

# Niederfrequente Netzurückwirkungen von Elektrofahrzeugen

Masterarbeit



Ein Unternehmen der  
ENERGIE STEIERMARK

Institut für Elektrische Anlagen  
Technische Universität Graz

Vorgelegt von  
Andreas Sulzenbacher, BSc

Betreuer  
Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Herwig Renner  
Dipl.-Ing. Dr.techn. René Braunstein

Institutsleiter: Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

A - 8010 Graz, Inffeldgasse 18-I  
Telefon: (+43 316) 873 – 7551  
Telefax: (+43 316) 873 – 7553  
<http://www.ifea.tugraz.at>  
<http://www.tugraz.at>

Graz / Juni – 2016



## Danksagung

Im Rahmen meiner Diplomarbeit durfte ich mich mit den Themen Elektrofahrzeuge und Spannungsqualität auseinandersetzen und habe dabei nicht nur technisch viel dazulernen können. Die Arbeit hat mir, auch wenn es öfters mal mühevoll war, sehr viel Spaß gemacht und war besonders durch den praktischen Teil abwechslungsreich und interessant.

Bedanken darf ich mich bei:

Meinen beiden Betreuern: Prof. Renner, für die wissenschaftliche Begleitung der Arbeit, der sich bei diversen Fragestellungen auch immer ausreichend Zeit genommen hat; Bei Dr. Braunstein, für die viele Zeit die er für Miterstellung des Konzepts, Mithilfe bei Messungen, den Anregungen und die Korrekturen aufgewendet hat.

Der Energienetze Steiermark GmbH, welche die Arbeit angeregt und auch entsprechend finanziell sowie personell unterstützt hat. Speziell bei der Abteilung von Dipl.-Ing. Wisiak für die nette Zusammenarbeit.

Bei der Energie Steiermark Mobilitäts GmbH, für die Einblicke in das Thema Elektromobilität sowie die Zurverfügungstellung von Elektrofahrzeugen.

Bei den MitarbeiterInnen des Instituts für Elektrische Anlagen, an welchem ich auch als studentischer Mitarbeiter tätig war, für die nette Atmosphäre und den konstruktiven Ratschlägen für die Diplomarbeit.

Meiner Familie und den Freunden in Tirol, welche mich sowohl mental als auch finanziell immer unterstützt haben und mich trotz der großen Entfernung und den langen Abwesenheiten nie vergessen haben.

Allen StudienkollegInnen und Freunden, die mich während meines Studiums begleitet und unterstützt haben. Hierzu zählen vor allem die Mitglieder des Dynamobauzeichensaals, der Verein zur Förderung der Fleckviehzucht sowie alle meine MitbewohnerInnen, welche ich in meiner Zeit in Graz und Prag hatte. Ich hatte eine unvergessliche Zeit mit euch und hoffe, dass unsere Freundschaften noch lange bestehen bleiben werden.

## **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.

Graz, am 31.05.2015

Andreas Sulzenbacher

## **Kurzfassung**

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Netzurückwirkungen ausgewählter Elektrofahrzeuge am realen Netz messtechnisch zu erfassen. Mittels eines hochauflösenden, mehrkanaligen Datenloggers wird eine mehrwöchige Langzeitmessung mit anschließender Auswertung der Messdaten im Zeit- und Frequenzbereich mit Hilfe einschlägiger Softwarepakete durchgeführt. Aus den erfassten Messdaten sollen typische Ladeverhalten von Elektrofahrzeugen sowie deren Netzurückwirkungen ermittelt werden. Mit den daraus gewonnenen Erkenntnissen lassen sich Auswirkungen auf die Spannungsqualität sowie Mindestkurzschlussleistungen an Verknüpfungspunkten errechnen. Die durchgeführten Messungen zeigen, dass ein Großteil der untersuchten Elektrofahrzeuge einphasig lädt mit weniger als 16 A, meist handelt es sich um kapazitive Verbraucher wobei der Verschiebungsfaktor annähernd 1 ist. Einzelne untersuchte EV fallen bei den Messungen durch hohe einphasige Ladung, einer hohen Blindleistungsabgabe, starke Leistungsschwankungen sowie durch Überschreitungen der Grenzwerte bei Oberschwingungsströmen auf. Aus diesen Gründen kommt man bei der Berechnung von Mindestkurzschlussleistungen auf relative hohe Werte. Um diese zu minimieren, müssen von Seiten der Automobilindustrie effizientere, dreiphasige Ladegeräte in den EV verbaut werden.

Schlüsselwörter: Elektrofahrzeuge, EF, Netzurückwirkungen, Oberschwingungen, Oberschwingungsströme, Ladeverhalten, Ladekurven, Spannungsqualität, Flicker, Spannungsschwankungen, Ladestationen

## **Abstract**

The aim of the thesis is to measure retroactive effects of selected electric vehicles on the grid in a real environment. Long-term high-resolution measurements over several weeks are taken, using a multichannel data logger. Well established software is used to analyze the data in frequency and time domain. Typical charging patterns and their adverse effects on the grid should be investigated. The derived information can be used to assess the effects on power quality and to calculate the minimal needed short-circuit power at the point of common coupling. The results show, that the majority of single-phase electric vehicles charge with less than 16 A and a slightly leading power factor close to unity. Several electric vehicles account for high single-phase loads, high reactive power consumption, large power fluctuations and violation of permissible harmonic current limits. Therefore, the calculation of the minimal needed short-circuit power at the point of common coupling yields to relatively high values. In order to minimize the needed short-circuit power, automotive industry needs to replace the single-phase with three-phase chargers.

Keywords: Electric Vehicle, EV, Power Quality, Current Harmonics, Emissions of Harmonics, Flicker, Unbalancing, Charging Station, Charging Curve

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>5</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>7</b>
<b>1 Kurzfassung .....</b>	<b>9</b>
1.1 Ziel .....	9
1.2 Methode .....	9
1.3 Ergebnisse .....	9
1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick .....	9
<b>2 Einleitung .....</b>	<b>10</b>
2.1 Aufgabenstellung.....	10
<b>3 Relevante Normen hinsichtlich Netzurückwirkungen .....</b>	<b>12</b>
<b>4 Ladevorgang .....</b>	<b>19</b>
4.1 Ladebetriebsarten.....	19
4.2 Ladestecker .....	22
4.3 Ladekabel.....	24
4.4 Ladestationen .....	25
4.5 Ladestrom und -spannung .....	27
<b>5 Messungen .....</b>	<b>30</b>
5.1 Messkonzept .....	30
5.2 Messgerät und Zubehör.....	31
5.2.1 Messgerät.....	31
5.2.2 Messsoftware .....	32
5.2.3 Strommesszangen.....	35
5.3 Durchführung der Messungen .....	38
5.3.1 Fahrzeugflotte.....	38
5.3.2 Messplätze .....	38
5.3.3 Langzeitmessung .....	40
5.3.4 Einzelmessungen .....	40

<b>6</b>	<b>Messergebnisse .....</b>	<b>41</b>
6.1	Ladeverläufe.....	41
6.2	Leistungen.....	43
6.3	Oberschwingungsströme .....	46
6.3.1	Übersicht Oberschwingungsströme .....	50
6.3.2	Oberschwingungsspannungen .....	51
6.3.3	Unterschiede in den Außenleitern 3-phasig ladender EV .....	54
6.3.4	Vergleich mit Grenzwerten aus Normen .....	54
6.3.5	Verhalten bei ähnlichen Ladeströmen.....	56
6.3.6	Verhalten bei unterschiedlichen Ladeströmen .....	58
6.3.7	Kompensationseffekte .....	59
6.4	Vergleich mit bestehender Studien .....	61
<b>7</b>	<b>Netzbetrachtungen .....</b>	<b>64</b>
7.1	Oberschwingungsspannungen .....	66
7.1.1	EV mit einem Eingangsstrom $\leq 16$ A je Leiter .....	66
7.1.2	EV mit einem Eingangsstrom $>16$ A und $\leq 32$ A je Leiter .....	69
7.2	Spannungsänderungen .....	72
7.2.1	Langfristige Spannungsänderungen .....	75
7.2.2	Kurzfristige Spannungsänderungen .....	77
7.3	Spannungsunsymmetrie .....	80
7.4	Kurzschlussleistungen .....	81
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>83</b>
8.1	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....	83
8.2	Ausblick .....	85
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>86</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>90</b>
10.1	Formeln .....	94
10.2	Elektrofahrzeuge .....	95

## Abkürzungsverzeichnis

$\varphi$	Phasenwinkel
$\psi$	Netzwinkel
$\omega$	Kreisfrequenz
<i>abs</i>	Absolutwert (Betrag)
AC	Alternating Current / Wechselstrom
<i>arg</i>	Argument (Winkel)
CC	Constant Current / Konstantstrom
CCS	Combined Charging System / kombiniertes Ladesystem
CHAdeMO	CHArge de Move
CV	Constant Voltage / Konstantspannung
CP	Control Pilot / Pilotsteuerung
<i>cos<math>\varphi</math></i>	Verschiebungsfaktor
<i>d</i>	relative Spannungsänderung
DC	Direct Current / Gleichstrom
EU	Europäische Union
EV	Electric Vehicle / Elektrofahrzeug (wird auch für Hybridfahrzeuge verwendet)
EVSE	Electric Vehicle Supply Equipment / Stromversorgungseinrichtung für das Elektrofahrzeug
<i>f</i>	Frequenz
<i>F</i>	Formfaktor
FFT	Fast Fourier Transformation / Schnelle Fourier-Transformation
<i>I</i>	Strom
<i>I<sub>ref</sub></i>	Bemessungsstrom (mittlerer effektiver Eingangsstrom des Geräts während der Beobachtungsdauer)
ICCB	In Cable Control Box / In-Kabel Kontrollbox
<i>k</i>	Unsymmetriegrad
<i>k<sub>p</sub></i>	Gleichphasigkeitsfaktor
KS	Kurzschluss
L	Außenleiter
<i>n</i>	Anzahl
OS	Oberschwingung
<i>P</i>	Wirkleistung
<i>P<sub>lt</sub></i>	Langzeitflicker
<i>P<sub>st</sub></i>	Kurzzeitflicker
PP	Proximity Pilot / Annäherungserkennung
PQ	Power Quality / Spannungsqualität

<i>PWHC</i>	Partial Weighted Harmonic Current / gewichteter Oberschwingungs-Teilstrom
<i>PWM</i>	Puls Weiten Modulation
<i>Q</i>	Verschiebungsblindleistung
<i>r</i>	Wiederholrate
<i>R</i>	Wirkwiderstand
<i>R<sub>sce</sub></i>	Kurzschlussleistungsverhältnis
<i>RCD</i>	Residual Current Device / Fehlerstrom-Schutzschalter
<i>S</i>	Scheinleistung
<i>SOC</i>	State of Charge / Ladezustand
<i>t</i>	Zeit
<i>THC</i>	Total Harmonic Current / gesamter Oberschwingungsstrom
<i>THD</i>	Total Harmonic Distortion / Oberschwingungs Gesamtverzerrung
<i>U</i>	Spannung
<i>U<sub>n</sub></i>	Nennspannung: 230 V für einphasige Geräte / 400 V für mehrphasige Geräte
<i>X</i>	Blindwiderstand
<i>Z</i>	Impedanz

### Indizes

<i>v</i>	Ordnungszahl der Oberschwingung
<i>A</i>	Gerät oder Anlage
<i>ber</i>	Berechnet
<i>c</i>	Konstant
<i>cap</i>	kapazitiv
<i>eff</i>	Effektiv
<i>gem</i>	Gemessen
<i>i</i>	Strom
<i>k</i>	Kurzschluss
<i>LL</i>	Leerlauf
<i>n</i>	Nenn
<i>max</i>	Maximum
<i>ref</i>	Referenz
<i>u</i>	Spannung
<i>V</i>	Verknüpfungspunkt
<i>verk</i>	Verkettet

Eine mathematische Definition der wichtigsten Größen erfolgt bei den Berechnungsbeispielen (Kapitel 7) oder findet sich im Anhang (Kapitel 10.1).



