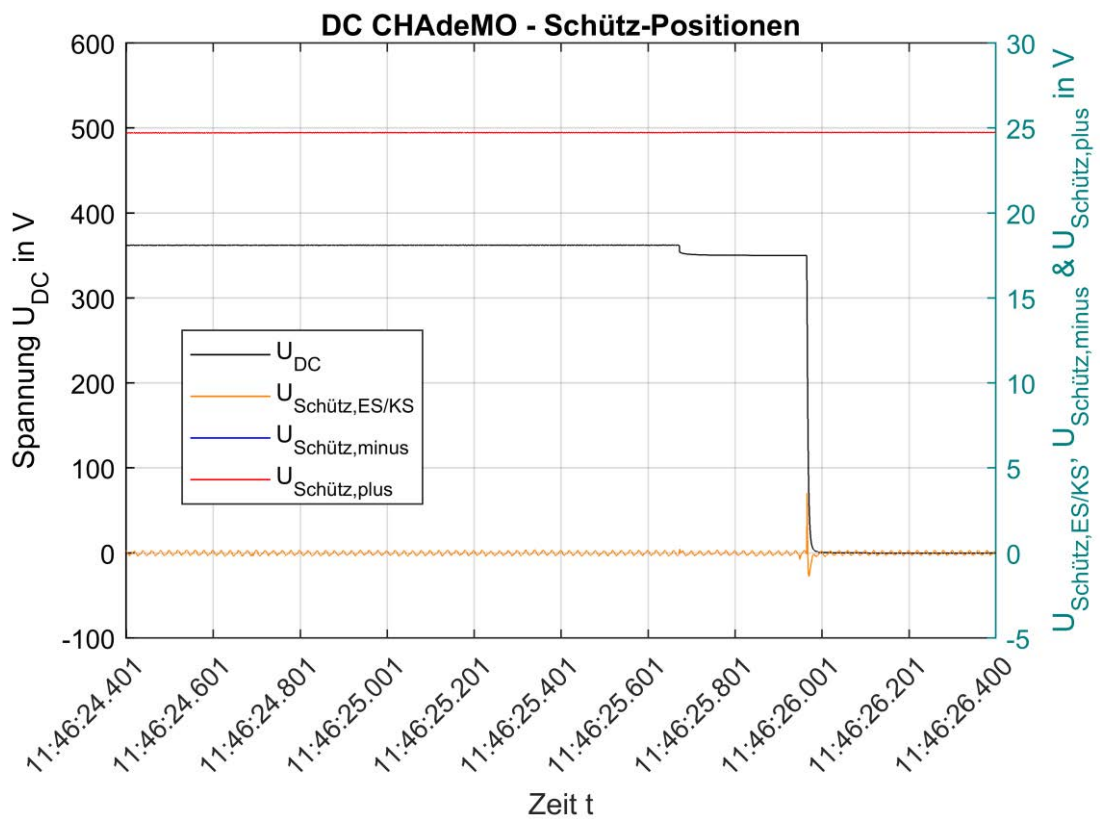


Abbildung 84: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung CAN-L

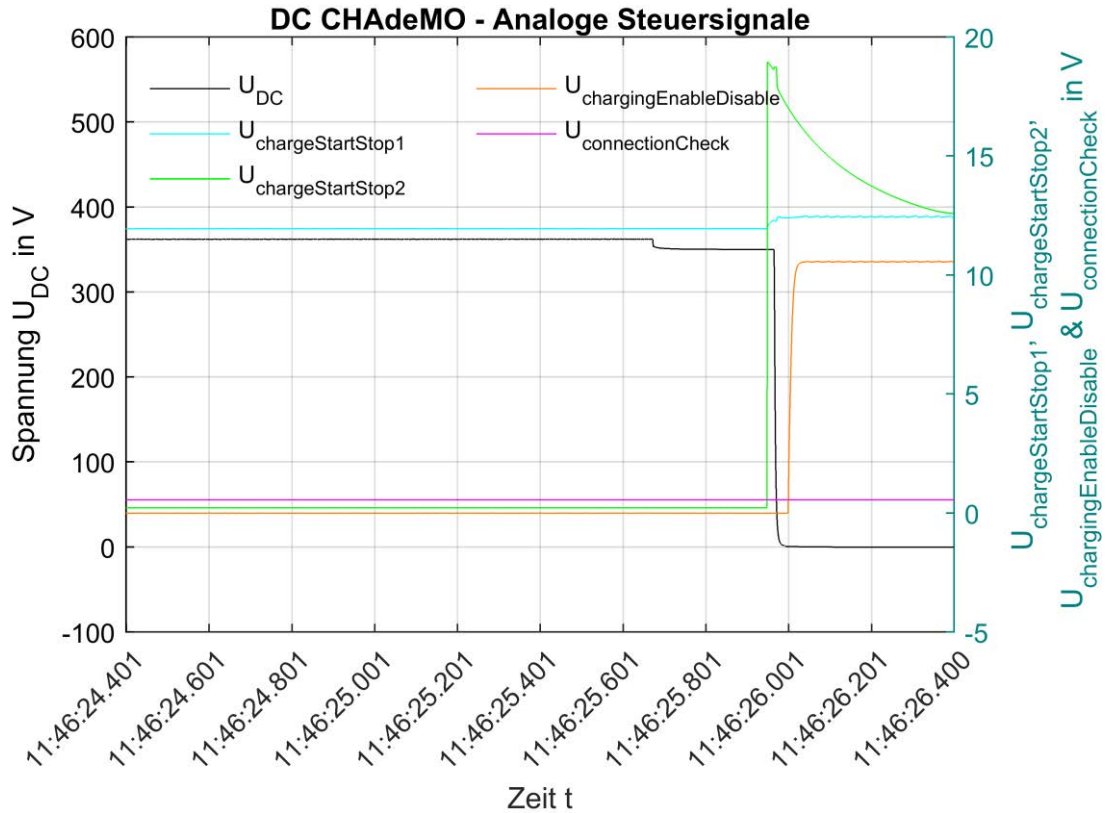


Abbildung 85: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung CAN-L

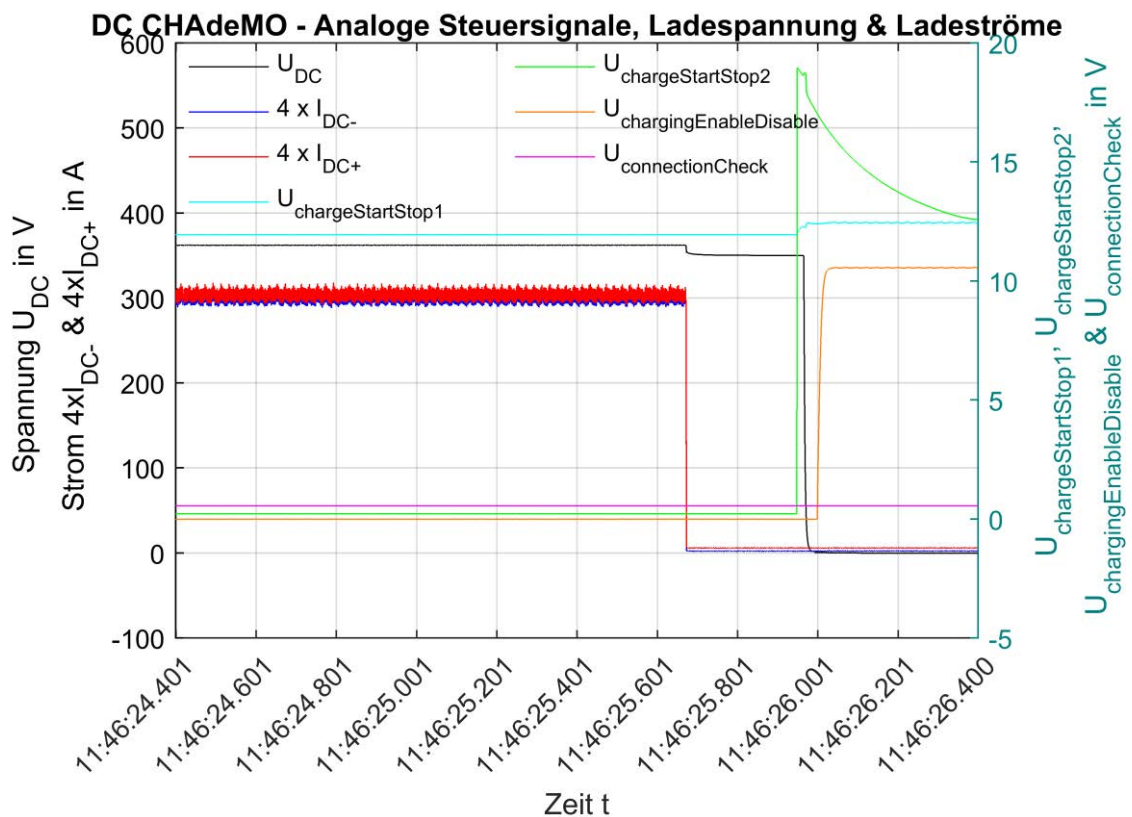


Abbildung 86: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung CAN-L

8.1.2.8 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „DC+“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:47:35.000	11:47:36.000	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
11:47:35.221		11:47:35.219	11:47:35.352
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA		00:00:00.002	00:00:00.131