# 1 Kurzfassung

## 1.1 Ziel

Ziel dieser Masterarbeit ist es, die Netzrückwirkungen ausgewählter Elektrofahrzeuge aus dem Fuhrpark der Energie Steiermark messtechnisch zu erfassen. Aus den erfassten Messdaten sollen typische Ladeverhalten (Ladekurven und Leistungsverläufe) von Elektrofahrzeugen sowie deren Netzrückwirkungen (Oberschwingungsströme, Flicker und Unsymmetrie) ermittelt werden. Mittels den daraus gewonnen Erkenntnissen lassen sich Auswirkungen auf die Spannungsqualität im Niederspannungsnetz während des Ladevorgangs sowie Mindestkurzschlussleistungen an Verknüpfungspunkten errechnen.

## 1.2 Methode

Mittels eines 16 kanaligen Datenlogger erfolgt eine mehrwöchige Langzeitmessung, bei welcher der Ladevorgang von EV am realen Netz aufgezeichnet wird. Die Messdaten werden dabei mit einer Abtastrate von 5 kHz aufgezeichnet um bis zur 23. Oberschwingung analysiert werden zu können. Bereits im Datenlogger erfolgt mittels FFT eine Überführung relevanter Messdaten in den Frequenzbereich. Die weitere Auswertung und Analyse der Daten wird im Zeit- und Frequenzbereich mit Hilfe von Softwarepaketen wie DEWESoft, Matlab und NEPLAN durchgeführt.

## 1.3 Ergebnisse

Ein Großteil der untersuchten Elektrofahrzeuge lädt einphasig mit weniger als 16 A, zumeist handelt es sich um ohmsche oder ohmsch-kapazitive Verbraucher wobei der Verschiebungsfaktor annähernd 1 ist. Obwohl die EV einen vermeintlich niedrigen  $THD_i$  ( $< 12\%$ ) haben, kommt es bei 50 % der untersuchten Fahrzeuge zu teilweise großen Grenzwertüberschreitungen (EN 61000-3-2 bzw. 3-12) bei einzelnen Stromharmonischen. Einzelne EV fallen durch hohe einphasige Ladung, eine hohe Blindleistungsabgabe sowie starke Leistungsschwankungen auf. Aus diesen Gründen kommt man bei der Berechnung von Mindestkurzschlussleistungen auf relative hohe Werte von über 1200 kVA.

## 1.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Um die hohen benötigten Kurzschlussleistungen und die dafür benötigten Netzausbaukosten zu minimieren, müssen von Seiten der Automobilindustrie netzfreundlichere, dreiphasige Ladegeräte in den EV verbaut werden. Aus normativer Sicht gilt es noch speziell auf EV abgestimmte Vorgaben und Änderungen der entsprechenden Normen zu definieren. In dieser Arbeit wurden keine Netzrückwirkungen von Schnellladestationen behandelt. Bei diesen ist zwar auf Grund der hohen Anschlussleistung und einem damit verbundenen transformatornahen Anschluss mit eher geringen Auswirkungen auf die Spannungsqualität zu rechnen, es sollten dennoch entsprechende Messungen durchgeführt werden.

## 2 Einleitung

### 2.1 Aufgabenstellung

Elektromobilität ist weltweit ein Zukunftsthema, und spielt auch in Österreich eine immer wichtiger werdendere Rolle. Nicht nur wirtschaftlich und technisch sondern auch im Hinblick zur Erreichung der EU-2030-Ziele oder der Vereinbarungen der UN Klimakonferenz in Paris 2015. So hat sich etwa die Europäische Kommission die Halbierung der Nutzung „mit konventionellem Kraftstoff betriebener PKW“ im Stadtverkehr bis 2030 sowie dem vollständigen Verzicht solcher Fahrzeuge in Städten bis 2050 zum Ziel gesetzt [1].

Auf politischer Ebene wird der Übergang zur Elektromobilität mit dem „Umsetzungsplan - Elektromobilität in und aus Österreich“ vorangetrieben: „Mit dem gezielten Ausbau der Elektromobilität in Österreich wollen wir wichtige Bausteine liefern, um unser Mobilitäts- und Verkehrssystem nachhaltiger, umweltfreundlicher und effizienter zu gestalten. Durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien und die höhere Energieeffizienz kann Elektromobilität sowohl einen wichtigen Beitrag zum Umwelt- und Klimaschutz leisten als auch zur Reduzierung unserer Abhängigkeit von Importen fossiler Energieträger beitragen“ [2].

In Abbildung 2.1 findet sich der KFZ-Bestand von Elektrofahrzeugen in Österreich, dabei wurde zwischen reinen Elektrofahrzeugen und Hybridmodellen unterschieden.

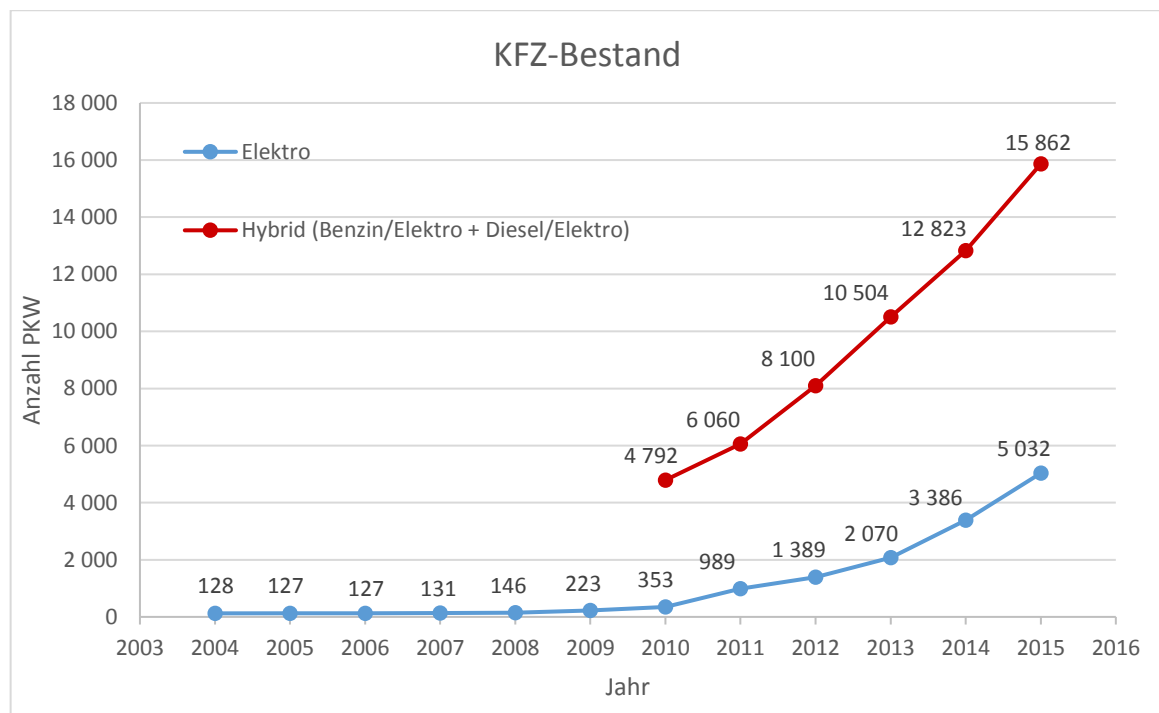


Abbildung 2.1 KFZ-Bestand in Österreich von Elektro- und Hybridfahrzeugen (Daten aus [3])

Mit Ende 2015 waren in Österreich ca. 21.000 Fahrzeuge zugelassen, welche elektrisch angetrieben und somit über das Stromnetz aufgeladen werden. Die reinen Elektrofahrzeuge

stellen mit etwa 5000 Stück einen Anteil von 0,11 % aller PKW dar. Von Jänner bis März 2016 wurden 992 Elektrofahrzeuge neu zugelassen was einem Anteil von 1,3 % entspricht.

Dieser jährliche Zuwachs beim Fahrzeugbestand an Elektrofahrzeugen wird sich bei fortsetzendem Trend erheblich auf die Belastung in den Niederspannungsnetzen auswirken. Diese Belastungen betreffen neben der Übertragungsfähigkeit der Stromnetze auch die Auswirkungen auf die Spannungsqualität.

Die durch Elektrofahrzeuge entstehenden Netzurückwirkungen wurden bereits in folgenden, für diese Arbeit relevanten, wissenschaftlichen Publikationen untersucht:

- Flickerbelastung: [4]
- Unsymmetrie: [5], [6]
- Oberschwingungsströme: [7], [5], [6], [8], [9]

Diese Untersuchungen wurden jedoch meist an nicht mehr als vier unterschiedlichen Fahrzeugen durchgeführt. Im Zuge dieser Masterarbeit sollen u.a. diese bereits untersuchten Netzurückwirkungen an einer größeren Anzahl aktuell verfügbarer EV untersucht werden. Folgende Fragestellungen sollen durch die Auswertung der Messdaten in dieser Arbeit beantwortet werden:

- Ladeverhalten allgemein (Ladekurve, Leistungsaufnahme)
- Vergleich unterschiedlicher Ladezyklen gleicher Fahrzeuge
- Vergleich der unterschiedlichen Fahrzeuge (Leistungsaufnahmen, Netzurückwirkungen)
- Netzurückwirkungen
  - Oberschwingungsströme (Einzel-EV und Kompensationseffekte bei mehreren EVs)
  - Unsymmetrie
  - Spannungsschwankungen, Flickerbelastung
- Vergleich mit den Grenzwerten aus diversen Produktnormen
- Vergleich mit anderen wissenschaftlichen Publikationen

Die daraus gewonnen Erkenntnisse dienen als Vergleichsmöglichkeit für weitere wissenschaftlich Arbeiten sowie als Grundlage für Netzbetreiber für die notwendige Beurteilung der Netzurückwirkungsrelevanz von Elektrofahrzeugen. Bisherige Erkenntnisse lassen vermuten, dass die meist einphasige Belastung sowie die Höhe der OS-Ströme von Elektrofahrzeugen, zu unzulässigen Auswirkungen auf die Spannungsqualität führen können und es entsprechend hohe Kurzschlussleistungen an den Ladepunkten bedarf.

Durch eine mehrwöchige Langzeitmessung sowie gezielte Einzelmessungen, mittels eines mehrkanaligen Messgeräts, werden Ladezyklen von 12 unterschiedlichen EV aufgezeichnet. Für die Langzeitmessung stehen sieben Fahrzeuge zur Verfügung, bei diesen werden mind. vier aussagekräftige Ladezyklen aufgezeichnet um mögliche Unterschiede in den einzelnen Ladevorgängen feststellen zu können. Für die restlichen Fahrzeuge wird eine Einzelmessung durchgeführt bei der nach Möglichkeit ein Ladzyklus über mind. eine Stunde aufgezeichnet wird. Die bei den Messungen gewonnenen Daten werden mittels entsprechender Software im Zeit- und Frequenzbereich analysiert und im Weiteren werden die oben genannten Fragestellungen diskutiert.

### 3 Relevante Normen hinsichtlich Netzzrückwirkungen

Im Folgenden werden die für die Bewertung von Spannungsqualität in Bezug auf Elektromobilität relevanten Normen mit Auszug der wichtigsten Aussagen und Tabellen aufgelistet.

#### EN 50160

ÖVE/ÖNORM EN 50160 [10]

Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen

In dieser sind die Merkmale der Niederspannung geregelt. Die für diese Arbeit wichtigsten Parameter sind in Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 aufgelistet.

Flickerstärke	$P_{It} \leq 1$
Unsymmetrie der Versorgungsspannung	$k_u: 0 \dots 2 \%$
Oberschwingungsspannung	$THD_u \leq 8 \%$

Tabelle 3.1 Auszug von Merkmalen der Niederspannung aus [10]

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Keine Vielfache von 3		Vielfache von 3			
Ordnung $\nu$	relative Spannung $U_\nu$ %	Ordnung $\nu$	relative Spannung $U_\nu$ %	Ordnung $\nu$	relative Spannung $U_\nu$ %
5	6,0	3	5	2	2,0
7	5,0	9	1,5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6 bis 24	0,5
13	3,0	21	0,5		
17	2,0				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Tabelle 3.2 Werte einzelner Oberschwingungsspannungen an der Übergabestelle bis zur 25. Ordnung in Prozent der Grundschwingungsspannung  $U_1$  (Tabelle 1 in [10])

## EN 61000-3-2

ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11]

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme

(Geräte-Eingangstrom  $\leq 16$  A je Leiter)

Dieser Teil der EN 61000 gilt für die Begrenzung von Oberschwingungsströmen, die in das Niederspannungsnetz eingespeist werden. Er legt die Grenzwerte der Oberschwingungsanteile des Eingangstroms fest, die durch Geräte hervorgerufen werden können, die unter festgelegten Bedingungen geprüft werden.

Betriebsmittel werden dabei in vier Klassen eingeteilt (A, B, C, D), wobei Elektrofahrzeuge in die Klasse A fallen.

Oberschwingungsordnung <i>n</i>	Zulässiger Höchstwert des Oberschwingungsstromes A
<b>Ungeradzahlige Oberschwingungen</b>	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 \leq n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$
<b>Geradzahlige Oberschwingungen</b>	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 \leq n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$

Abbildung 3.1 Grenzwerte von Oberschwingungsströme für Geräte der Klasse A mit  $I_{ref} \leq 16$  A  
(Tabelle 1 in [11])

## EN 61000-3-3

ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-3

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Teil 3-3: Grenzwerte – Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom  $\leq 16$  A je Leiter, die keiner Sonderanschlussbedingung unterliegen

Die EN-61000-3-3 legt die Grenzwerte für die Spannungsänderungen fest, die von Geräten und Einrichtungen erzeugt werden, die unter festgelegten Bedingungen geprüft werden, und gibt eine Anleitung über Berechnungsverfahren.

Der Kurzzeitflickerwert $P_{st}$ darf nicht größer als 1,0 sein
Der Langzeitflickerwert $P_{lt}$ darf nicht größer als 0,65 sein
Die größte Änderung des stationären Zustands einer Spannung $d_c$ darf 3,3 % nicht überschreiten
Die größte relative Spannungsänderung $d_{max}$ darf nicht überschreiten: <ul style="list-style-type: none"> <li>a) 4 % ohne zusätzliche Bedingungen;</li> <li>b) 6 % für Geräte und Einrichtungen, die entweder <ul style="list-style-type: none"> <li>- Manuell geschaltet werden oder</li> <li>- Häufiger als zweimal am Tag automatisch geschaltet werden und entweder einen verzögerten Wiederanlauf haben (die Verzögerung darf nicht kleiner als einige 10 s sein) oder nach einer Unterbrechung der Stromversorgung manuell wieder eingeschaltet werden;</li> </ul> </li> </ul>

Tabelle 3.3 Auszug von Grenzwerten bzgl. Spannungsänderungen aus [12]

## EN 61000-3-11

[13] ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-11

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Teil 3-11: Grenzwerte – Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom  $\leq 75$  A je Leiter, die einer Sonderanschlussbedingung unterliegen

Es gelten dieselben Grenzwerte wie in [12] – siehe Tabelle 3.3.

**EN 61000-3-12**

ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-12 [14]

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

 Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom  $> 16\text{ A}$  und  $\leq 75\text{ A}$  je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetzen vorgesehen sind

Diese Norm legt Anforderungen und Aussendungsgrenzwerte für Geräte sowie Verfahren für Typprüfungen und Simulationen fest.

Zweck dieser Norm ist es, Grenzwerte für Oberschwingungsaussendungen von Geräten festzulegen, die in den Anwendungsbereich dieser Norm fallen, so dass unter Berücksichtigung der Aussendung anderer Geräte bei Übereinstimmung mit den Grenzwerten sichergestellt ist, dass die Oberschwingungs-Störpegel nicht die in der IEC 61000-2-2 festgelegten Verträglichkeitspegel überschreiten.

Mindestwert von $R_{sce}$	Zulässige einzelne Oberschwingungsströme $I_h/I_{ref}$ <sup>a</sup>						Zulässige Oberschwingungsstrom- Kennwerte	
	%						%	
	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$	$THCI_{ref}$	$PWHCI_{ref}$
33	21,6	10,7	7,2	3,8	3,1	2	23	23
66	24	13	8	5	4	3	26	26
120	27	15	10	6	5	4	30	30
250	35	20	13	9	8	6	40	40
$\geq 350$	41	24	15	12	10	8	47	47

Die relativen Werte für geradzahlige Oberschwingungen bis zur 12. Ordnung dürfen  $16/h\%$  nicht überschreiten. Geradzahlige Oberschwingungen oberhalb der 12. Ordnung werden beim  $THC$  und beim  $PWHC$  in der gleichen Weise wie ungeradzahlige Oberschwingungen berücksichtigt.

Lineare Interpolation zwischen aufeinanderfolgenden  $R_{sce}$ -Werten ist zulässig.

<sup>a</sup>  $I_{ref}$  = Bezugsstrom;  $I_h$  = Oberschwingungsstrom-Komponente.

Abbildung 3.2 Grenzwerte für Oberschwingungsströme für Geräte, die keine symmetrischen dreiphasigen Geräte sind;  $I_{ref} > 16\text{ A}$  und  $\leq 75\text{ A}$  (Tabelle 2 in [14])

## **EN 61000-4-7**

ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-7 [15]

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Teil 4-7: Prüf- und Messverfahren – Allgemeiner Leitfaden für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten

Diese Norm legt die Messgeräte fest, die zur Prüfung einzelner Geräte auf Übereinstimmung mit in bestimmten Normen festgelegten Störaussendungsgrenzwerten sowie zur Messung von Oberschwingungsströmen und –spannungen in realen Stromversorgungsnetzen vorgesehen sind.

## **IEC 61851-21-1**

IEC 61851-21-1 CDV [16]

Electric vehicle conductive charging system

Part 21-1: Electric vehicle onboard charger EMC requirements for conductive connection to an a.c./d.c supply

Diese Norm stellt im Moment nur einen Entwurf dar (CDV = Committee Draft for Voting). In ihr sind Testbedingungen für Elektrofahrzeuge zur Feststellung der Störfestigkeit und der Emissionsaussendungen festgelegt. Testbedingungen für Emissionsmessungen sind z.B.:

- The state of charge (SOC) of the traction battery shall kept between 20 % and 80 % of the maximum SOC during the whole time duration of the measurement.
- Equipment that can operate over a power range that is covered by both standards (IEC 61000-3-2 and IEC 61000-3-12) shall conform to each of these standards in the corresponding current range.
- Equipment with a rated current e.g. = 20 A shall tested acc. to IEC 61000-3-12 and IEC 61000-3-2 with a current limit to 16 A.

Die Grenzwerte für Oberschwingungsströmen wurden aus [11] und [14] übernommen – siehe Abbildung 3.1 und Abbildung 3.2.

Grenzwerte bezüglich Spannungsänderungen wurden aus [12] und [13] übernommen – siehe Tabelle 3.3.



## TOR D1

Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen [17]

Teil D: Besondere technische Regeln

Hauptabschnitt D1: Netzrückwirkungsrelevante Betriebsmittel

Im Hauptabschnitt D1 wird der Einsatz von elektrischen Betriebsmitteln von Netzbenutzern im Hinblick auf die Sicherstellung elektromagnetischer Verträglichkeit (EMV) behandelt.

Hinsichtlich Oberschwingungen dürfen Betriebsmittel bis zu den in Abbildung 3.3 angeführten Leistungsgrenzwerten ohne Anfrage beim Netzbetreiber eingesetzt werden.

Anschlussart	Maximal zulässige Leistung
L – N	1,3 kVA
L – L	1,9 kVA
L – L – L (– N)	3,8 kVA

Abbildung 3.3 Leistungsgrenzwerte bzgl. Oberschwingungen (Tabelle 2-1 in [17])

## TOR D2

Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen [18]

Teil D: Besondere technische Regeln

Hauptabschnitt D2: Richtlinie zur Beurteilung von Netzrückwirkungen

In Hauptabschnitt D2 sind neben Grenzwerten zur Einhaltung der Spannungsqualität wie sie Auszugsweise in Tabelle 3.4 aufgeführt sind auch praktische Berechnungsmethoden und Beurteilungsschemen enthalten. Ein Beurteilungsschema bzgl. Spannungsschwankungen findet sich in Abbildung 3.4.

Verträglichkeitspegel für den Unsymmetriegrad aller Netzverbraucher: $k_u \leq 2 \%$
Verträglichkeitspegel für den Unsymmetriegrad für eine einzelnen Verbraucheranlage: $k_{u,i} \leq 0,7 \%$
Langzeitflickerstärke an der Übergabestelle darf den Wert von $P_{lt} = 1$ nicht überschreiten
Langzeitflickeremission eines einzelnen Netzbenutzers: $P_{lt,i} \leq 0,5$
Kurzzeitflickeremission eines einzelnen Netzbenutzers: $P_{st,i} \leq 0,8$

Tabelle 3.4 Auszug von Grenzwerten bzgl. Spannungsänderungen und Unsymmetrie aus [18]

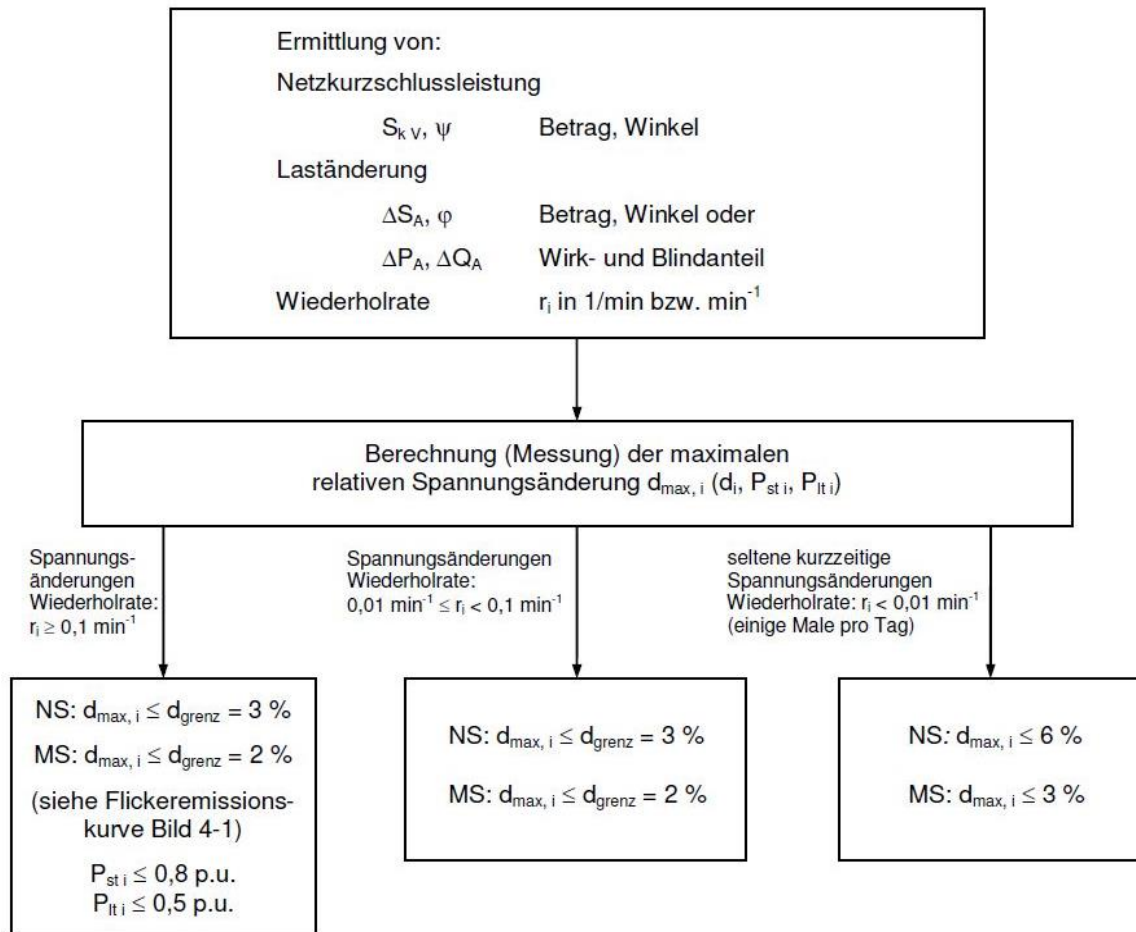


Abbildung 3.4 Beurteilungsschema für eine Anlage des Netzbenutzers am Verknüpfungspunkt [18]

## 4 Ladevorgang

### 4.1 Ladebetriebsarten

[19] [20] Die unterschiedlichen Arten des AC- und DC-Ladens werden in der relevanten Systemnorm EN 61851-1 als Ladebetriebsarten bezeichnet:

#### Ladebetriebsart 1

Das Laden mit Wechselstrom an einer landesüblichen Haushaltssteckdose („Schutzkontakt-Steckdose“) oder einer ein- oder dreiphasigen CEE-Steckdose wird als Ladebetriebsart 1 bezeichnet. Bei dieser Ladebetriebsart findet keine Kommunikation zwischen Energieabgabestelle (Steckdose) und Fahrzeug statt.