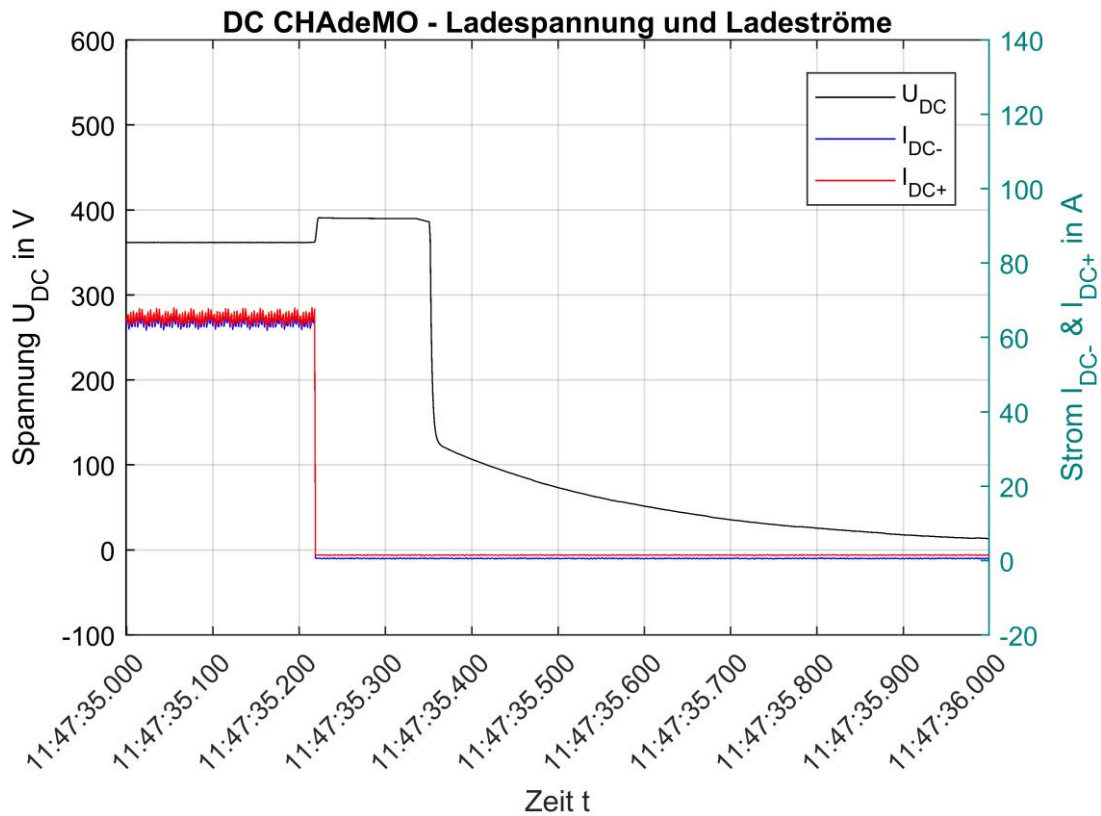


Abbildung 87: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung DC+

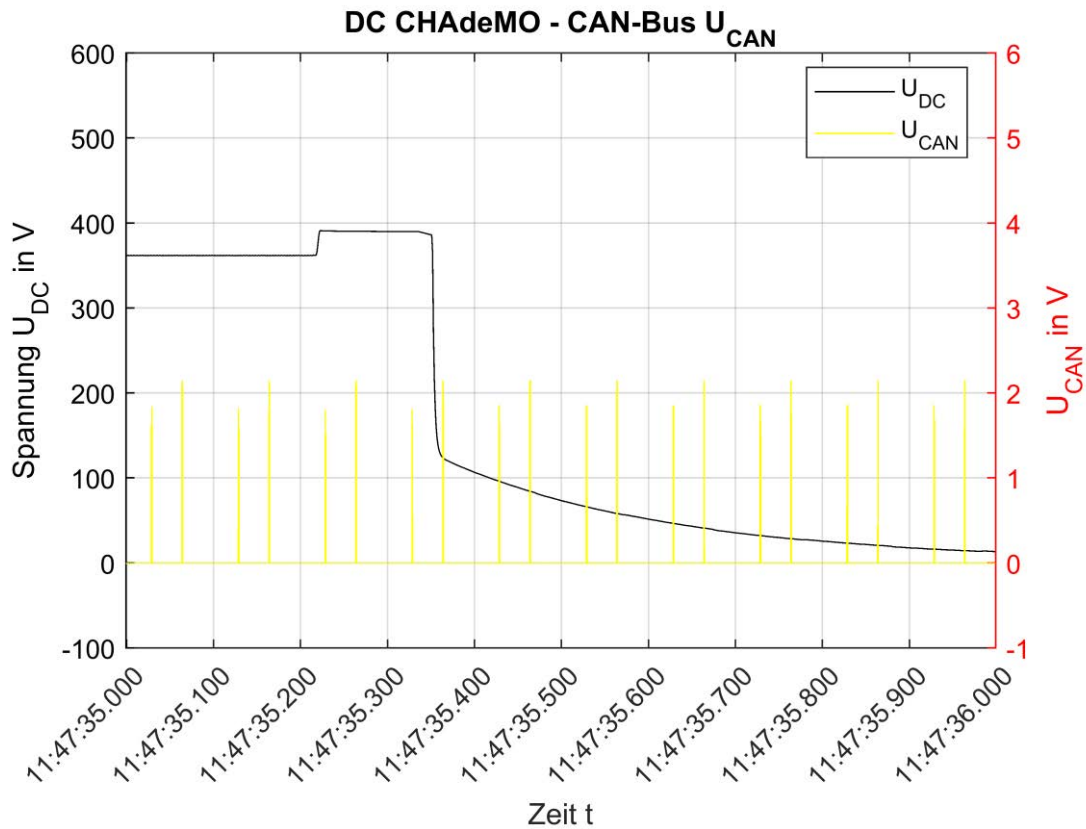


Abbildung 88: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung DC+

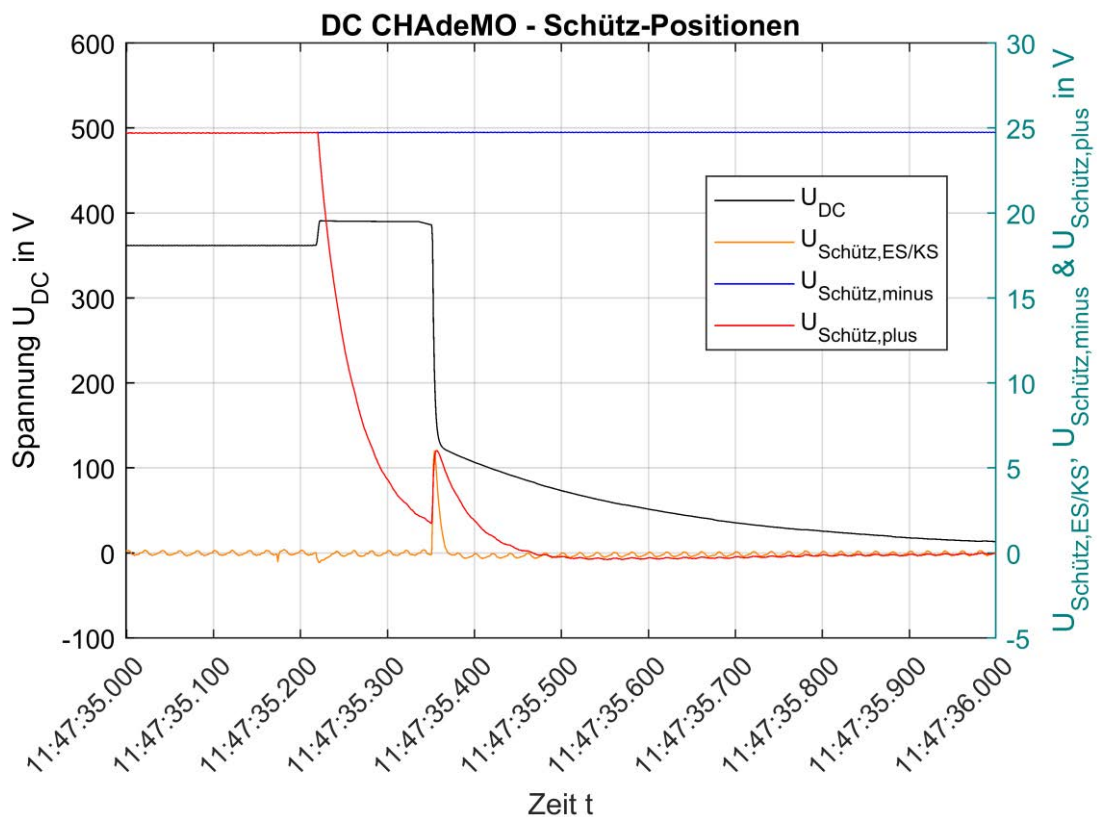


Abbildung 89: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung DC+

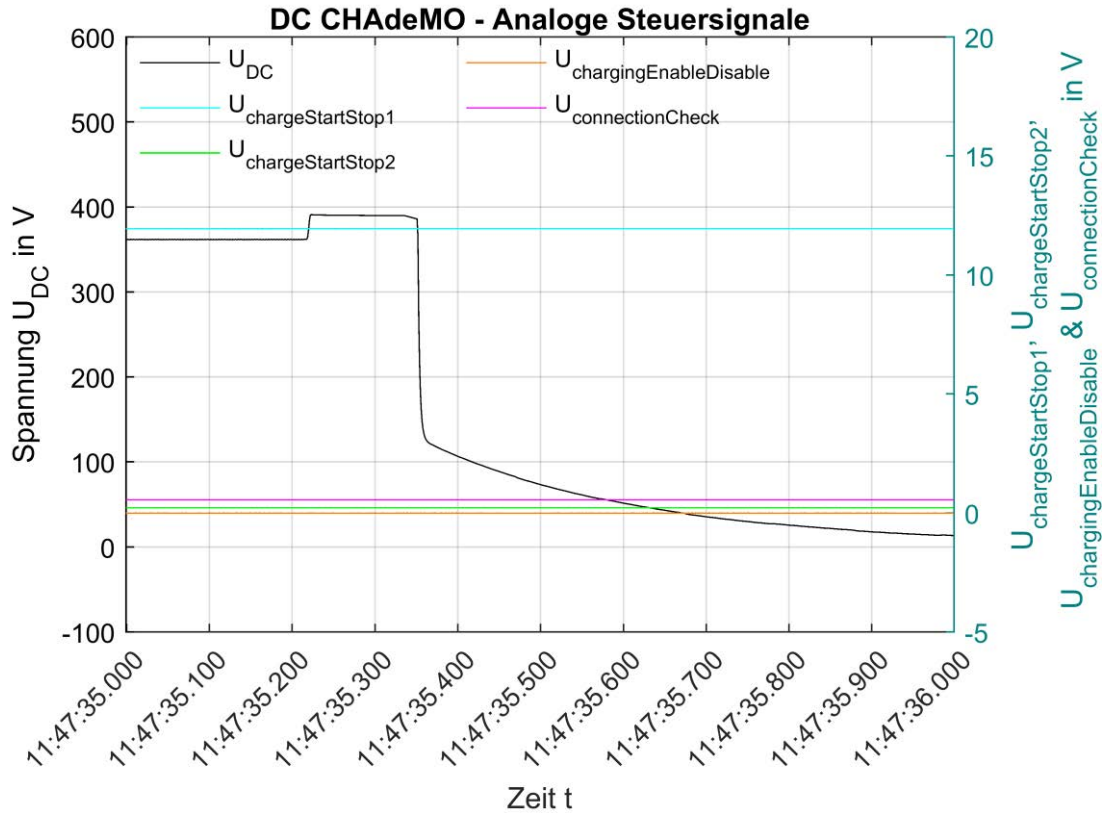


Abbildung 90: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung DC+

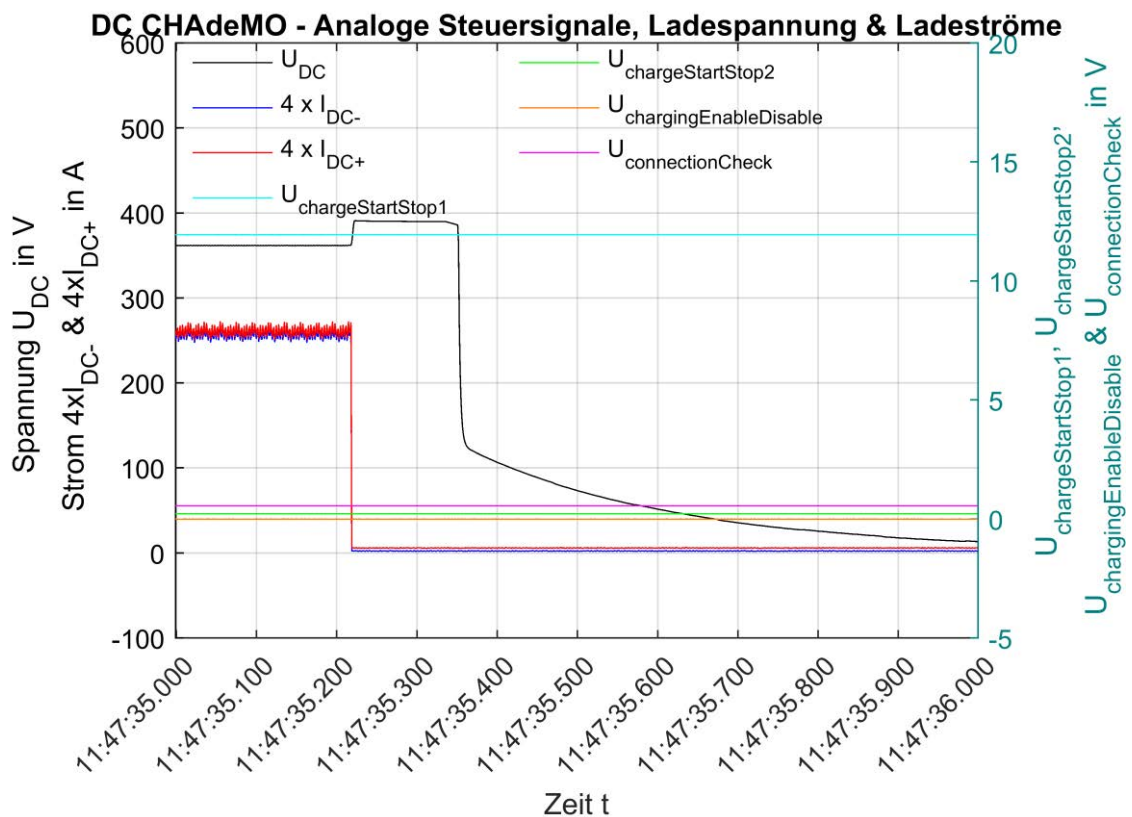


Abbildung 91: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung DC+

8.1.2.9 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „DC“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:49:00.000	11:49:02.000	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
11:49:00.411		11:49:00.407	11:49:00.551
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA		00:00:00.004	00:00:00.140