Diese Ladebetriebsart ist für das Laden von Fahrzeugen möglich, falls der Fahrzeughersteller diese Ladebetriebsart erlaubt und sichergestellt ist, dass die Spannungsversorgung mit einem RCD (Fehlerstromschutzschalter) ausgestattet ist.

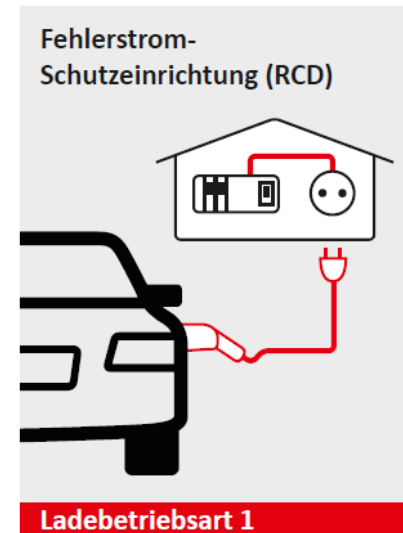


Abbildung 4.1 Ladung an einer Haushaltssteckdose [19]

#### Ladebetriebsart 2

Der Unterschied zu Ladebetriebsart 1 besteht im Wesentlichen darin, dass in der Ladeleitung hier eine Steuer- und Schutzeinrichtung integriert ist („In Cable Control and Protection Device“ IC-CPD). Die IC-CPD schützt vor elektrischem Schlag bei Isolationsfehlern. Über ein Pilotsignal erfolgt ein Informationsaustausch und Überwachung der Schutzleiterverbindung zwischen Infrastruktur und Fahrzeug.

Diese Ladebetriebsart ist vorgesehen für die Fälle, in denen keine spezielle Ladestation der Ladebetriebsarten 3 oder 4 verfügbar ist.

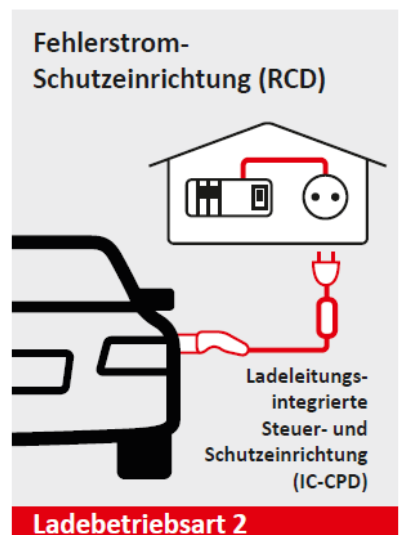


Abbildung 4.2 Ladung mit IC-CPD an einer Haushaltssteckdose [19]

### Ladebetriebsart 3

In dieser Ladebetriebsart findet das Laden mit Wechselstrom an einer zweckgebundenen Steckdose statt, die sich an einer am Netz fest installierten Ladestation (oder Wallbox) befindet. Alternativ kann an der Ladestation ein fest angeschlossenes Ladekabel vorhanden sein. Eine Steuerung des Ladevorgangs wird durch einen Datenaustausch zwischen der Ladestation und dem Fahrzeug ermöglicht.

Diese Ladebetriebsart basiert auf einer speziell für Elektrofahrzeuge errichteten Infrastruktur und bietet ein hohes Maß an elektrischer Sicherheit und Schutz der Installation vor Überlastung (Brandschutz).

In der Regel unterstützen aktuelle und zukünftige Pkw und leichte Nutzfahrzeuge die Ladebetriebsart 3. Aus vorgenannten Gründen wird diese Ladebetriebsart empfohlen.

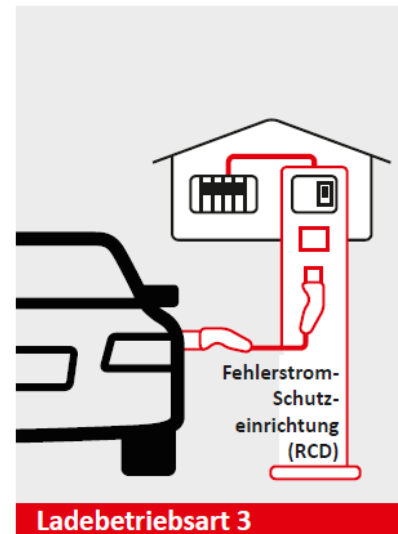


Abbildung 4.3 Ladung an einer Ladestation [19]

### Ladebetriebsart 4

Das kabelgebundene DC-Laden wird als Ladebetriebsart 4 bezeichnet und wie die Ladebetriebsart 3 zum Laden von Elektrofahrzeugen empfohlen.

Das Laden mit Gleichstrom (DC) wird üblicherweise für höhere Ladeleistungen ( $> 22 \text{ kW}$ ) verwendet. Bei Ladebetriebsart 4 ist das Kabel an der Ladestation oder Wallbox fest angebracht.

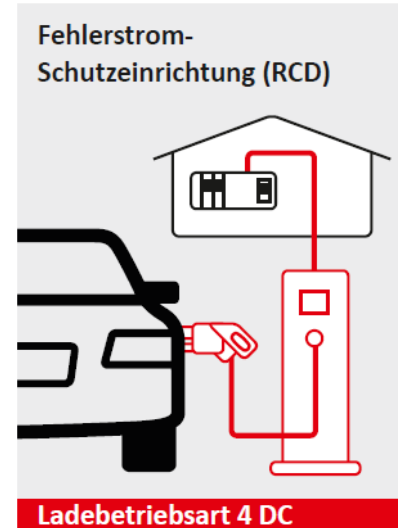


Abbildung 4.4 Ladung an einer Ladestation mit Gleichstromladung [19]

Ladebetriebsart	Anschluss energieseitig	Anschluss fahrzeugseitig	einphasig	dreiphasig
1	Schutzkontakt- oder CEE-Steckdose	Typ 2	bis 16 A / 250V	bis 16 A / 480 V
2	Schutzkontakt- oder CEE-Steckdose	Typ 2	bis 32 A / 250V	bis 32 A / 480 V
3	Steckdose Typ 2 oder festes Ladekabel	Typ 2	bis 63 A / 250 V	bis 63 A / 480 V
4	festes Ladekabel an der Ladestation	Typ 2 CCS	bis 200 A / 850 V	

Tabelle 4.1 Ladebetriebsarten im Überblick - Europäische Standards (modifiziert aus [21])

### Funktionen der Ladebetriebsarten 2, 3 und 4

Die EVSE oder das System aus EVSE und Fahrzeug müssen folgende Funktionen übernehmen:

- Überprüfung, dass das Fahrzeug ordnungsgemäß angeschlossen ist;
- Ständige Überwachung der Durchgängigkeit des Schutzleiters;
- Einschalten des Systems;
- Ausschalten des Systems;

### Wahlfreie Funktionen der Ladebetriebsarten 2, 3 und 4

Die EVSE oder das System aus EVSE und Fahrzeug sollten folgende Funktionen übernehmen:

- Auswahl der Ladestromstärke;
- Bestimmung der Lüftungsanordnungen im Ladebereich;
- Erkennung/Einstellung des momentan verfügbaren Laststroms der Stromversorgungseinrichtung;
- Sperren/Freigeben der Steckvorrichtung;
- Steuerung des Stromflusses in beider Richtungen;

Weitere zusätzliche Funktionen können vorgesehen werden.

## 4.2 Ladestecker

Es gibt weltweit eine Vielzahl an unterschiedlichen Ladesteckern. Von der Europäischen Automobilindustrie wurde für die Ladebetriebsarten 1 bis 3 der Typ-2 Stecker, für die Ladebetriebsart 4 der Typ-2-CCS Stecker zum Standard ausgewählt.

Am Typ 2 Stecker (Abbildung 4.5) finden sich die Kontakte zur Energieübertragung (L1, L2, L3 und N), der Schutzleiterkontakt PE sowie die Steuerkontakte CP und PP. Der CP Kontakt (Control Pilot) dient zur Pilotsteuerung, über ihn erfolgt die Kommunikation zwischen Ladestation und EV, es werden etwa Daten über den maximal beziehbaren Ladestrom übermittelt. Der PP (Proximity Pilot) dient als Annäherungserkennung, hierbei wird festgestellt ob ein EV angeschlossen ist und für welchen max. Ladestrom das Ladekabel geeignet ist.

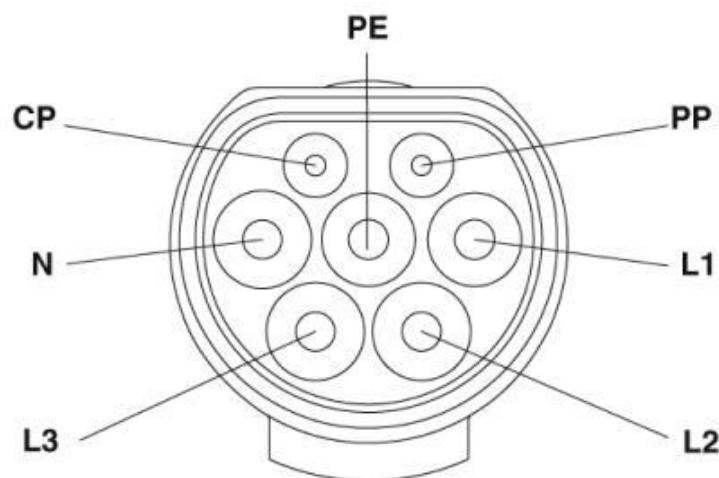


Abbildung 4.5 Symbolbild Typ 2 Stecker mit Anschlussbezeichnungen [22]

Auch am Typ 2 CCS Stecker (Abbildung 4.6) finden sich der CP- und PP-Kontakt, die Energieübertragung erfolgt hier mittels Gleichstrom über die Kontakte DC+ und DC-.