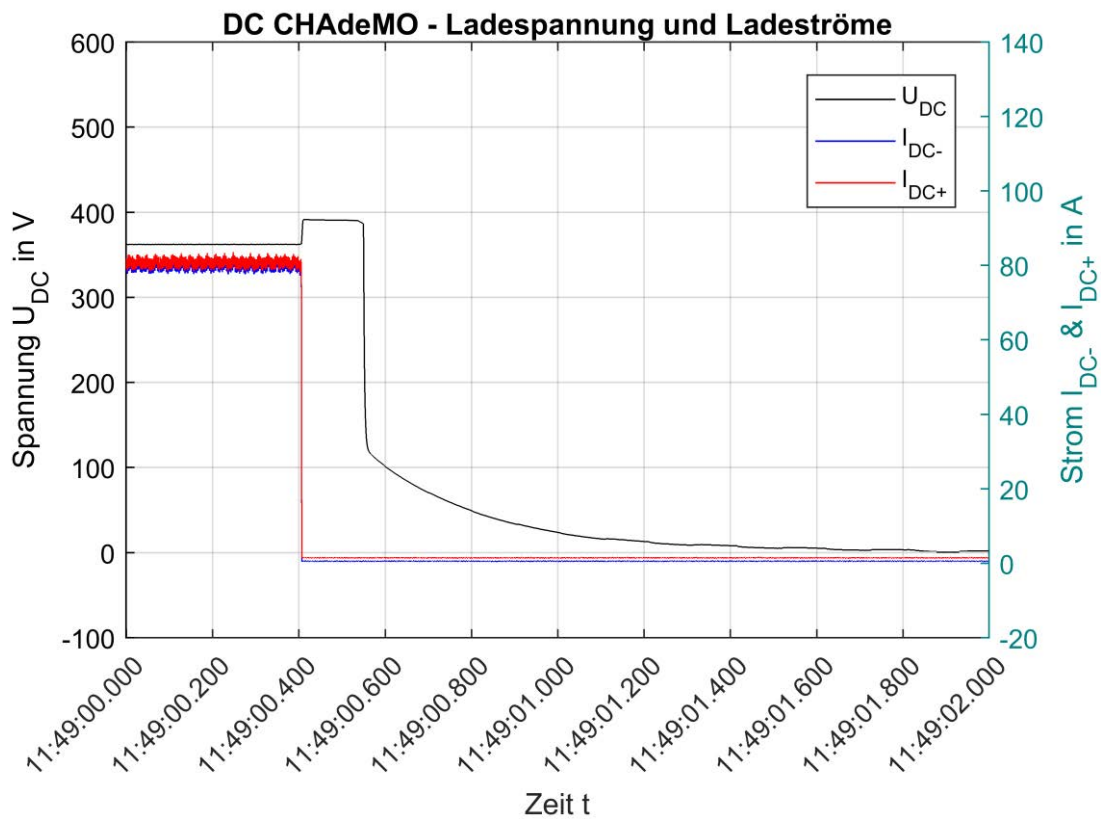


Abbildung 92: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung DC-

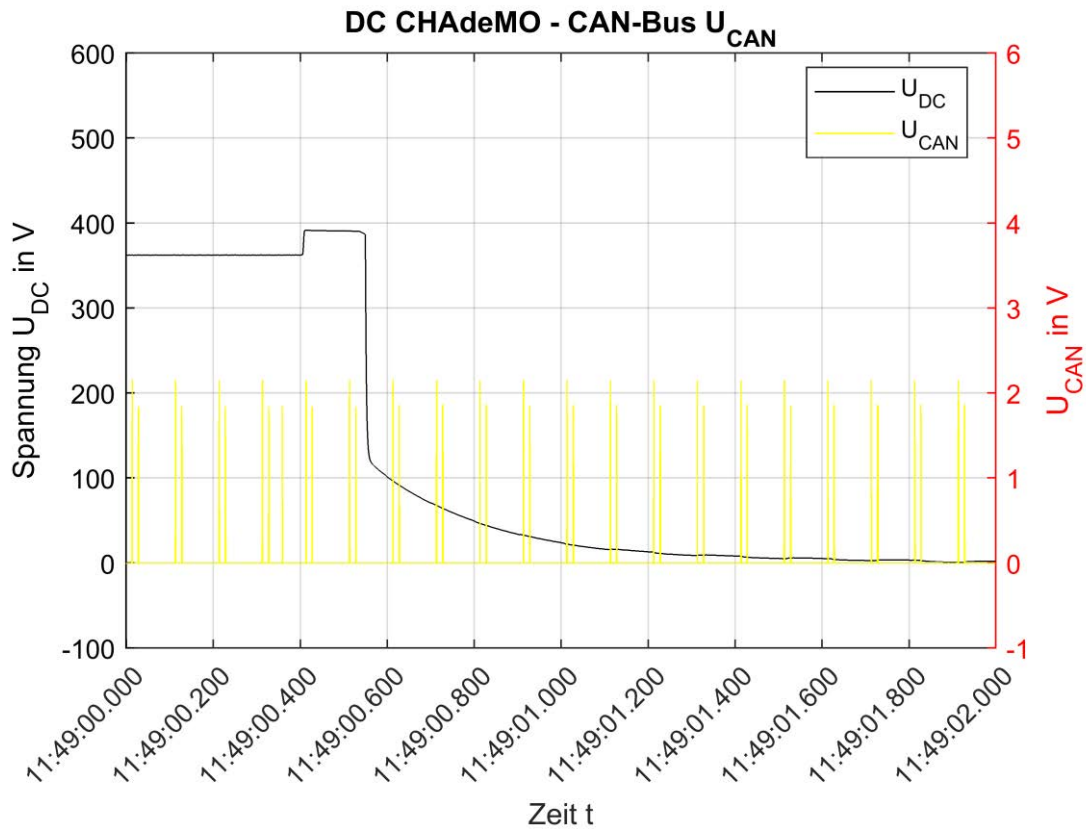


Abbildung 93: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung DC-

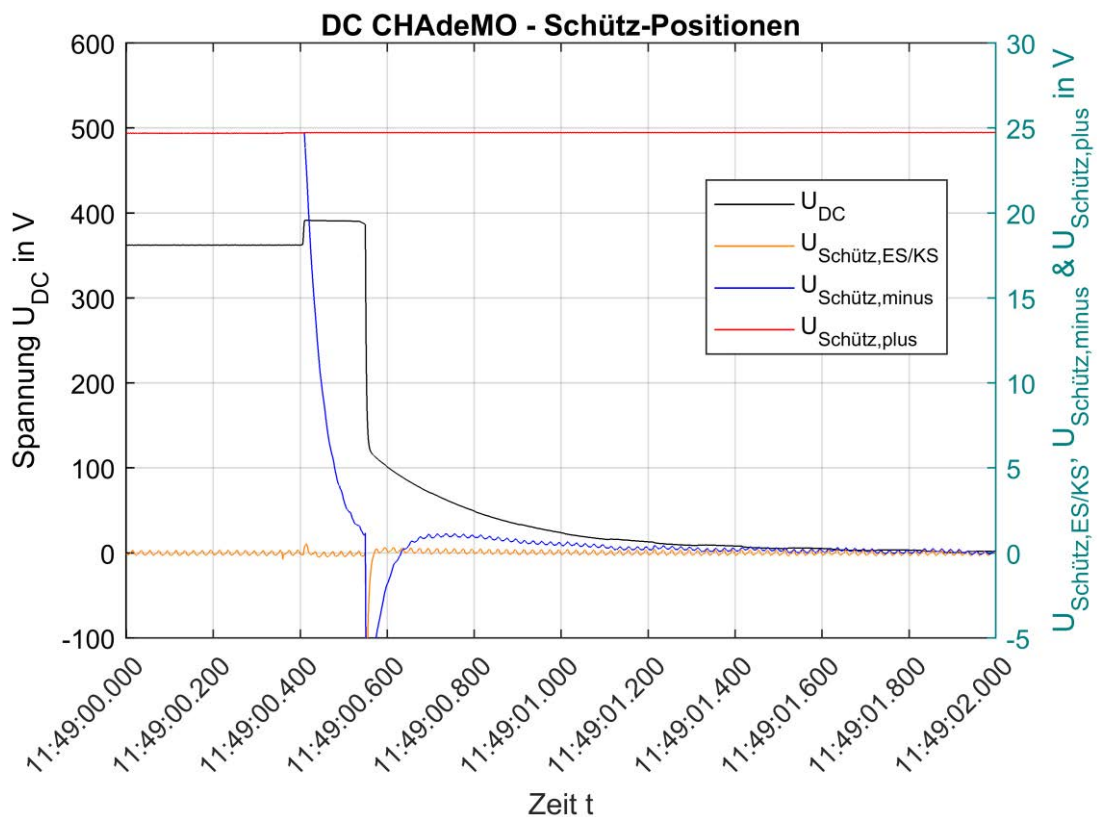


Abbildung 94: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung DC-

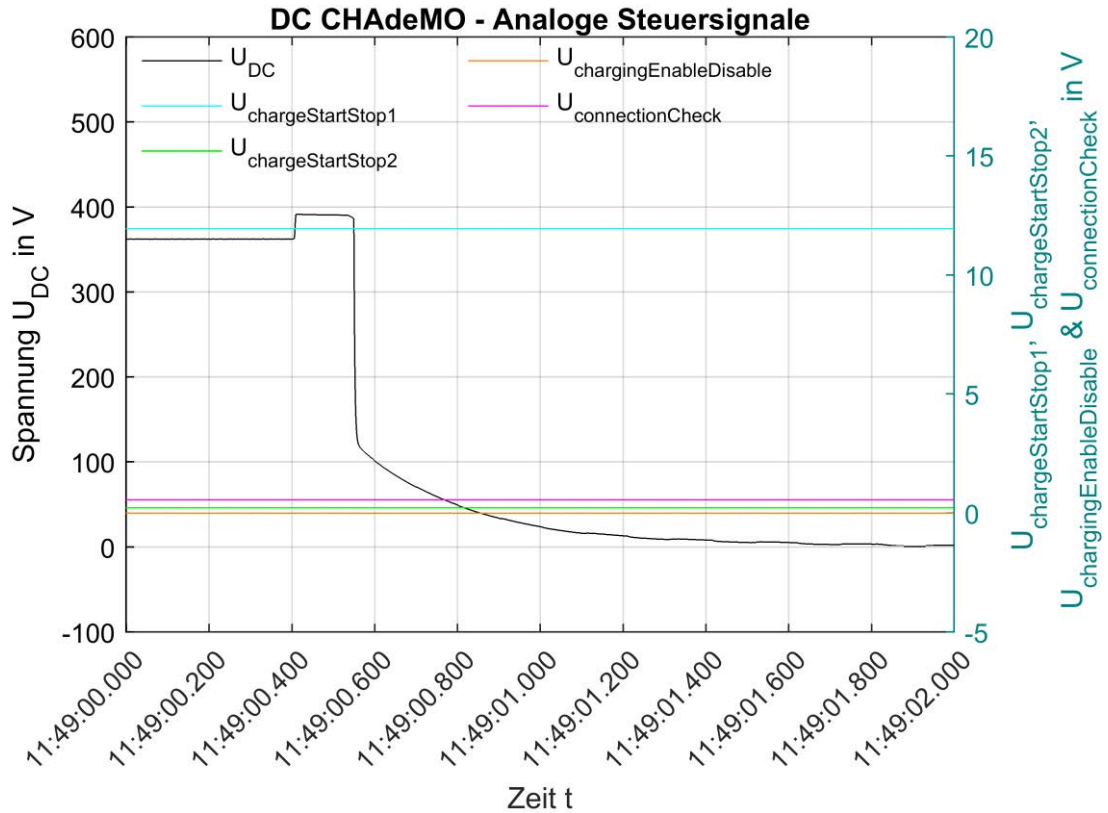


Abbildung 95: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung DC-

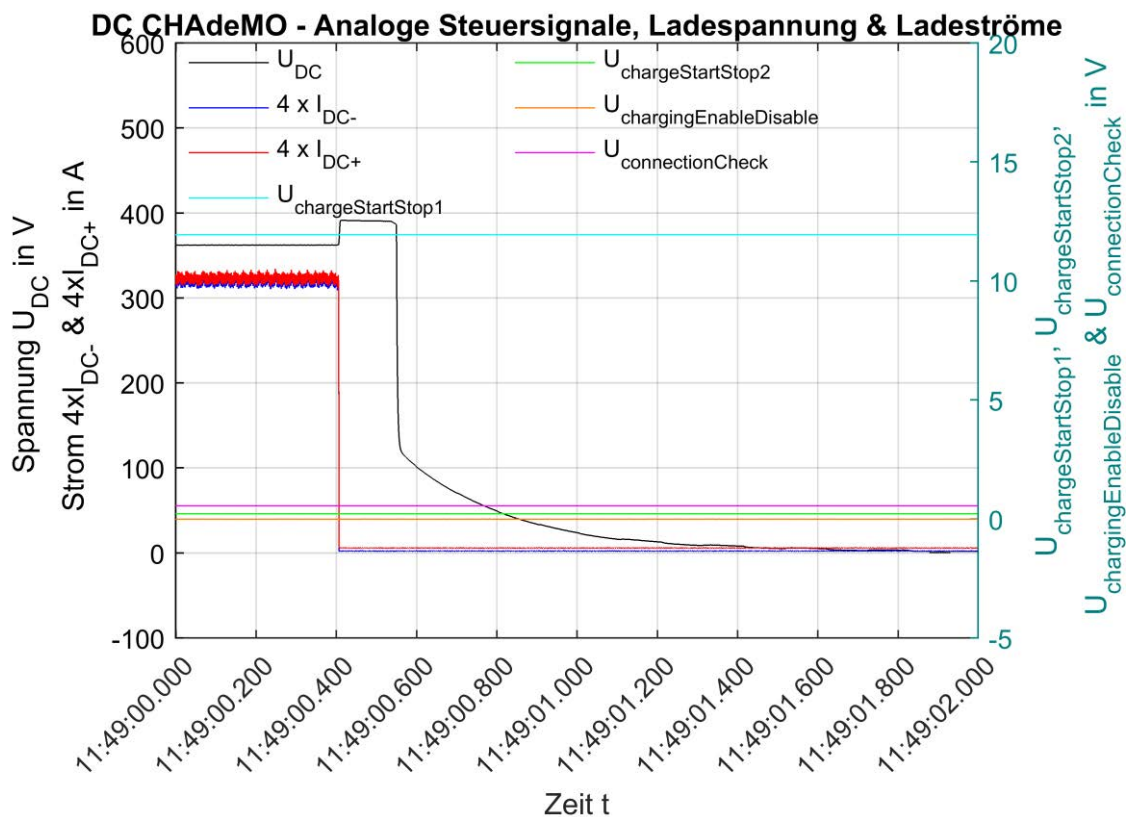


Abbildung 96: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung DC-

8.1.2.10 CHAdeMO-Ladevorgang mit Unterbrechung des „PE“-Leiters

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:49:15,000	11:50:15,000	EVSU_DC_CHAdeMO_2017_11_07_0001
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt	
11:49:49.023	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt	
NEIN	keine Abschaltung	keine Abschaltung	

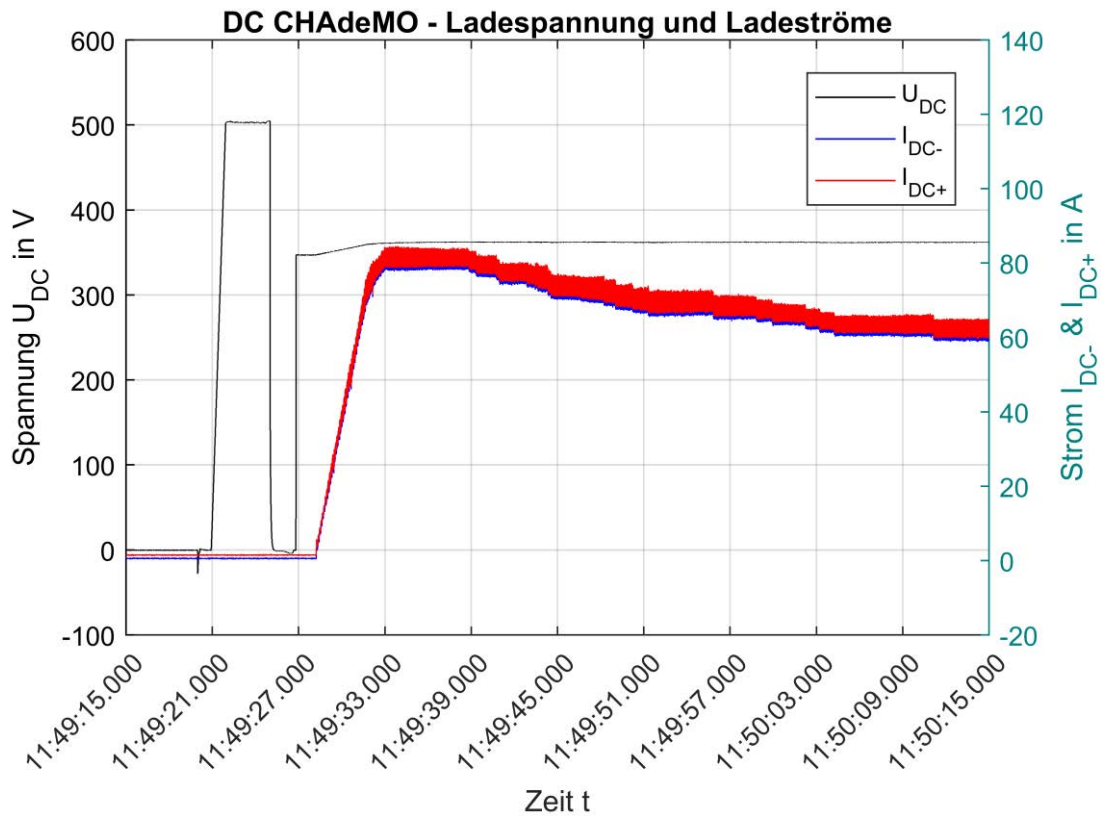


Abbildung 97: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung PE

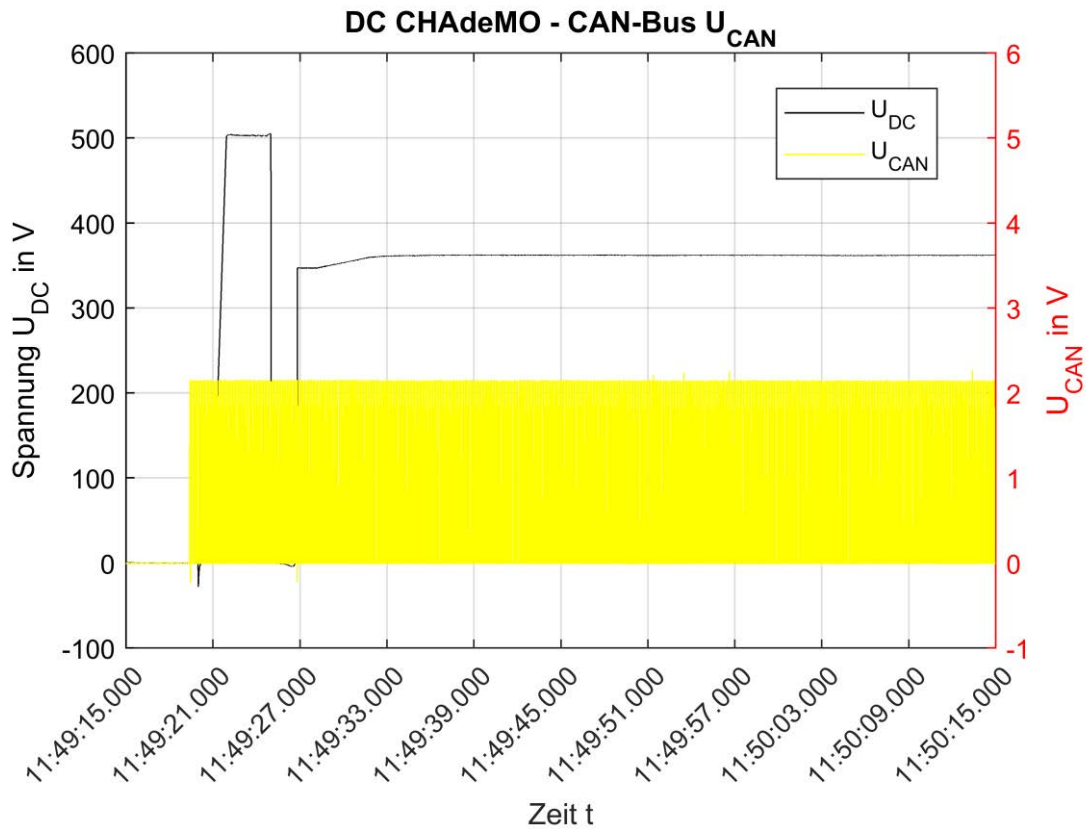


Abbildung 98: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Unterbrechung PE

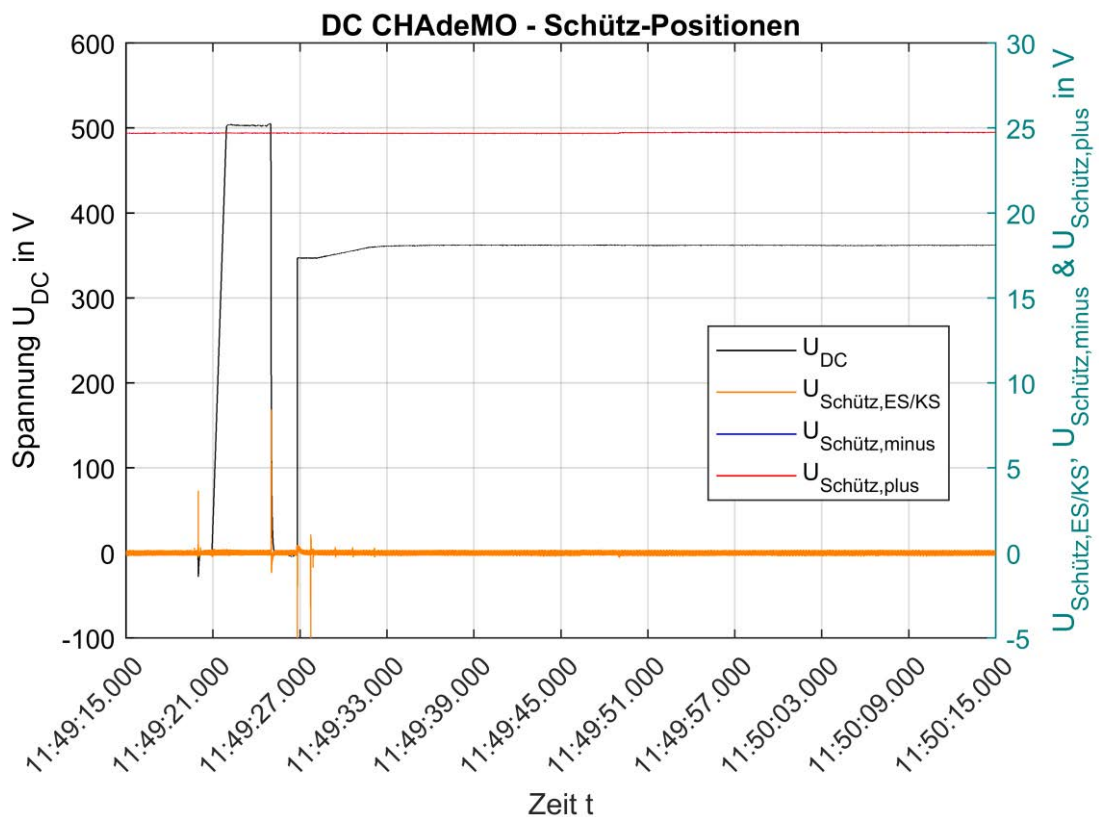


Abbildung 99: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Unterbrechung PE