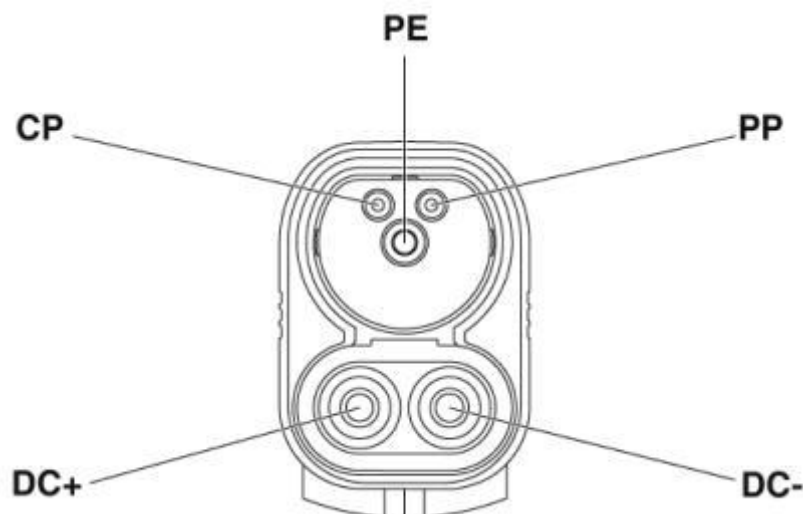


Abbildung 4.6 Symbolbild Typ 2 CCS Stecker mit Anschlussbezeichnungen [22]

Tabelle 4.2 liefert einen Überblick über die in der EU meist verbreitetsten Ladesteckertypen. Darin sind die Verwendungsmöglichkeit (AC- oder DC-Ladung sowie Ladebetriebsart) sowie die Gerätenorm mit einem Auszug der max. Übertragungsfähigkeit für den jeweiligen Steckertyp aufgelistet.

<p><b>Typ 1</b></p>		<p>AC-Ladung (1-phasig) Ladebetriebsart 1 bis 3 bis zu 32 A / 250 V [23] Norm: IEC 62196-2 vor allem bei EV aus USA und Japan</p>
<p><b>Typ 2</b></p>		<p>AC-Ladung (1- und 3-phasig) Ladebetriebsart 1 bis 3 bis zu 63 A / 480 V [23] Norm: IEC 62196-2 Standard in der EU</p>
<p><b>Typ 2 CCS</b></p>		<p>DC-Ladung (Schnellladung) Ladebetriebsart 4 bis zu 200 A / 1000 V [24] Norm: IEC 62196-3 Standard in der EU; In Norm als <i>Konfiguration FF</i> bezeichnet</p>
<p><b>CHAdeMO</b></p>		<p>DC-Ladung (Schnellladung) Ladebetriebsart 4 bis zu 200 A / 600 V [24] Norm: IEC 621196-3 in Japan entwickelt; auch in der EU an vielen Schnellladestationen zu finden; In Norm als <i>Konfiguration AA</i> bezeichnet</p>

Tabelle 4.2 Meist gebräuchlichste Ladesteckertypen in der EU (Bilder von [22] und [25])

## 4.3 Ladekabel

### Arten von Ladekabeln

In der IEC 61851-1 werden auch die verschiedenen Varianten der Anschlusskonfiguration definiert:

- Fall A: Das Ladekabel ist fest mit dem Fahrzeug verbunden.
- Fall B: Das Ladekabel ist weder mit dem Fahrzeug noch mit der Ladestation fest verbunden.
- Fall C: Das Ladekabel ist fest mit der Ladestation verbunden.

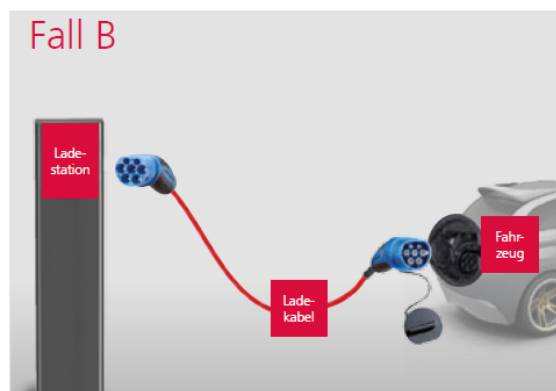
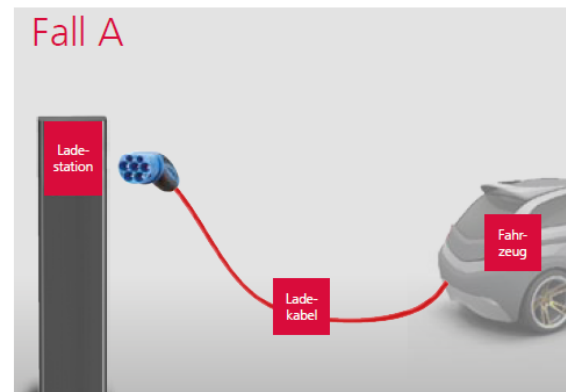


Tabelle 4.3 Arten von Ladekabeln [21]

Ladekabel sind mit einer Widerstandskodierung zwischen PE- und PP-Kontakt versehen um eine Überlastung des Kabels zu verhindern (z.B. 220  $\Omega$  für 32 A). Dieser Widerstandswert wird vor Beginn der Ladung von der Ladestation ausgelesen und bei der Vorgabe des maximalen Ladestroms der Ladestation an das Elektrofahrzeug berücksichtigt.



Tabelle 4.4 Ladekabel Mode 2 mit integrierter ICCB [21]



## 4.4 Ladestationen

[21] Ladestationen, auch EVSE, stellen das Bindeglied zwischen Elektrofahrzeug und dem Stromnetz dar. Je nach Einsatzgebiet müssen die Ladestationen unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Generell werden zwei Kategorien unterschieden:

- Ladestationen für den privaten und halb-öffentlichen Bereich (Ein- / Mehrfamilienhäuser, Banken, Hotels, Einkaufszentren, ...)
- Ladestationen für den öffentlichen Bereich (öffentliche Straßen, Bahnhöfe, Flughäfen, ...)

Die Ladestation kommuniziert in den Ladebetriebsarten 2, 3 und 4 mit dem Elektrofahrzeug und kann durch entsprechende Vernetzung auch in höhere Systeme eingebunden werden (Smart-Home-Integration, Anbindung an ein Backend-System via OCPP, Anbindung an lokale Lastmanagement-Systeme, ...).

### Schritte beim Laden

- Vor dem Ladevorgang erfolgt in den Ladebetriebsarten 2, 3 und 4 eine PWM-Kommunikation über die CP-Leitung mit dem Fahrzeug
- Ladestation prüft die Verbindung des Schutzleiters zum Fahrzeug und übermittelt den verfügbaren Ladestrom
- Der Lader (Ladegerät des EV) wird entsprechend eingestellt
- Das Fahrzeug verriegelt die Ladesteckvorrichtung und fordert den Start der Ladung an
- Die Ladestation verriegelt die infrastrukturelle Ladesteckvorrichtung
- Sind alle weiteren Voraussetzungen erfüllt, schaltet die Ladestation die Ladesteckdose ein
- Für die Dauer der Ladung wird über die PWM-Kommunikation der Schutzleiter überwacht und das Fahrzeug besitzt die Möglichkeit die, die Spannungsversorgung durch die Ladestation abschalten zu lassen.
- Das Beenden der Ladung und die Entriegelung der Steckvorrichtung erfolgt über eine Stopp-Einrichtung im Fahrzeug

### Begrenzung des Ladestroms

Das Ladegerät des Fahrzeugs bestimmt den Ladevorgang. Um zu vermeiden, dass das Fahrzeugladegerät die Leistungsfähigkeit der Ladestation oder des Ladekabels überlastet, werden die Leistungsdaten der Systeme identifiziert und aneinander angepasst. Die CP-Box liest die Leistungsdaten des Ladekabels aus dem Kabel aus. Die Leistungsdaten der Ladestation sind in der CP-Box niedergelegt. Bevor der Ladevorgang gestartet wird, übermittelt die CP-Box mittels PWM-Signal die Leistungsdaten an das Fahrzeug, das Ladegerät des Fahrzeugs wird entsprechend eingestellt und der Ladevorgang kann beginnen, ohne dass eine Überlastungssituation entstehen kann.

Das schwächste Glied der Ladekette bestimmt den maximal zulässigen Ladestrom: Abhängig von der Leistung der Ladestation und der Widerstandscodierung im Stecker des Ladekabels wird der Ladestrom im Lader begrenzt.

So gut wie alle Messungen für diese Masterarbeit wurden an einer Ladestation *KEBA KeContact P20* (KEBA AG, Linz, Österreich) durchgeführt (siehe Abbildung 4.7)

Diese haben entweder eine Typ 2 Steckerbuchse oder ein fix angeschlossenes Kabel mit einem Typ 2 Stecker. Die Ladestationen sind so eingestellt, dass bei ihnen dreiphasig mit bis zu 22 kW (3x32 A) geladen werden kann. Diese maximale Ladeleistung kann jedoch durch ein übergeordnetes Last-Management-System oder aufgrund thermischer Überlastung der Ladestation reduziert werden.

Eine Messung wurde an einer Schnellladestation der Firma Schrack (Schrack Technik GmbH, Wien, Österreich) vorgenommen (siehe Abbildung 4.8). An dieser befindet sich neben einem Typ 2 Anschluss an dem mit Wechselstrom (44 kW – 3x63 A) geladen werden kann auch ein Typ 2 CCS sowie ein CHAdeMO Anschluss. An diesen beiden Anschlüssen kann ein EV mittels Gleichstrom jeweils mit 50 kW geladen werden. Der Gleichstrom wird dabei über ein Ladegerät (Gleichrichter) in der Schnellladestation erzeugt. Da dieses Ladegerät um einiges größer als in einem Elektrofahrzeug dimensioniert werden kann, ist eine deutlich schnellere Ladung des EV möglich.



Abbildung 4.7 Ladestation KEBA KeContact P20 [26]



Abbildung 4.8 Schnellladestation Schrack [27]

## 4.5 Ladestrom und -spannung

[28] [29] In den meisten aktuellen Elektrofahrzeugen sind als Energiespeicher Lithium-Ionen-Akkumulatoren eingebaut, welche mittels CC-CV-Ladeverfahren geladen werden. Dieses lässt sich hinsichtlich der DC-Spannung und des DC-Stroms, wie in Abbildung 4.9 zu sehen, in zwei Phasen einteilen: eine Konstantstromphase (Constant Current – CC) und eine Konstantspannungsphase (Constant Voltage – CV).

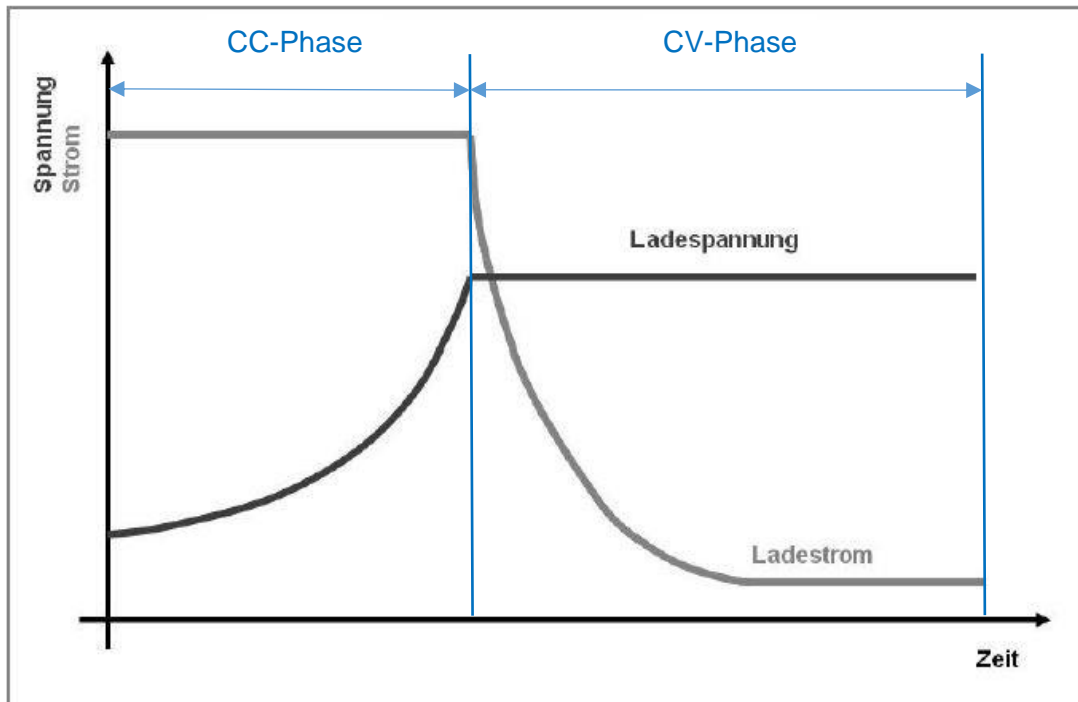


Abbildung 4.9 Verlauf des Ladestroms und der Ladespannung beim CC-CV-Ladeverfahren (modifiziert aus [28])

### Konstantstromphase (CC-Phase)

Im ersten Schritt wird der Akku mit einem konstanten Strom geladen. Damit ist dieser begrenzt und ein zu hoher Ladestrom während der Lade-Anfangsphase wird ausgeschlossen. Während der Konstantstromladung wird die Momentanspannung des Akkus überwacht. Erreicht diese die Ladeschlussspannung, wird die Konstantstromladung beendet. Zu diesem Zeitpunkt ist der Akku zu etwa 70 – 80 % aufgeladen.