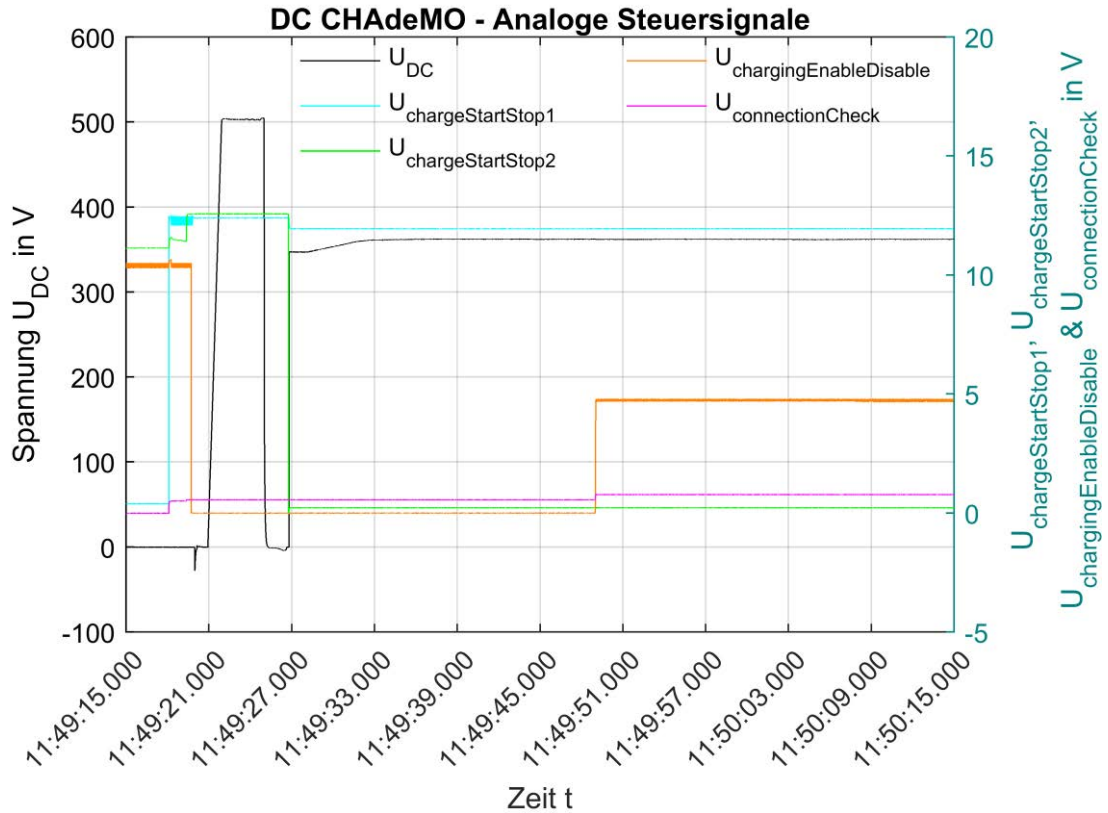


Abbildung 100: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Unterbrechung PE

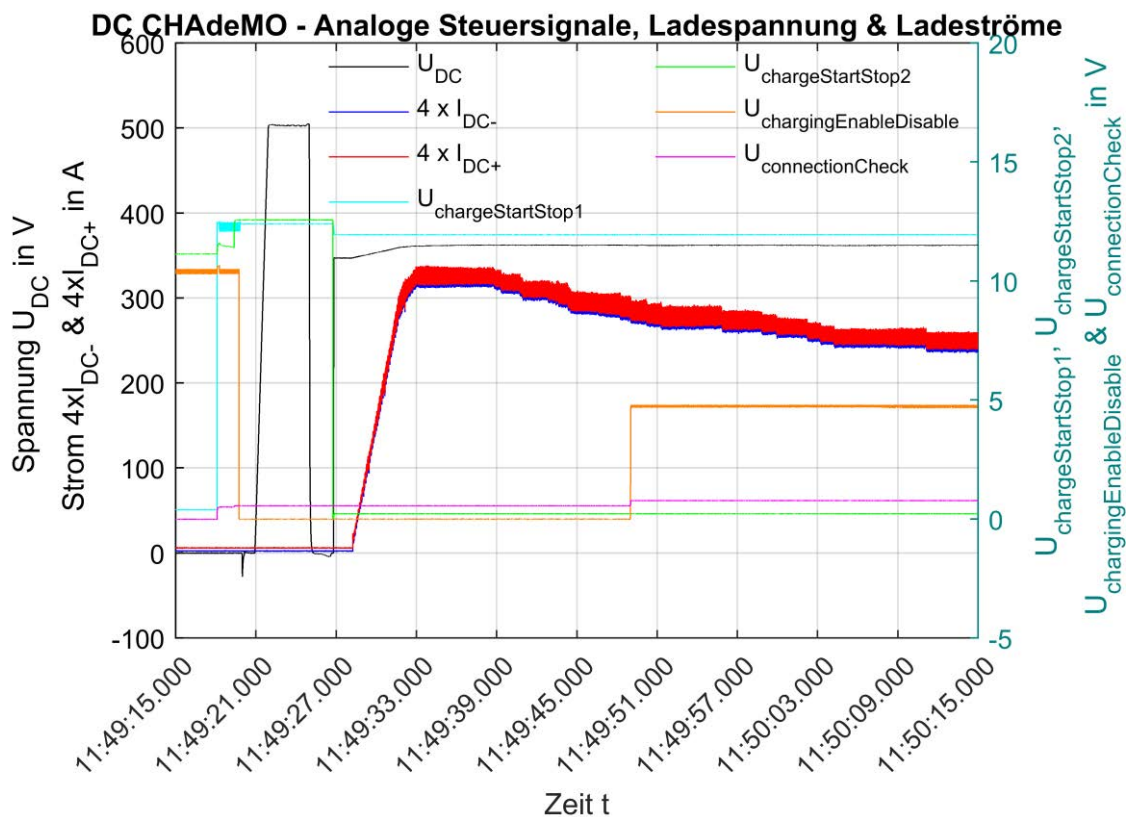


Abbildung 101: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Unterbrechung PE

8.1.2.11 CHAdeMO-Ladevorgang mit 100 k Ω -Erdschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	11:58:00,000	12:00:00,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0002
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt	
11:58:54.455	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt	
NEIN	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Fehlerbeseitigung hh:mm:ss,ttt	Fehlerdauer hh:mm:ss,ttt		
11:59:29.569	00:00:35.114		

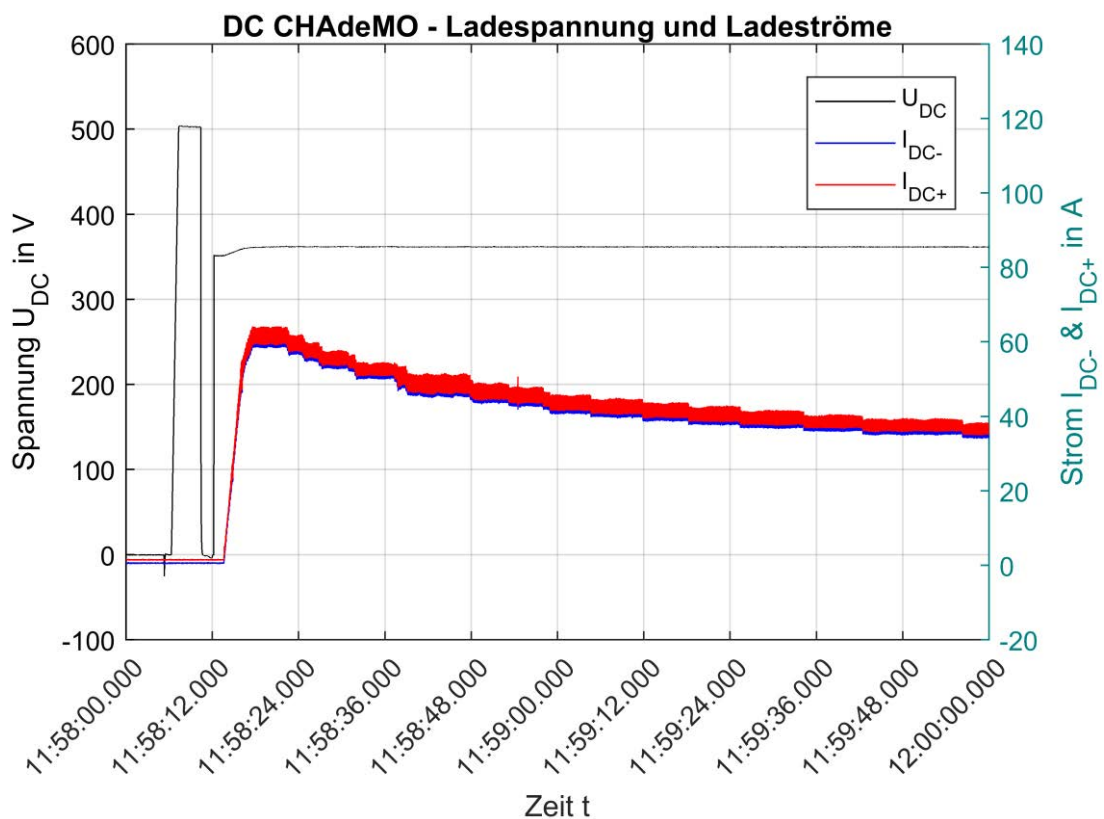
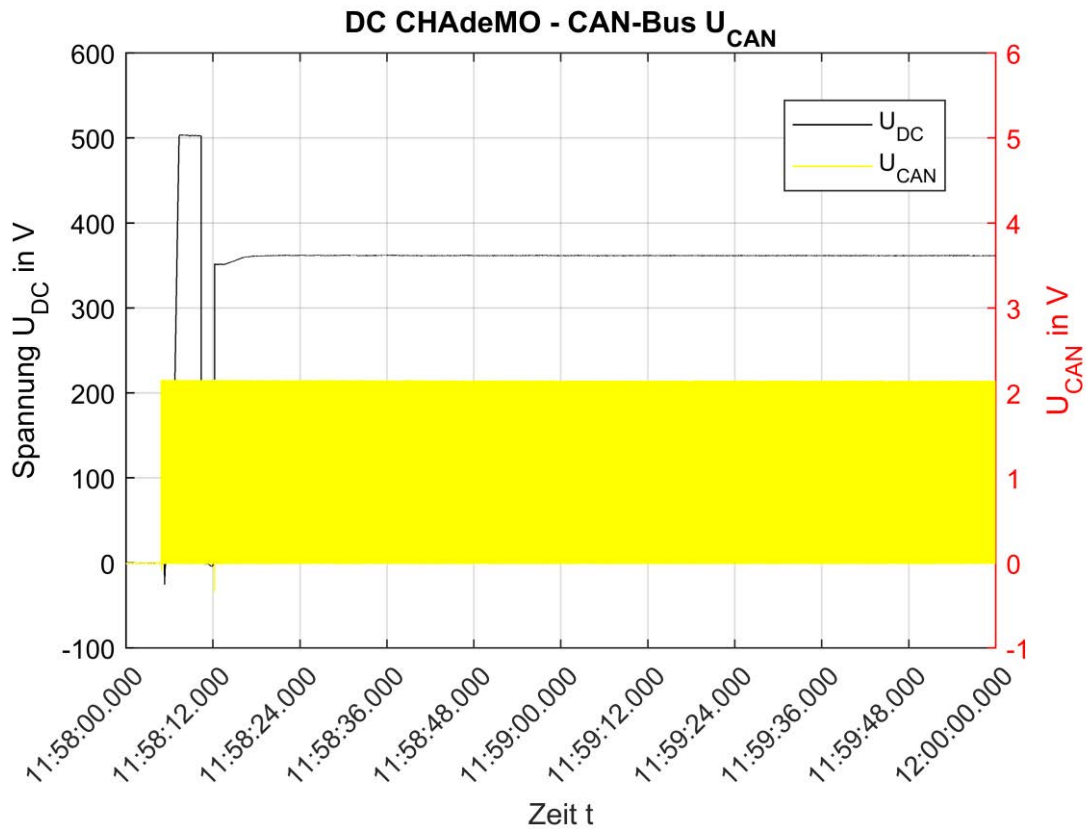
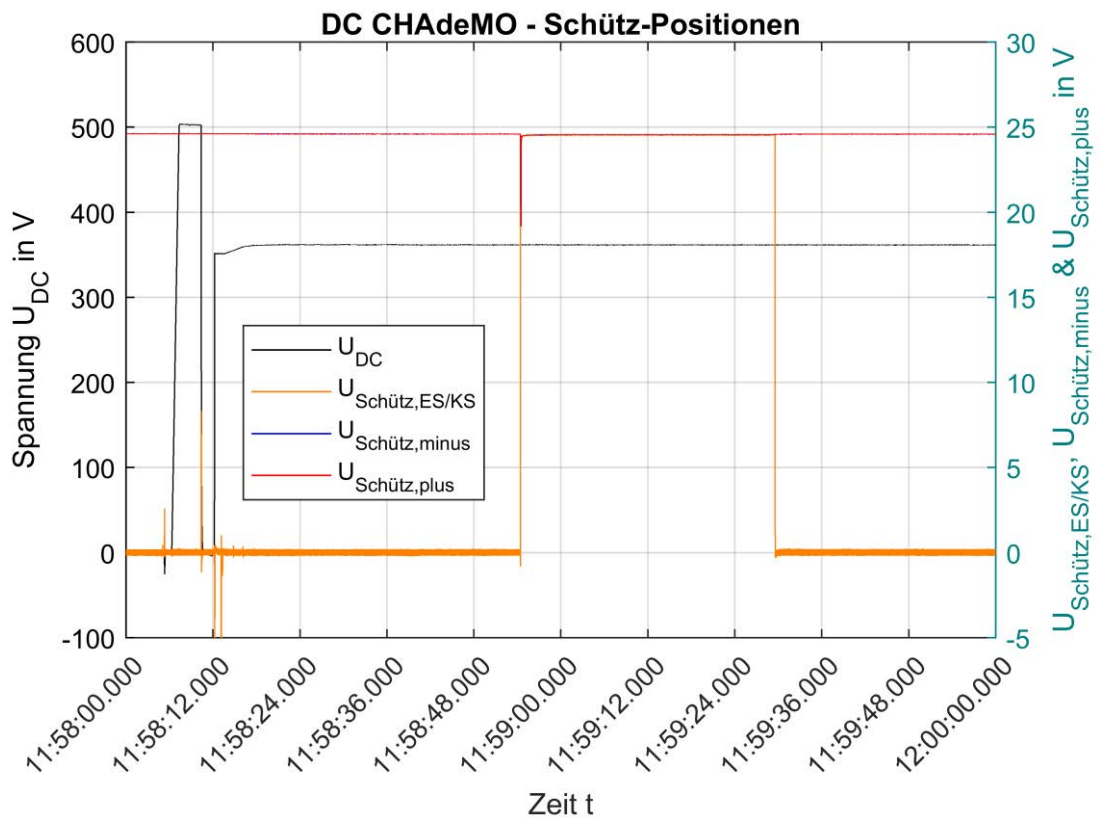


Abbildung 102: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Erdschluss 100 k Ω


 Abbildung 103: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Erdschluss 100 k Ω

 Abbildung 104: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Erdschluss 100 k Ω

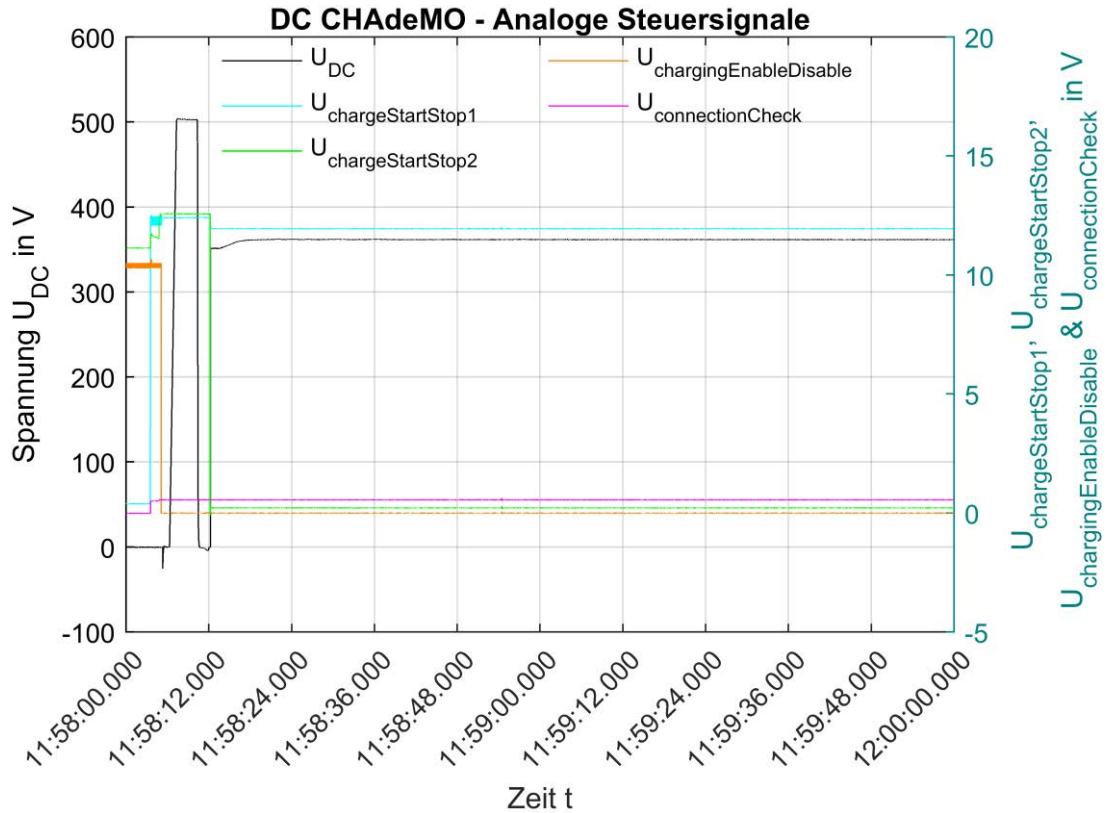


Abbildung 105: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Erdschluss 100 k Ω