Die CC-Phase kann auch als Pulsladeverfahren ausgeführt sein. Diese Konstantstromladung mit Spannungsüberwachung wird vor allem bei NiCd- und NiMH-Akkus eingesetzt, da bei diesen während des Ladevorgangs nur schwer zu erkennen ist, wann der Akku voll geladen ist. Wie in Abbildung 4.10 zu sehen wird der konstante Ladestrom in periodischen Abständen immer kurzzeitig unterbrochen. Während dieser Ladepausen wird die momentane Leerlaufspannung des Akkus ermittelt, aus dieser lässt sich auf den Ladezustand schließen.

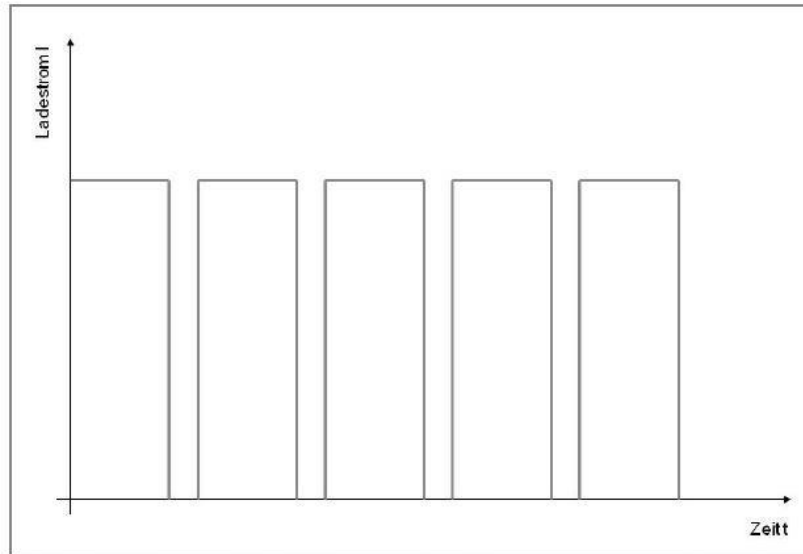


Abbildung 4.10 Konstantstromladung mit Spannungsüberwachung (Puls-ladeverfahren) [28]

### Konstantspannungsphase (CV-Phase)

Im zweiten Schritt wird der Akku mit Konstantspannung weiter geladen. Damit wird sichergestellt, dass die Ladeschlussspannung keinesfalls überschritten wird. In dieser Zeit verringert sich der Ladestrom umso mehr, je voller der Akku bereits aufgeladen ist. Der Ladevorgang wird beendet, sobald ein voreingestellter minimaler Ladestrom unterschritten wird.

Der Zeitpunkt des Übergangs von der CC- zur CV-Phase hängt von drei Einflussfaktoren ab:

1. Ladezustand zu Beginn des Ladevorgangs (Start-SOC)
2. Laderstromstärke während der CC-Phase
3. Batterietemperatur

Abbildung 4.11 vergleicht den Beginn der CV-Phase dreier Ladevorgänge in Abhängigkeit verschiedener Batterietemperaturen bei ähnlicher Leistung in der CC-Phase und gleichem initialen Ladezustand von 59 %. Hier ist deutlich zu erkennen, dass sich mit geringerer Batterietemperatur der Beginn der CV-Phase nach vorne verlegt.

Abbildung 4.12 veranschaulicht den Einfluss unterschiedlicher Ladeleistungen auf den Übergangszeitpunkt von der CC- zur CV-Phase und macht deutlich, dass mit einer höheren Ladeleistung die Ladeschlussspannung auch früher erreicht wird.

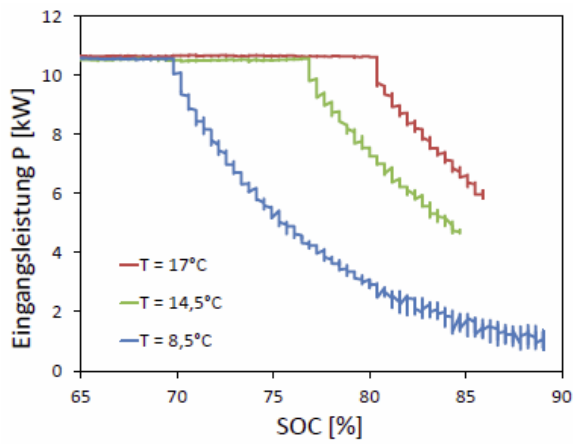


Abbildung 4.11 Verlauf dreier Ladevorgänge mit ähnlicher Leistung in der CC-Phase und Start-SOC 59 % [29]

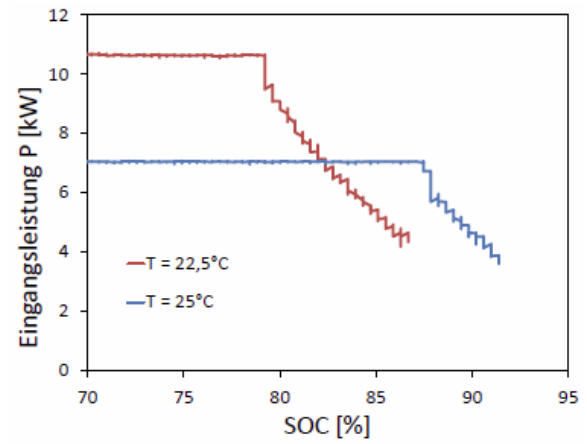


Abbildung 4.12 Verlauf zweier Ladevorgänge mit ähnlicher Temperatur und Start-SOC 50 % [29]

Der SOC entspricht dem Ladezustand des Akkumulators im Elektrofahrzeug. Ein leerer Akkumulator entspricht einem SOC von 0 %, ein voll aufgeladener einem SOC von 100 %.

## 5 Messungen

### 5.1 Messkonzept

Wie im Eingangskapitel erwähnt, soll die Last „Elektrofahrzeug“ charakterisiert werden. Dazu werden die Zeitverläufe von Spannung und Strom in den Zuleitungen von Ladestationen und somit von einzelnen Elektrofahrzeugen gemessen. Hierfür wird ein mehrkanaliges Messgerät verwendet, welches die Verläufe von mehreren Ladestationen gleichzeitig über einen längeren Zeitraum aufzeichnen kann. Die Spannungen werden dabei direkt, die Ströme indirekt, mittels Messzangen gemessen. Es werden dabei zwar auch Ströme, hervorgerufen durch die Elektronik der Ladestationen mitgemessen, diese sind im Verhältnis zu den Ladeströmen der EV jedoch äußerst gering ( $< 1\%$ ) und werden daher in dieser Arbeit vernachlässigt.

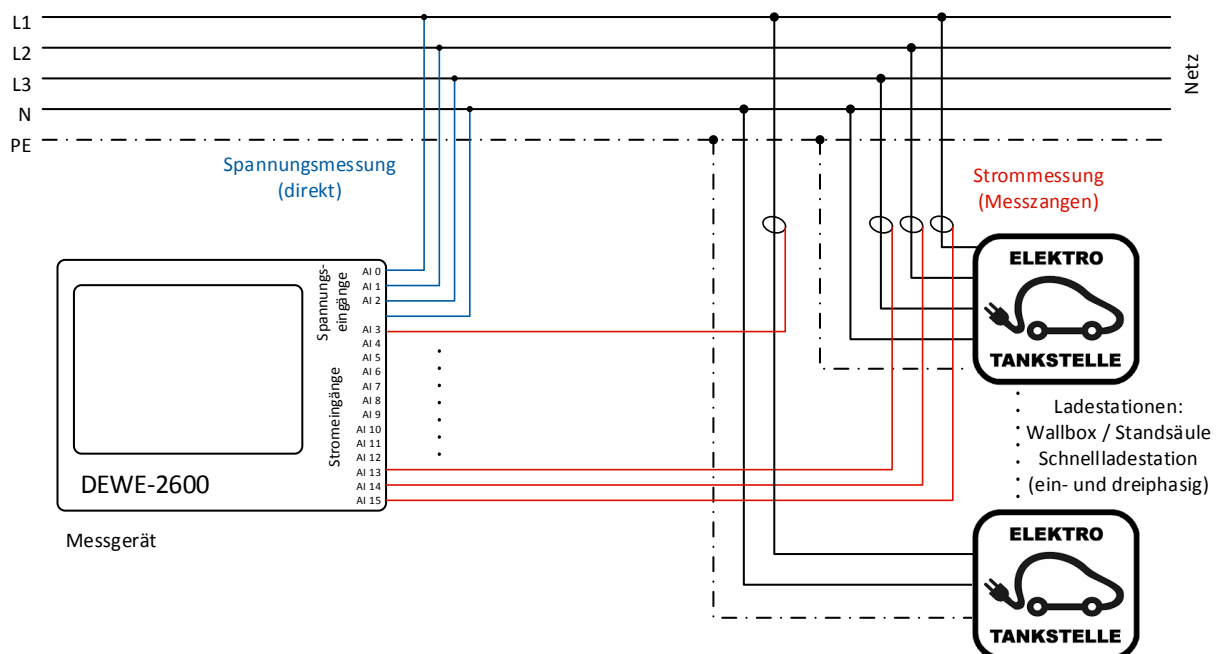


Abbildung 5.1 Schema des angewandten Messprinzips

Die Messung erfolgt an den Abgangsklemmen bei den Verteilschränken der Ladestationen. Die Spannungen werden direkt an den Klemmen eines Reserveabganges abgenommen, die Ströme mittels Strommesszangen, welche an den Anschlusskabeln der Ladestationen angebracht sind, gemessen.



Abbildung 5.2 Messung der Ströme mittel Messzangen in den Zuleitungskabeln der Ladestationen

Mittels der auf dem Messgerät installierten Software DEWESoft 7.1.1 lassen sich aus den Zeitverläufen von Spannung und Strom folgende für diese Arbeit benötigten Effektivwertgrößen ermitteln: Scheinleistung, Wirkleistung, Blindleistung, Verzerrungsblindleistung, Verschiebungsfaktor, Oberschwingungsamplituden und –winkel (Spannung und Strom), Oberschwingungs-Gesamtverzerrung (Spannung und Strom), Spannungs- und Stromunsymmetrie sowie Flicker (Kurzzeit  $P_{st}$  und Langzeit  $P_{lt}$ ). Diese Größen werden zur Reduzierung der Datenmenge, auf dem Messgerät als 2-Sekunden-Mittelwerte abgespeichert.