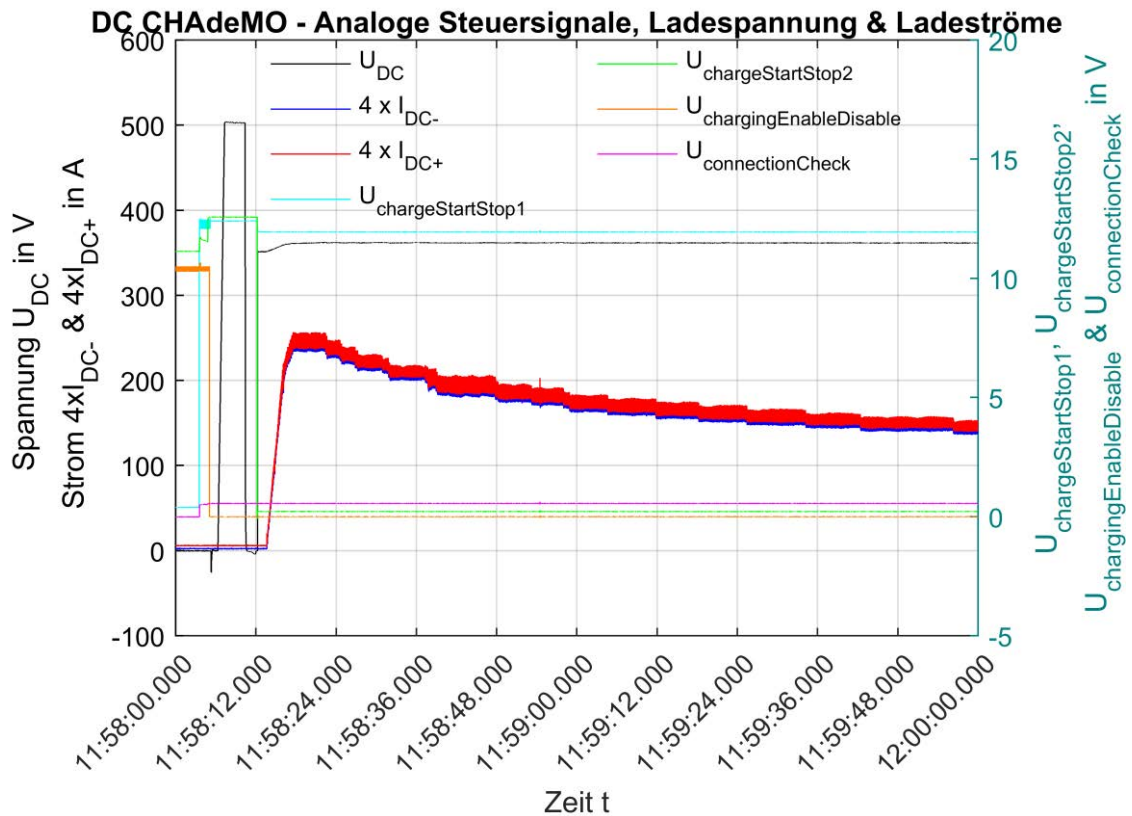


Abbildung 106: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Erdschluss 100 k Ω

8.1.2.12 CHAdeMO-Ladevorgang mit 40 k Ω -Erdschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	12:01:15,000	12:02:00,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0002
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
12:01:35.802		12:01:36.439	12:01:36.683
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
JA		00:00:00.637	00:00:00.881

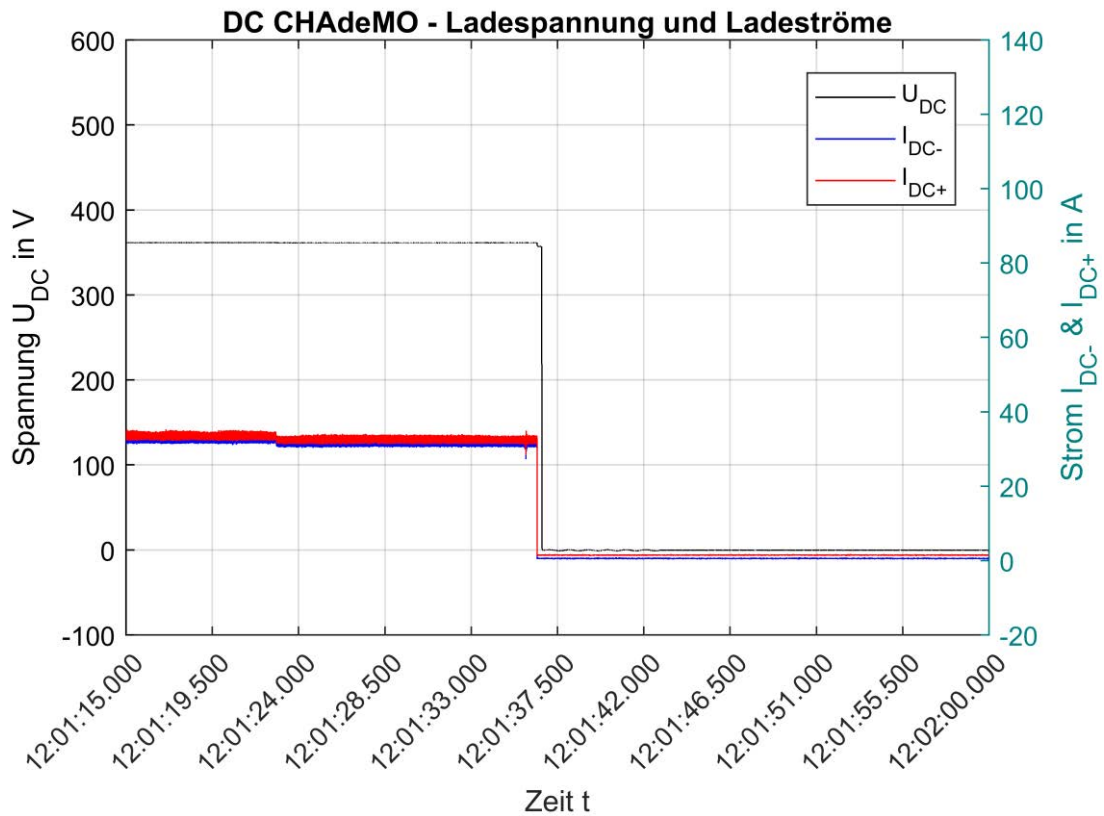
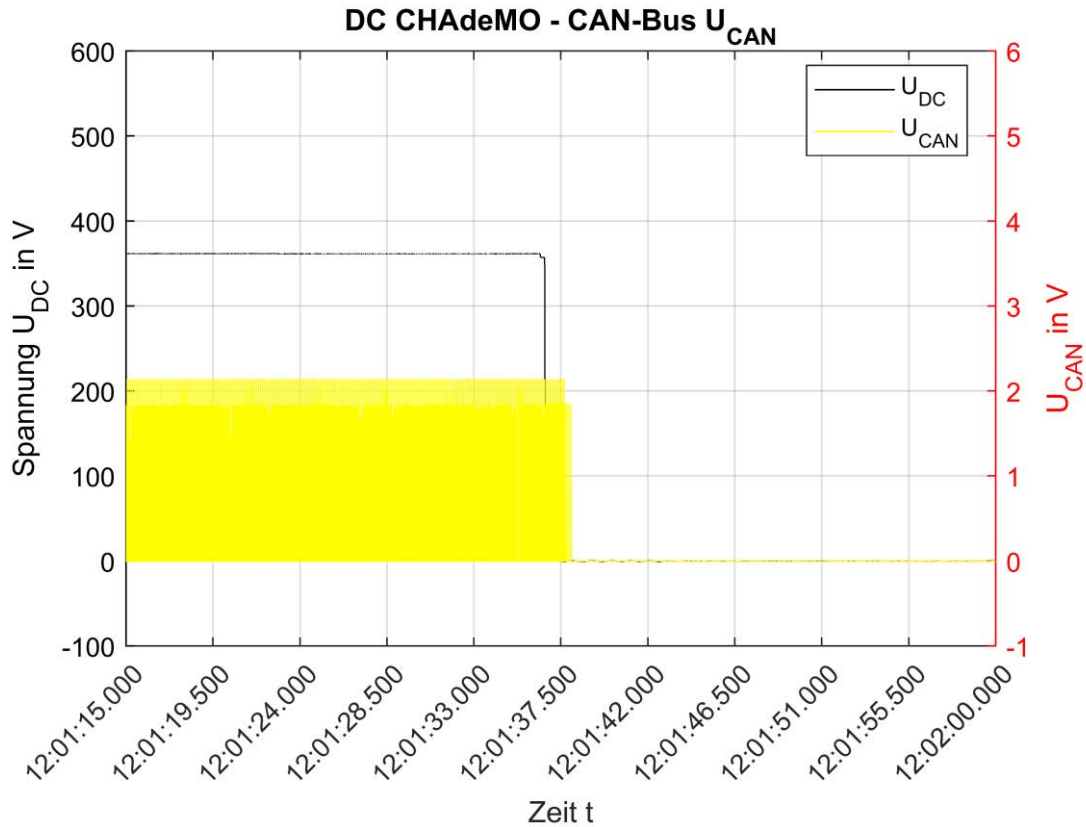
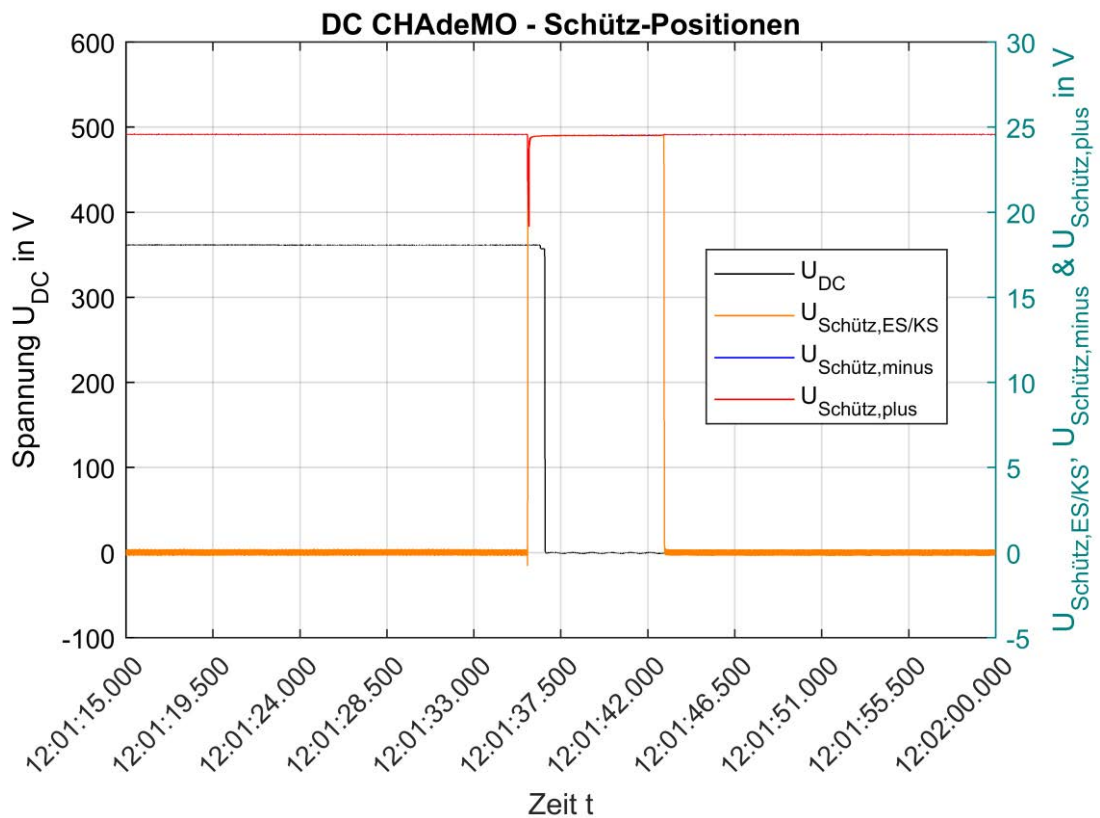
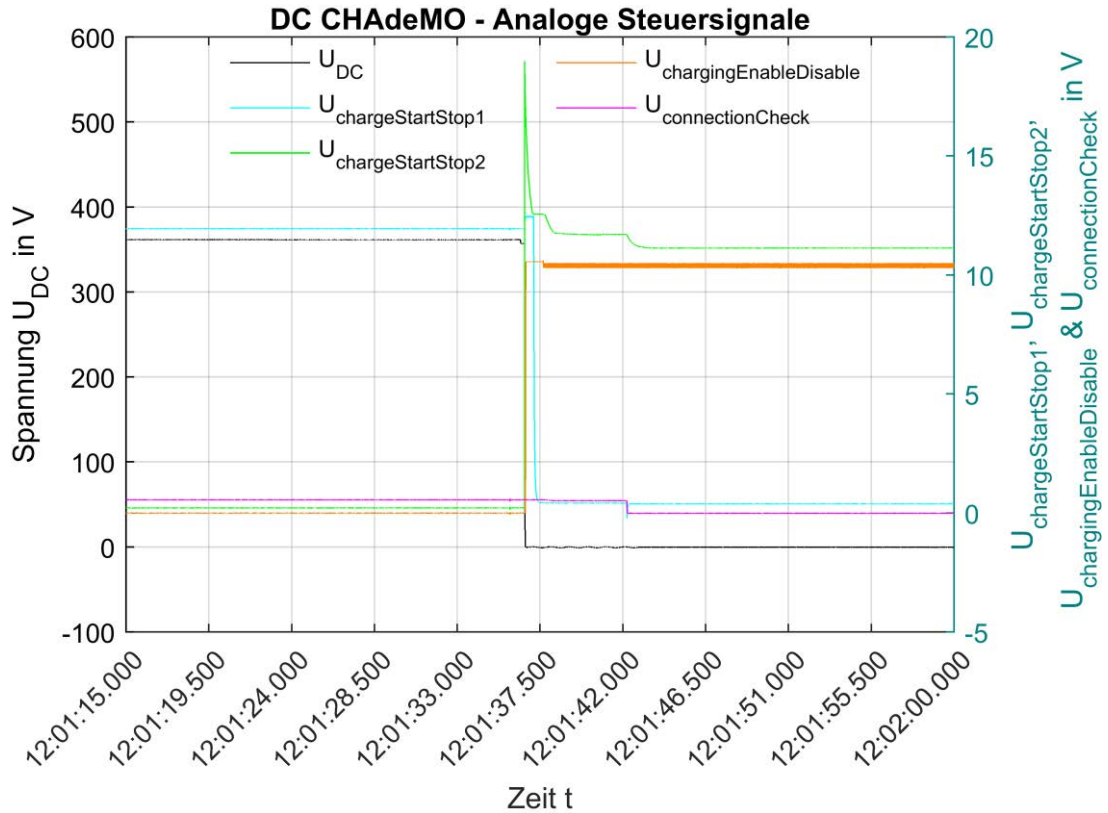
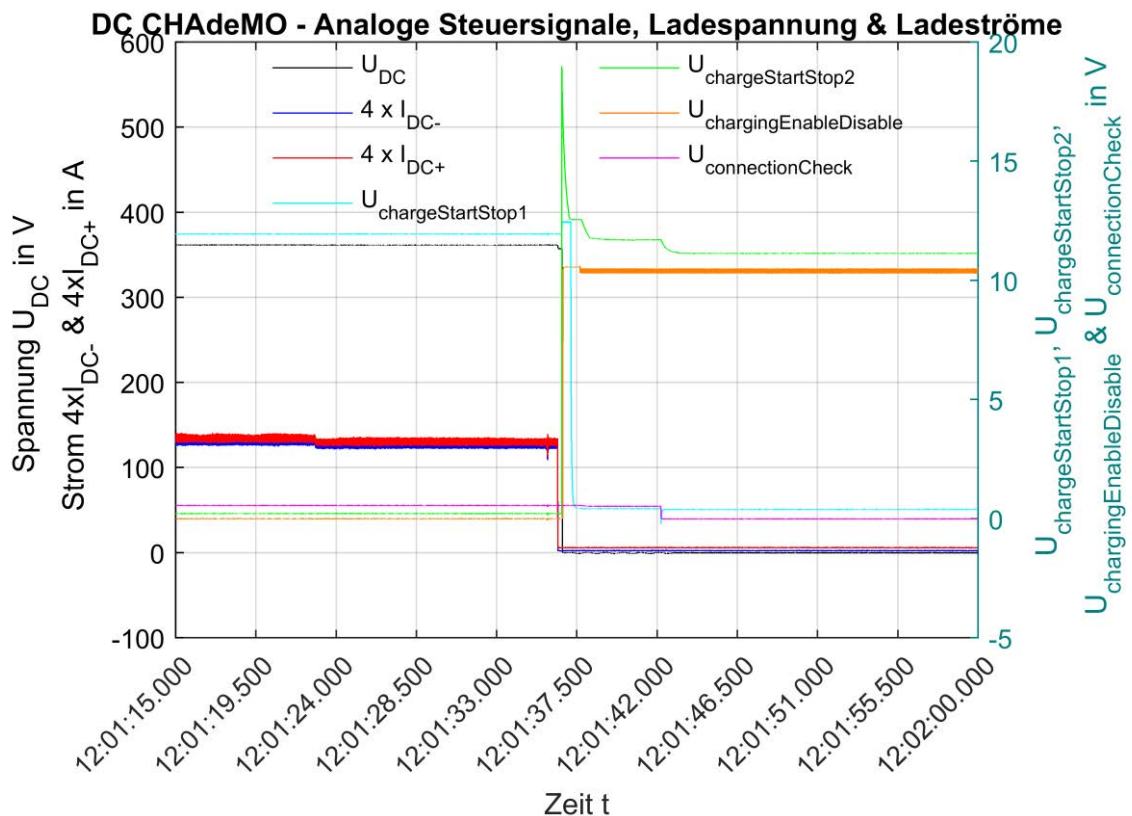


Abbildung 107: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Erdschluss 40 k Ω


 Abbildung 108: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Erdschluss 40 k Ω

 Abbildung 109: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Erdschluss 40 k Ω


 Abbildung 110: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Erdschluss 40 k Ω

 Abbildung 111: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Erdschluss 40 k Ω

8.1.2.13 CHAdeMO-Ladevorgang mit 100 k Ω -Kurzschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	12:52:10,000	12:52:30,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0003
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt		Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt
12:52:14.325		keine Abschaltung	keine Abschaltung
Abschaltung		Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt
NEIN		keine Abschaltung	keine Abschaltung
Fehlerbeseitigung hh:mm:ss,ttt		Fehlerdauer hh:mm:ss,ttt	
12:52:22.095		00:00:07.770	

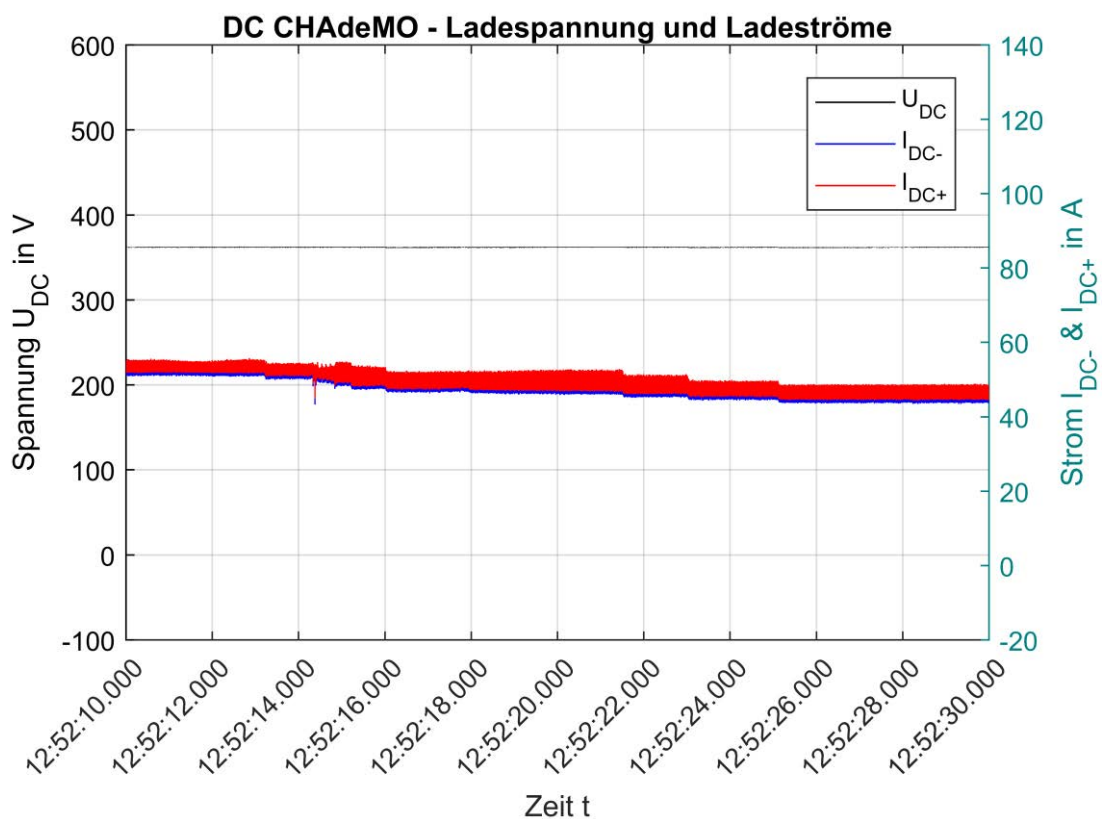
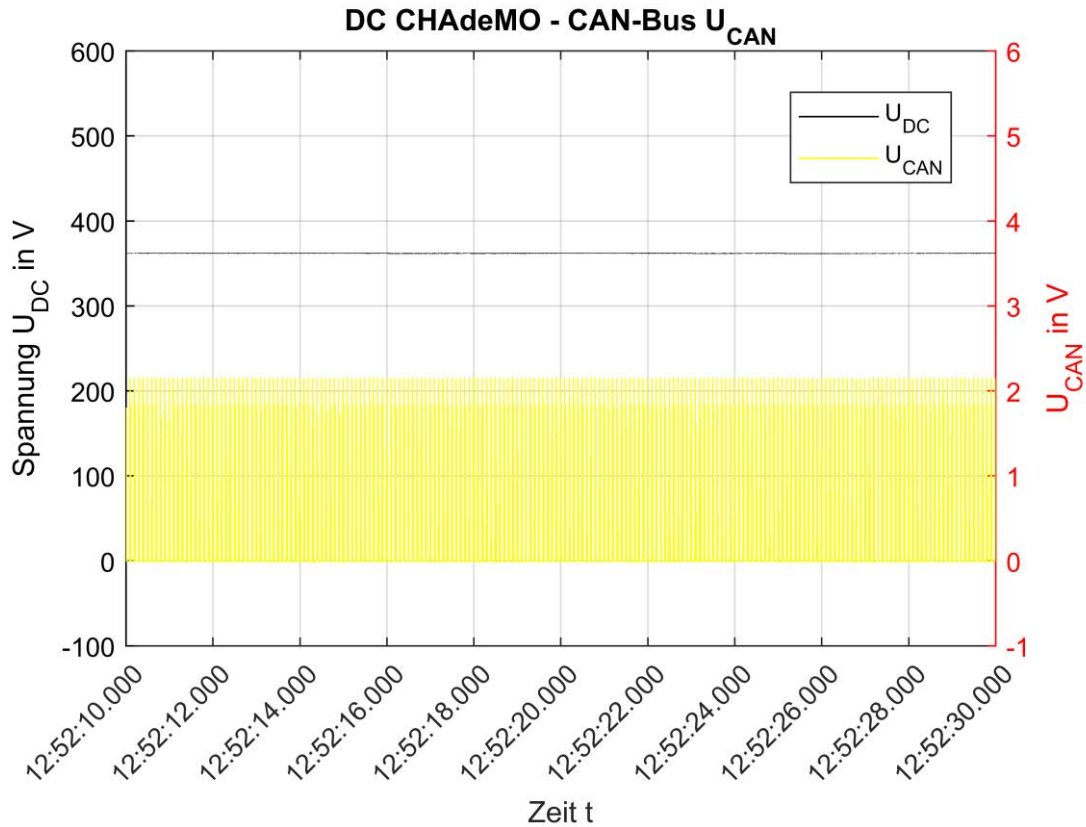
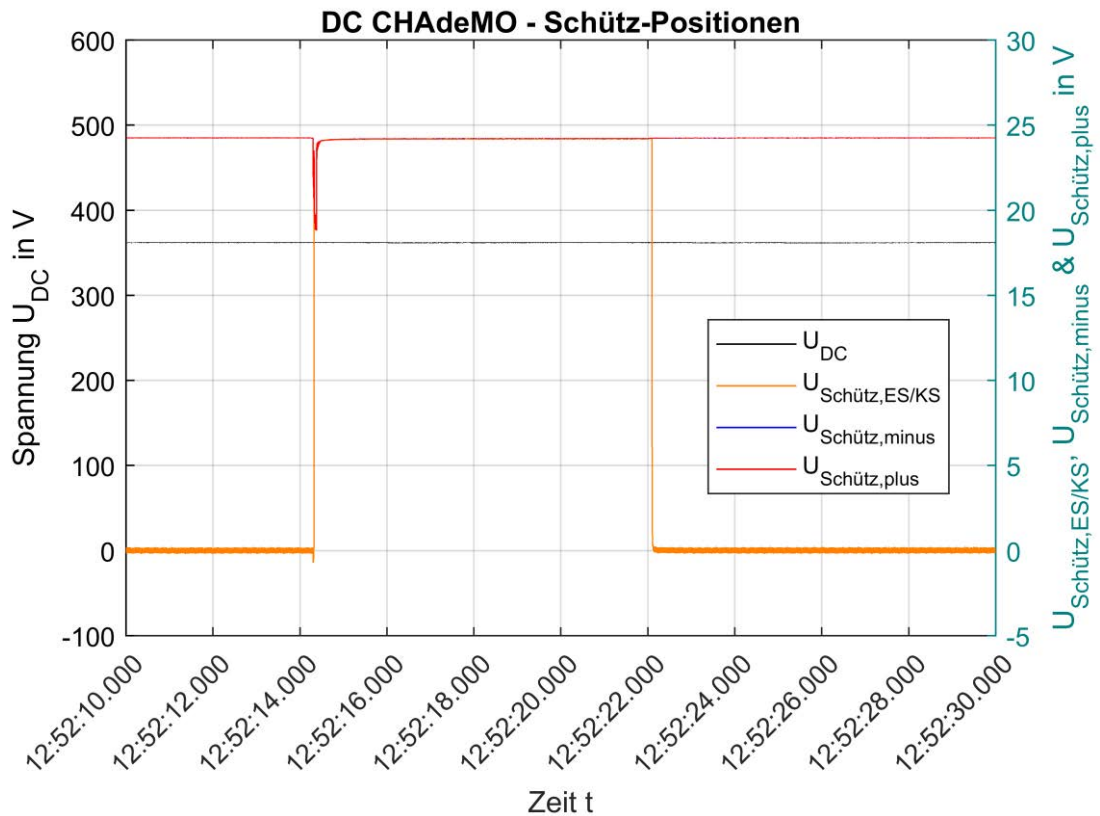
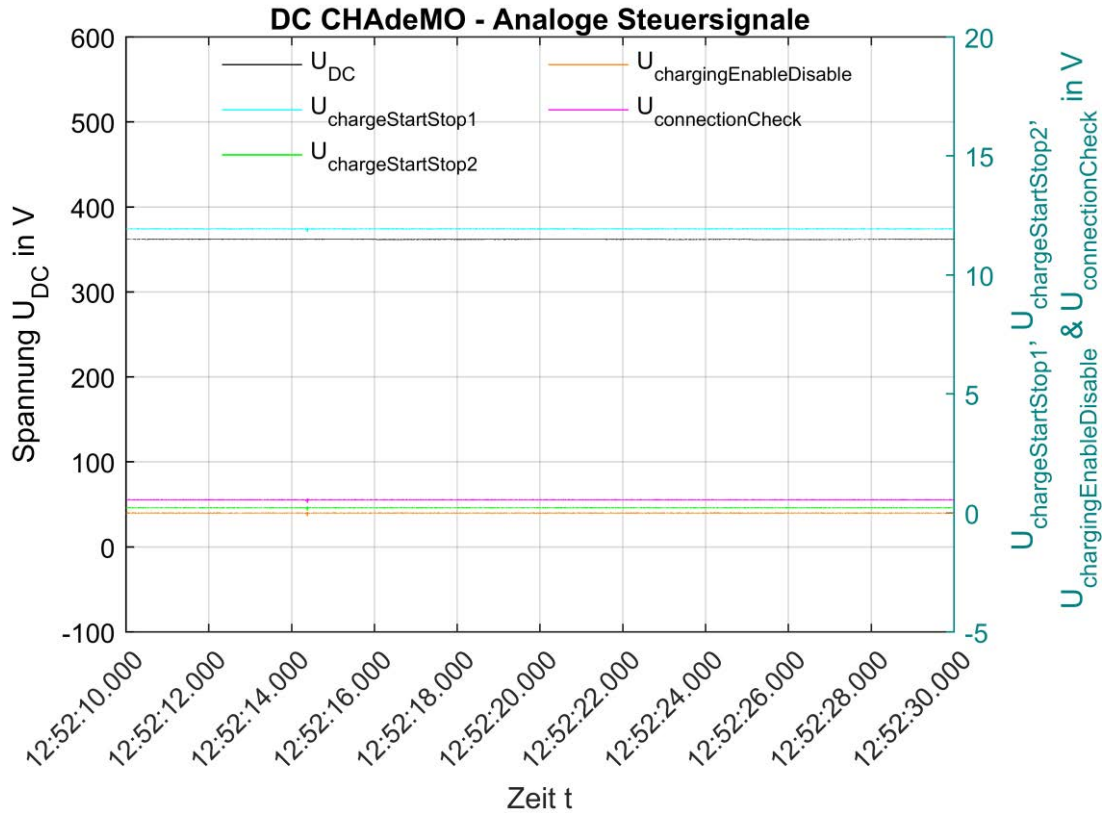
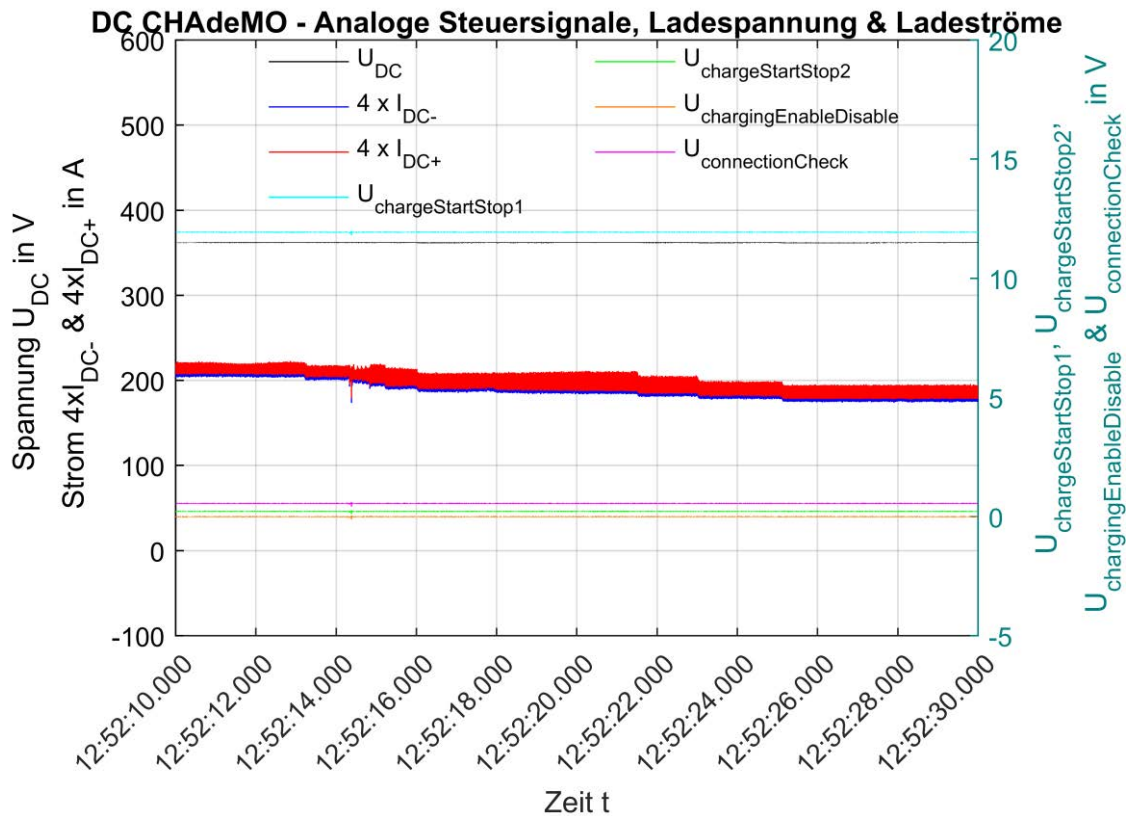