Auf Basis von bereits erfolgten Messungen des Instituts für Elektrische Anlagen und aus einschlägigen Veröffentlichungen ( [8] [5] ) ist ersichtlich, dass die Amplituden der Strom Oberschwingungen bei EV mit steigender Ordnungszahl abnehmen und relevante Amplituden nur bis zur 20. Ordnung ( $\cong 1000$  Hz) zu erwarten sind. Dies bedeutet, dass gemäß des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems für Signalanteile bis 1 kHz mit einer Abtastfrequenz von mindestens 2 kHz gearbeitet werden muss.

## 5.2 Messgerät und Zubehör

### 5.2.1 Messgerät

Auf Grund der Anforderung an die Anzahl der Kanäle, Ermittlung elektrischer Größen, Vielzahl von Möglichkeiten zur Auswertung, Langzeitaufzeichnung sowie leichte Transportierbarkeit des Messsystems werden die Messungen mit dem DEWE-2600 (DEWETRON GmbH, Grambach, Österreich) und dem dazugehörigen Softwarepaket DEWESoft durchgeführt.



Abbildung 5.3 Symbolbild DEWE-2600 [30]

Das DEWE-2600 ist ein mobiles Messinstrument mit eingebauter USV, welches Platz für bis zu 16 isolierte DAQP-Module bietet. Für die Messung der Phasenspannungen werden drei DAQP-HV Module verwendet, mit welchen Spannungen von maximal 1400 V direkt gemessen werden können. Die restlichen 13 Kanäle werden zur Messung von Phasenströmen verwendet. Hierfür werden Strommesszangen verwendet, welche ein dem Strom proportionales Spannungssignal liefern. Dieses Signal bewegt sich im 0 – 2,5 Volt-Bereich, es werden daher die für diesen Bereich besser geeigneten DAQP-LV Module verwendet. Die Bandbreite für beide Module liegt bei 300 kHz und ist somit ausreichend da nur der Frequenzbereich bis 5 kHz betrachtet wird.

Modul	verwendeter Eingangsbereich	Genauigkeit
DAQP-HV	400 V	$\pm 0,02$ % vom Messwert $\pm 0,05$ % des Messbereichs
DAQP-LV	0,5 V / 1 V / 2,5 V	$\pm 0,02$ % vom Messwert $\pm 0,05$ % des Messbereichs

Abbildung 5.4 Messabweichungen der Eingangsmodule für die verwendeten Eingangsbereiche

### 5.2.2 Messsoftware

Auf dem Messgerät ist die Software DEWESoft (Dewesoft d.o.o., Trbovlje, Slovenien) in der Version 7.1.1 installiert. Mit Hilfe dieser und dem optionalen Power Modul lassen sich Messungen nach den Normen IEC 61000-4-30 (Verfahren zur Messung der Spannungsqualität), IEC 61000-4-7 (Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen) sowie IEC 61000-4-15 (Messverfahren Flickermeter) durchführen [31].

Vor Beginn der Messung müssen in der Software im Reiter Setup noch grundlegende Einstellungen der Eingangsmodule, wie Eingangsbereiche und Filtereinstellungen sowie die Einstellungen zu Abtastrate und reduzierter Speicherrate vorgenommen werden (siehe Abbildung 5.5).



DEWESoft X - Datafile: Messung\_TG\_2015\_07\_06\_0006.d7d

Channels | Events | Math | Power | More... | Remove

**General file information**

Sample rate Dynamic: 5000 s/sec; Reduced: 2 sec	Store date and time 06.07.2015 22:21:00	Number of channels 132
Reduced rate 2 sec	Duration 1, 01:13:35	Trigger conditions always slow

**Channel information**

+	Ch. no	C...	Name	Amplifier	Sensor	Rate	Unit
+	---	AI					
+	AI 0		U_L1	DAQP-HV (400 V .. 3 kHz (BU)) SN: 376779		5000	V
+	AI 1		U_L2	DAQP-HV (400 V .. 3 kHz (BU)) SN: 377165		5000	V
+	AI 2		U_L3	DAQP-HV (400 V .. 3 kHz (BU)) SN: 377166		5000	V
+	AI 12		I_L1 (AI 12) I3000s	DAQP-LV (2,5 V .. 3 kHz (BU)) SN: 374490		5000	A
+	AI 13		I_L2 (AI 13) I3000s	DAQP-LV (2,5 V .. 3 kHz (BU)) SN: 374453		5000	A
+	AI 14		I_L3 (AI 14) I3000s	DAQP-LV (2,5 V .. 3 kHz (BU)) SN: 377873		5000	A

Abbildung 5.5 Setup-Einstellung der Eingangskanäle in DEWESoft

Wie bereits in Kapitel 5.1 beschrieben, wird eine Abtastfrequenz von mind. 2 kHz und eine reduzierte Speicherrate von 2 Sekunden benötigt. Hardwaremäßig liegt die nächst größere Abtastfrequenz der Eingangsmodule bei 5 kHz.

An den drei DAQP-HV Modulen, welche als Spannungseingänge dienen, liegt je eine Phasenspannung von etwa 230 V an, es wird daher der nächst größere Eingangsbereich von 400 V eingestellt. Die Einstellungen für die Module zur Strommessung wird in Kapitel 5.2.3 näher erläutert.

Mit Hilfe des Power Moduls lässt sich eine Leistungsmessung für jede Ladestation durchführen. Zusätzlich können mit diesem Modul Parameter wie Oberschwingungsamplituden und –winkel, Flicker oder auch symmetrische Komponenten ermittelt werden. Die Einstellungen für eine dreiphasige Messung einer Ladestation wie sie bei den durchgeführten Messungen verwendet wird ist in Abbildung 5.6 ersichtlich.

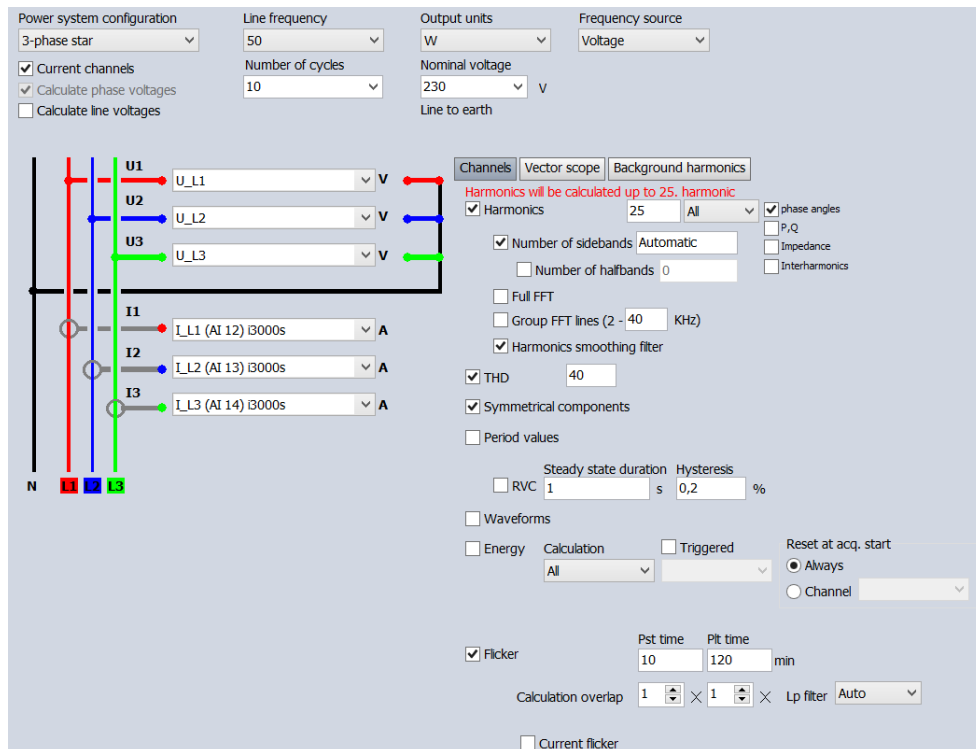


Abbildung 5.6 Einstellungen des Power Moduls in DEWESoft

Die Oberschwingungswinkel für Spannungen und Ströme werden in DEWESoft für alle drei Phasen jeweils auf die Grundschwingungsspannung der Phase L1 bezogen. Für die Auswertung werden die Winkel so umgerechnet, dass sie sich auf die Grundschwingungsspannung der jeweiligen Phase beziehen. Dies erleichtert den Vergleich der Oberschwingungswinkel der einzelnen Phasen.

Eine Eigenheit der verwendeten Software DEWESoft ist das verwendete Winkelsystem. Nacheilende Spannungen oder Ströme werden mit einem positiven Winkel versehen. In Abbildung 5.7 ist ein Vektordiagramm aus der DEWESoft ersichtlich in dem der Spannungs- und Stromzeiger einer induktiven Last zu sehen ist. Man erkennt, dass der Strom der Spannung nacheilt, die Skalierung jedoch im Uhrzeigersinn positiv angesetzt wird. Dieser Unterschied wurde bei der Auswertung der Daten berücksichtigt und die Winkel auf das gebräuchlichere Winkelsystem umgerechnet.

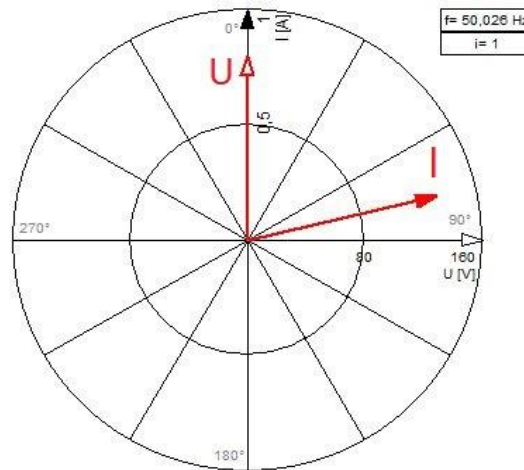


Abbildung 5.7 DEWESoft-Darstellung Zeigerdiagramm einer induktiven Last

Zur weiteren Auswertung der Messdaten werden diese als Matlabdateien (Mathworks Inc., Natick, USA) exportiert. Eine Übersicht über die Zuordnung der in DEWESoft verwendeten Messgrößenbezeichnungen und der jeweiligen Bezeichnung in den Matlabdateien befindet sich im Anhang (Tabelle 10.2).

### 5.2.3 Strommesszangen

Die Messung der Phasenströme erfolgt mit Strommesszangen. Diese liefern am Ausgang eine dem Strom proportionale Spannung, welche vom Leiterstrom, gewählten Eingangsbereich und Modell der Messzange abhängt (Tabelle 5.1). Die Strommesszangen werden wie in Abbildung 5.2 ersichtlich um den zu messenden Außenleiter gelegt, dadurch muss nicht in den Stromkreis eingegriffen werden.

Beim Einbau der Strommesszangen ist auf deren richtige Lage zu achten. Auf den Strommesszangen ist ein Pfeil angebracht, welcher in Richtung des Verbrauchers zeigen muss, da die gemessenen Leistungen sonst das falsche Vorzeichen haben und die Winkel um 180° gedreht sind. Für ein möglichst genaues Messergebnis sollten die Messzangen zentrisch um den zu messenden Leiter angebracht werden, durch die platztechnischen Einschränkungen ist dies jedoch nicht möglich und führt daher zu einem Messfehler von bis zu 2 %.

Modell	Chauvin Arnoux C173	Fluke i3000s
verwendeter Eingangsbereich	100 A	30 A
Ausgangsempfindlichkeit	10 mV/A	100 mV/A
Genauigkeit	1 A ... 10 A: $\leq 0,5 \% + 0,2 \text{ mV}$ 10 A ... 100 A: $\leq 0,3 \%$	$\pm 1 \%$ des Bereichs
Phasenfehler	1 A ... 10 A: $\leq 2^\circ$ 10 A ... 100 A: $\leq 1^\circ$	$< \pm 1^\circ$ (45 Hz bis 65 Hz)
Bandbreite	10 Hz ... 3 kHz	10 Hz ... 50 kHz

Tabelle 5.1 Auflistung der wichtigsten Parameter der Strommesszangen lt. Datenblättern ( [32] [33] )

Für die Messungen werden (auf Grund der benötigten Anzahl) Strommesszangen von zwei unterschiedlichen Herstellern verwendet.