Abbildung 112: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Kurzschluss 100 k Ω


 Abbildung 113: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Kurzschluss 100 k Ω

 Abbildung 114: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Kurzschluss 100 k Ω


 Abbildung 115: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Kurzschluss 100 k Ω

 Abbildung 116: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Kurzschluss 100 k Ω

8.1.2.14 CHAdeMO-Ladevorgang mit 40 k Ω -Kurzschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	12:54:10,000	12:54:20,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0003
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt	
12:54:11.575	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt	
NEIN	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Fehlerbeseitigung hh:mm:ss,ttt	Fehlerdauer hh:mm:ss,ttt		
12:54:15.666	00:00:04.091		

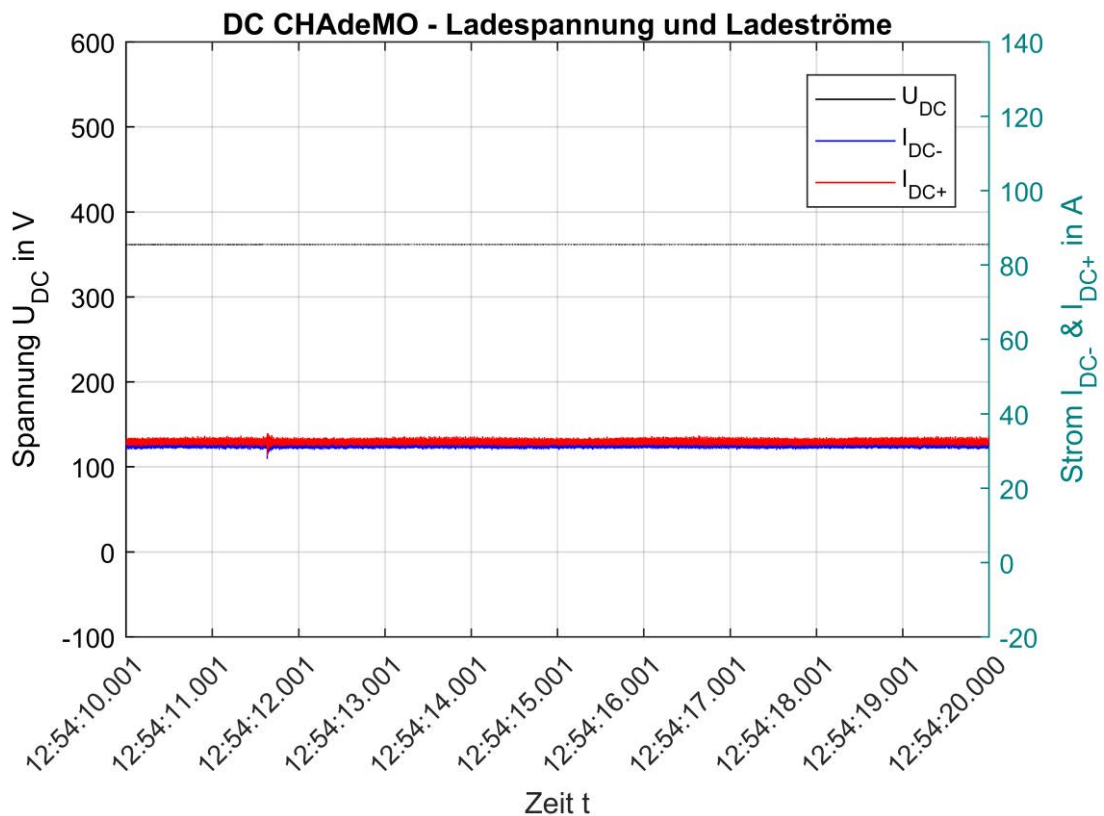


Abbildung 117: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Kurzschluss 40 k Ω

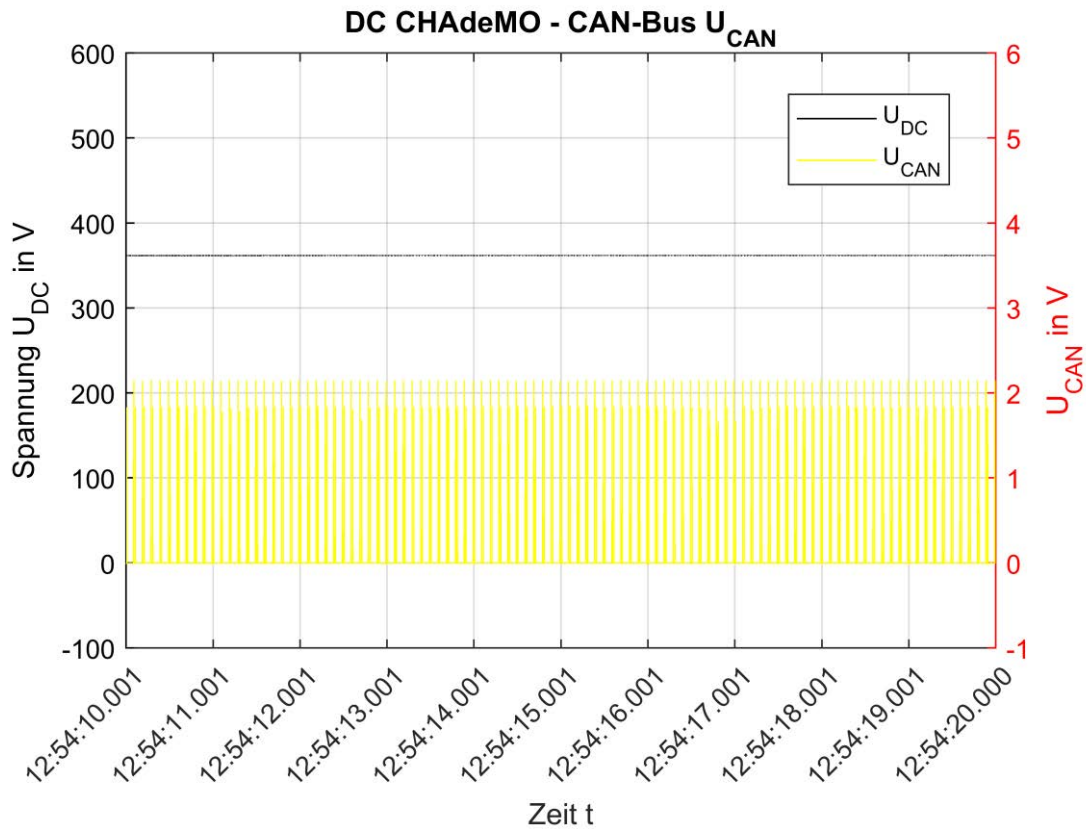


Abbildung 118: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Kurzschluss 40 k Ω

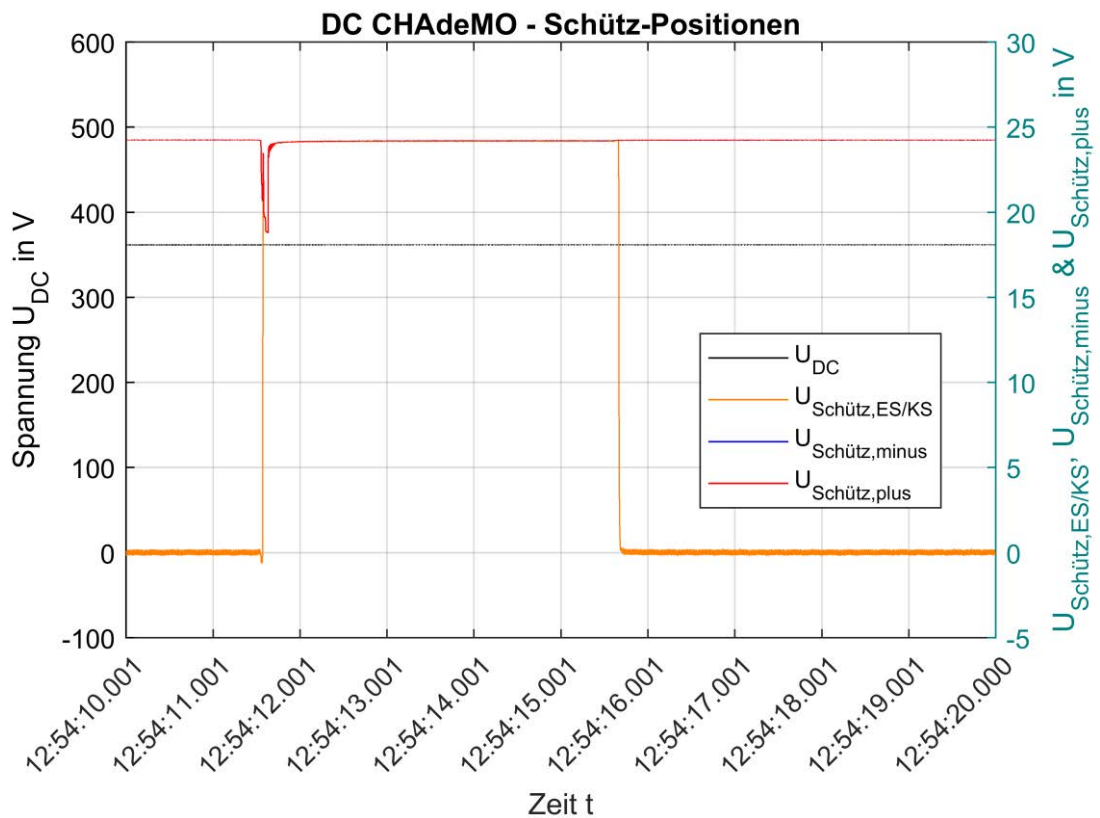


Abbildung 119: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Kurzschluss 40 k Ω

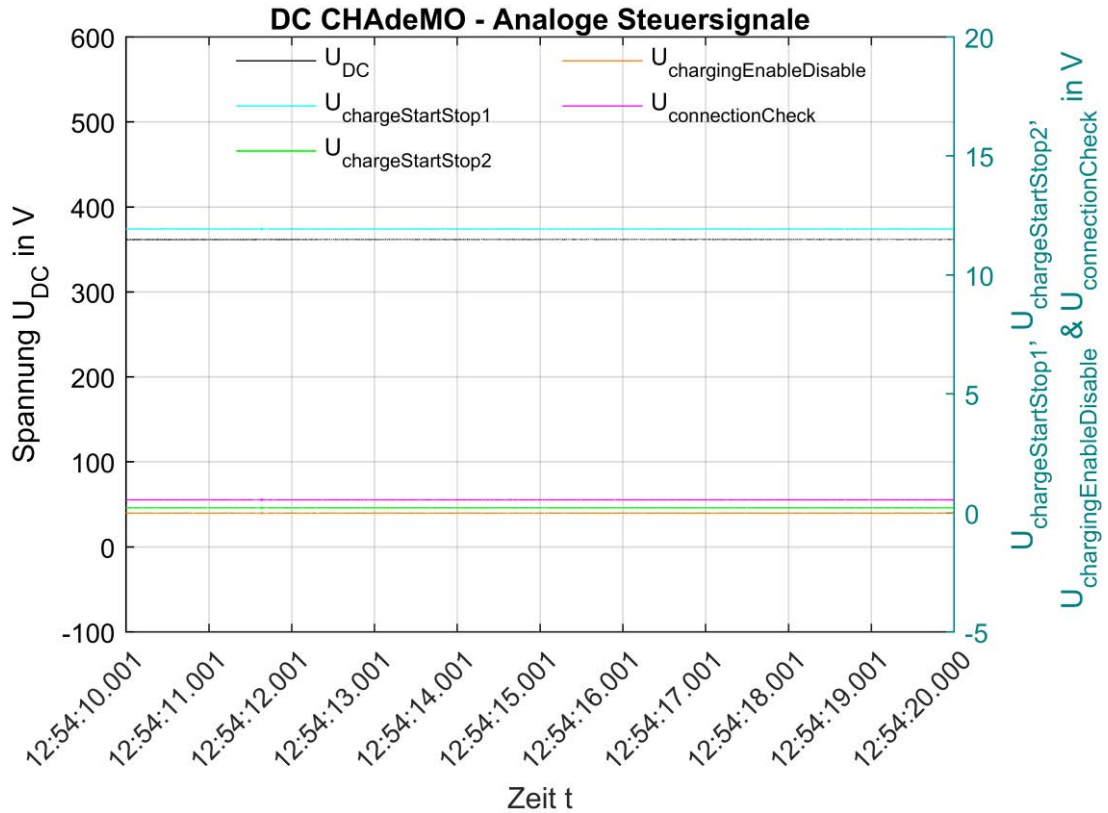


Abbildung 120: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Kurzschluss 40 k Ω

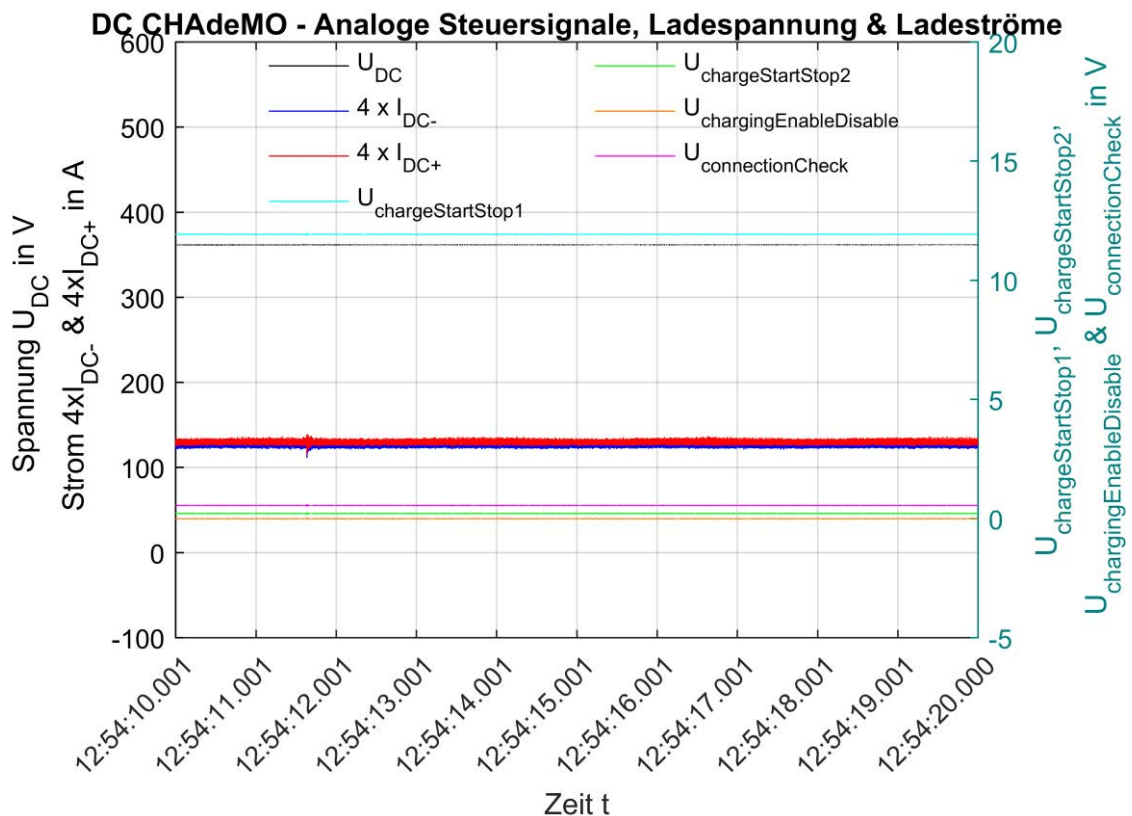


Abbildung 121: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Kurzschluss 40 k Ω

8.1.2.15 CHAdeMO-Ladevorgang mit 1 k Ω -Kurzschluss

Datum TT.MM.JJJJ	Startzeit hh:mm:ss,ttt	Endzeit hh:mm:ss,ttt	DEWTRON- bzw. MATLAB-Datei
07.11.2017	12:55:30,000	12:55:40,000	EVSU_DC_CCSTyp2_2017_11_07_0003
Fehlerzeitpunkt hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeitpunkt Spannung hh:mm:ss,ttt	
12:55:32.322	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Abschaltung	Abschaltzeit Strom hh:mm:ss,ttt	Abschaltzeit Spannung hh:mm:ss,ttt	
NEIN	keine Abschaltung	keine Abschaltung	
Fehlerbeseitigung hh:mm:ss,ttt	Fehlerdauer hh:mm:ss,ttt		
12:55:36.486	00:00:04.164		

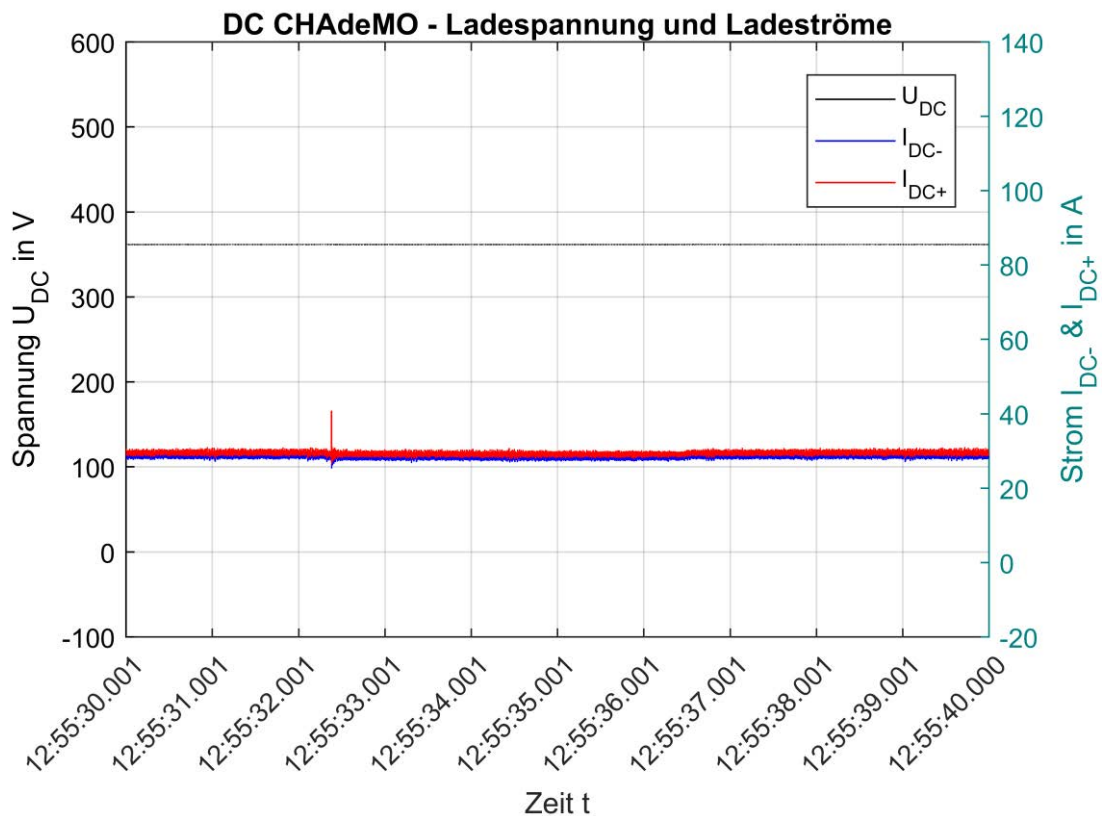


Abbildung 122: CHAdeMO, Ladespannung & Ladeströme, Kurzschluss 1 k Ω

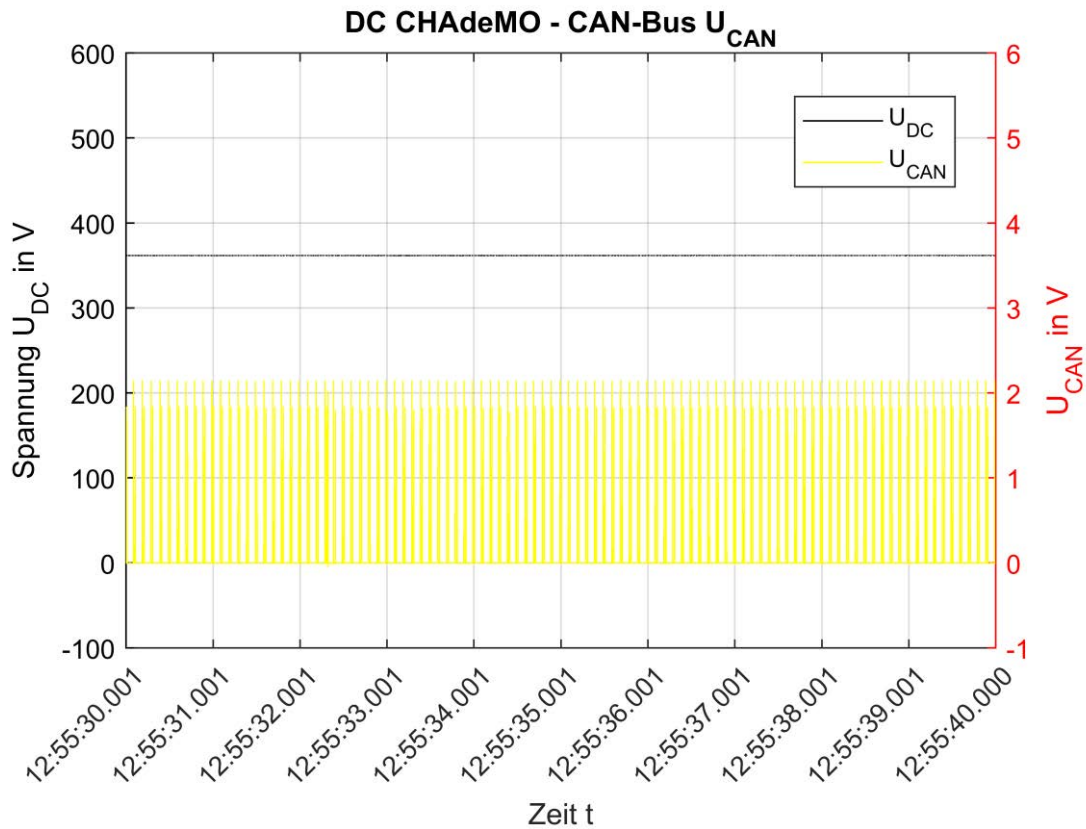


Abbildung 123: CHAdeMO, Ladespannung & CAN-Bus, Kurzschluss 1 k Ω

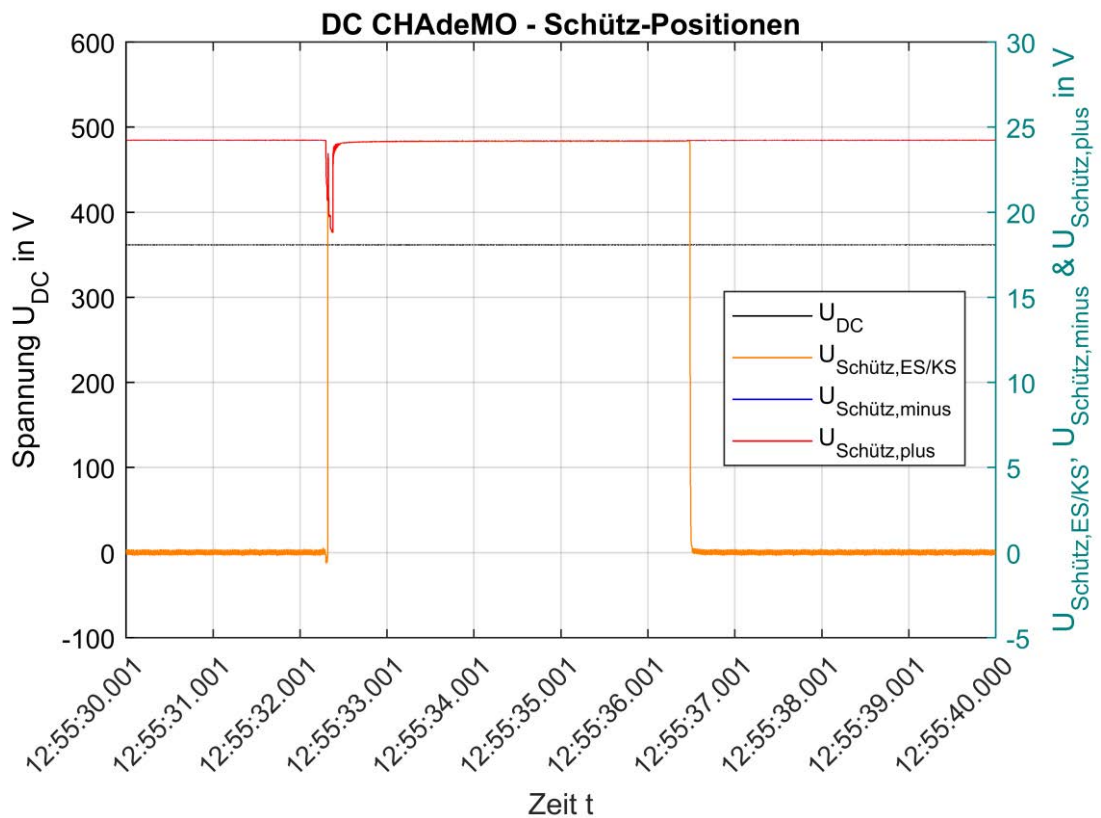
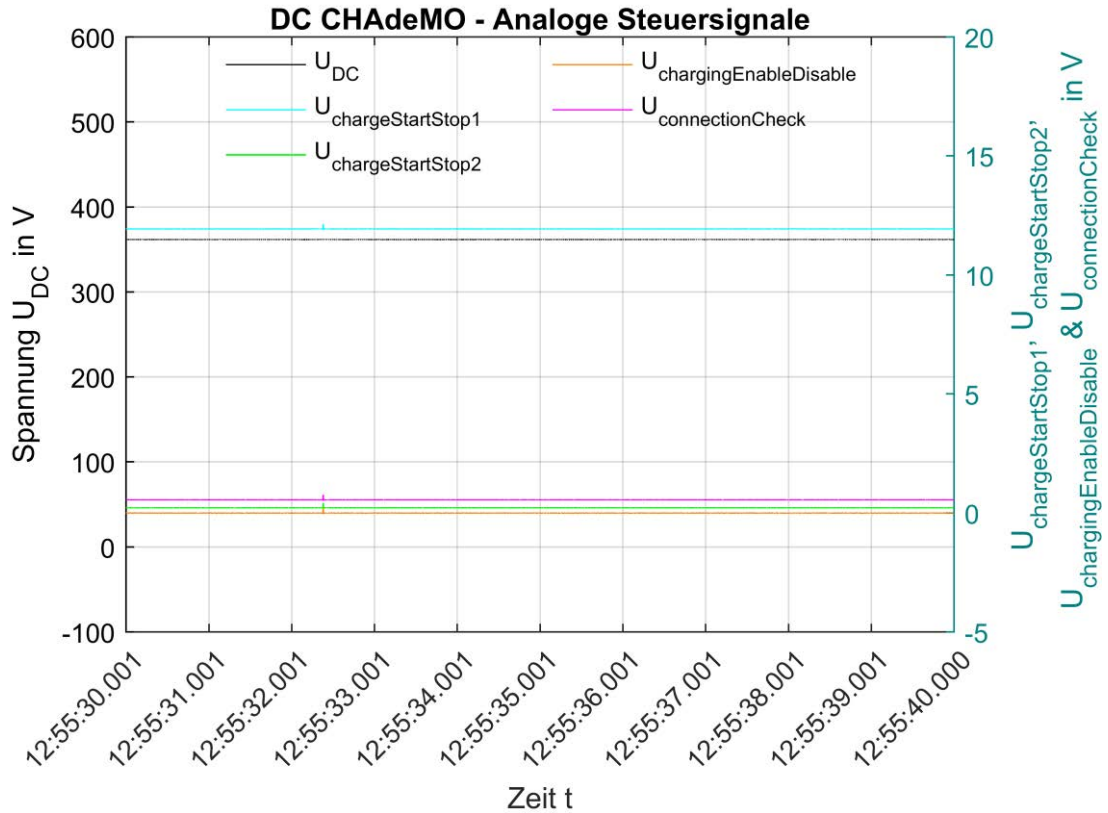
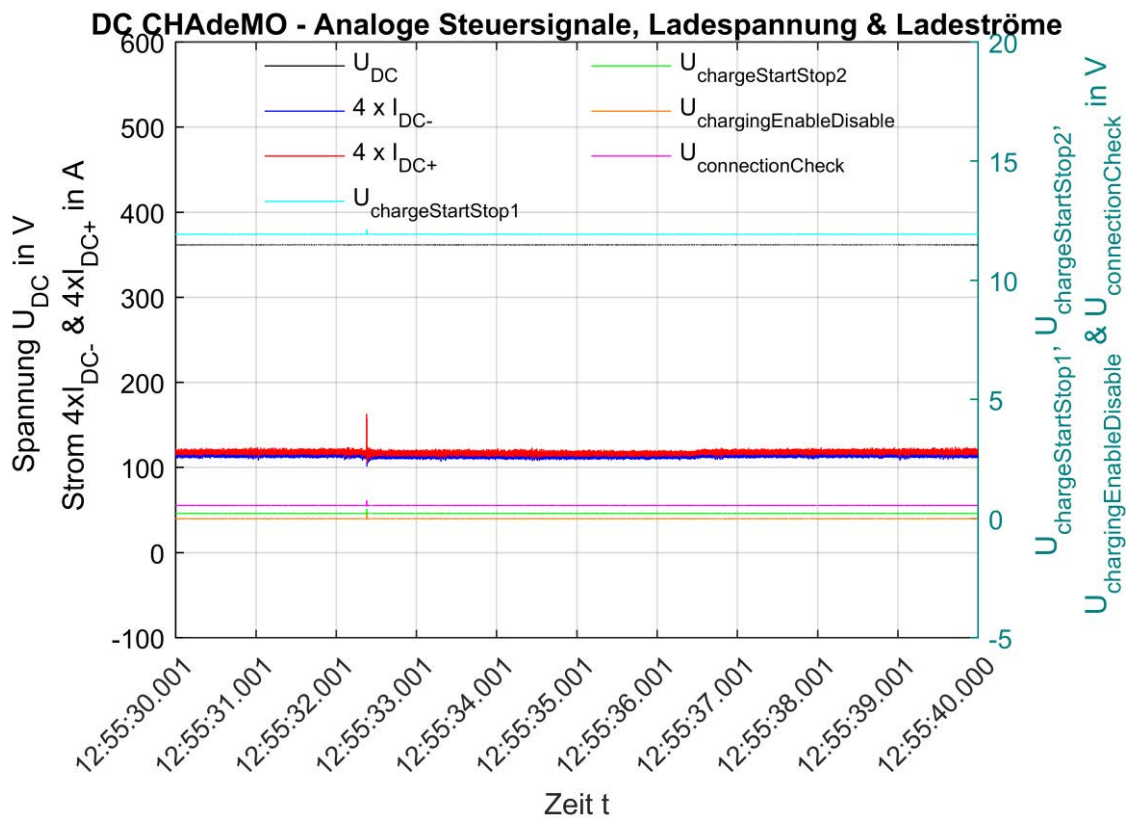


Abbildung 124: CHAdeMO, Ladespannung & Schütz-Positionen, Kurzschluss 1 k Ω


 Abbildung 125: CHAdeMO, Ladespannung & analoge Steuersignale, Kurzschluss 1 k Ω

 Abbildung 126: CHAdeMO, analoge Steuersignale, Ladespannung & Ladeströme, Kurzschluss 1 k Ω