Die Chauvin Arnoux C173 Strommesszange (Chauvin Arnoux, Paris, Frankreich) funktioniert nach dem transformatorischen Prinzip und besitzt vier Eingangsbereiche (1 A / 10 A / 100 A / 1000 A). Sie kann durch Öffnen der unbiegsamen Zangenbacken um den Leiter angebracht werden. Diese Zange ist ideal für Langzeitaufzeichnungen da sie keine Hilfsquelle benötigt.

Die Fluke i3000s Spule (Fluke Inc., Everett, USA) funktioniert nach dem Rogowski-Prinzip und besitzt drei Eingangsbereiche (30 A / 300 A / 3000 A). Der flexible Messkopf lässt sich im Vergleich zum Modell C173 leichter verbauen, dafür sind für den Betrieb des Messverstärkers Batterien nötig, wodurch eine Langzeitaufzeichnung nur eingeschränkt möglich ist.



Abbildung 5.8 Chauvin Arnoux C173 [32]



Abbildung 5.9 Fluke i3000s [33]

In der Messsoftware muss der Eingangskanal für die Strommessung entsprechend konfiguriert werden. Um die größtmögliche Genauigkeit zu erreichen muss der Messbereich des Eingangsmoduls auf den Eingangsbereich der Messzange, das entsprechende Umrechnungsverhältnis sowie den max. zu erwartenden Leiterstrom eingestellt werden.

An den untersuchten Ladesäulen kann dreiphasig mit bis zu 22 kVA geladen werden. Nach Formel (5.1) bedeutet dies einen max. Strom pro Phase von 32 A.

$$I = \frac{S}{U \cdot \sqrt{3}} = \frac{22 \text{ kVA}}{400 \text{ V} \cdot \sqrt{3}} \approx 32 \text{ A} \quad (5.1)$$

Bei der Strommesszange C173 wird daher für den Eingangsbereich ein Effektivwert von 100 A gewählt. Dies bedeutet eine max. Ausgangsspannung von 1 V (5.2).

$$\begin{aligned} 100 \text{ A} &\triangleq 100 \text{ A} \cdot 10 \text{ mV/A} \\ 100 \text{ A} &\triangleq 1 \text{ V} \rightarrow 32 \text{ A} \triangleq 0,32 \text{ V} \end{aligned} \quad (5.2)$$

Für das Eingangsmodul DAQP-LV muss nun ein passender Eingangsbereich gewählt werden. Der in der Software angegebene Spannungsbereich für die Eingangsmodule ist als Spitzenwerte zu verstehen, es muss also der in (5.2) errechnete Effektivwert noch auf seinen Spitzenwert umgerechnet werden.

$$\hat{U} = U_{eff} \cdot \sqrt{2} = 0,32 \text{ V} \cdot \sqrt{2} = 0,45 \text{ V} \quad (5.3)$$

Der in den Einstellmöglichkeiten nächsthöhere Wert ist 0,5 V. In Abbildung 5.10 ist das entsprechende Kanal Setup in der Messsoftware ersichtlich.

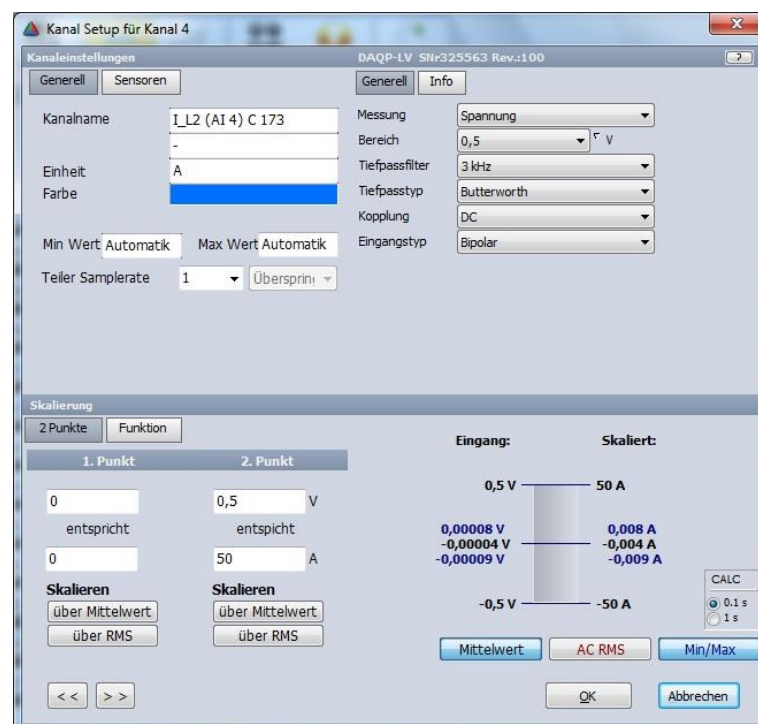


Abbildung 5.10 Kanal Setup für eine Strommesszange

## 5.3 Durchführung der Messungen

### 5.3.1 Fahrzeugflotte

Für die Messungen stehen insgesamt 12 Fahrzeuge (Tabelle 5.2) zur Verfügung, welche aus reinen Elektrofahrzeugen als auch Hybridfahrzeugen bestehen. Die Messungen selbst erfolgen an vier Messplätzen und lassen sich in zwei Schritte unterteilen: Einer Langzeitmessung mit den Fahrzeugen A - G sowie Einzelmessungen mit den Fahrzeugen C, F sowie H - M. Eine genaue Auflistung der durchgeführten Messungen findet sich im Anhang in Tabelle 10.1.

Fahrzeug	Typ d. Fahrzeugs	Messung	Eigentümer
A	Hybrid	Langzeit	Energie Steiermark AG
B	eCar	Langzeit	Energie Steiermark AG
C	eCar	Langzeit	Energie Steiermark AG
D	Hybrid	Langzeit	Energie Steiermark AG
E	Hybrid	Langzeit	Energie Steiermark AG
F	eCar	Langzeit	Energie Steiermark AG
G	eCar	Langzeit	Energie Steiermark AG
H	eCar	Einzel	Energie Steiermark Mobilitäts GmbH
I	eCar	Einzel	Privat
J	eCar	Einzel	Energie Steiermark Mobilitäts GmbH
K	eCar	Einzel	Energie Steiermark Mobilitäts GmbH
L	Hybrid	Einzel	Energie Steiermark AG

Tabelle 5.2 Auflistung der verwendeten Fahrzeuge

### 5.3.2 Messplätze

Die Messungen erfolgen an insgesamt vier unterschiedlichen Messplätzen (Tabelle 5.3), wobei drei davon mit KEBA Ladestationen ausgestattet sind und ein Messplatz mit einer Schnellladestation von Schrack. An dieser kann ein EV wie bei den anderen Ladestationen auch mit Wechselstrom geladen werden (dabei wird das fahrzeuginterne Ladegerät verwendet) oder mittels Gleichstrom, welcher durch das Ladegerät der Schnellladestation zur Verfügung gestellt wird. Für die durchgeführten Messungen wird jedoch nur über den AC-Anschluss geladen.

Messplatz 1 wird für Langzeit- und Einzelmessungen verwendet, die anderen drei Messplätze werden nur für Einzelmessungen verwendet.

Messplatz	Ort der Ladestation	Ladestation	Steckertyp(en)	max. Ladeleistung der Ladestation
Nr.				kW / Stecker
1	Tiefgarage - Graz Leonhardstrasse	KEBA Wallbox	Typ 2	22
2	Carport - Graz Leonhardstrasse	KEBA Wallbox	Typ 2	22
3	Freigelände - Graz Leonhardstrasse	Schrack Schnellladestation	Typ 2 / CCS (Typ 2) CHAdeMO	44 kW / 50 kW 50 kW
4	Knittelfeld Schubertstraße	KEBA Standsäule	Typ 2	22

Tabelle 5.3 Auflistung der Messplätze

Messplatz	KS-Leistung am Verteiler	Verteilerplatz
Nr.	MVA	
1	15	Hauptverwaltung KG
2	9	Hauptverwaltung KG
3	32	ehem. Warte
4	9	Keller Lager / Werkstätte

Tabelle 5.4 Kurzschlussleistungen an den Messplätzen

Die in Tabelle 5.4 angeführten Kurzschlussleistungen wurden mittels der Software NEPLAN (NEPLAN AG, Küsnacht, Schweiz) berechnet.

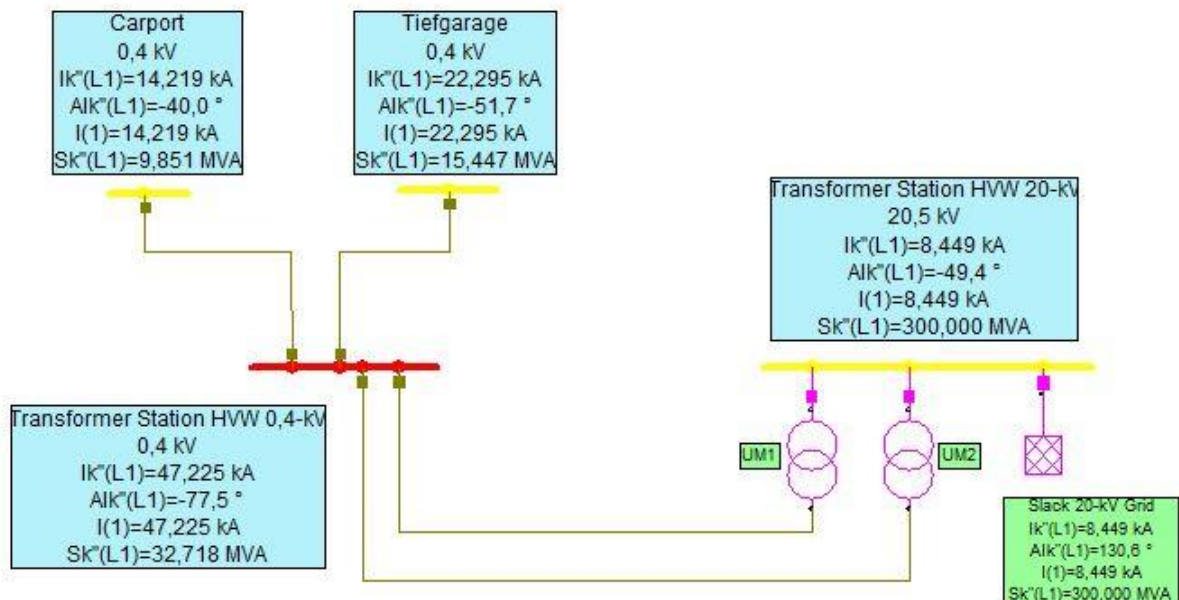


Abbildung 5.11 Berechnung der Kurzschlussleistungen in NEPLAN für die Messplätze 1, 2 und 3

### 5.3.3 Langzeitmessung

Als erstes wird an Messplatz 1 eine Langzeitmessung von etwa vier Wochen mit den Fahrzeugen A - G durchgeführt. Hier werden die EV aus dem Pool der Energie Steiermark AG aufgeladen. Es sind insgesamt zehn Parkplätze mit je einer Ladestation vorhanden, wobei jedem Fahrzeug ein eigener Parkplatz zugeordnet ist. Die Ladestationen sind Wallboxen der Firma KEBA und sind so eingestellt, dass mit maximal 22 kW (3-phasig) geladen werden kann. Da hier bekannt ist, welches EV an welchem Abgang geladen wird, lassen sich bei der Auswertung mögliche Unterschiede der Ladevorgänge der einzelnen Fahrzeuge feststellen und analysieren. Nachteil an dieser Langzeitmessung sind die meist eher kurzen Ladezyklen der EV, da diese vor allem für kürzere Fahrtstrecken benutzt und anschließend sofort wieder aufgeladen werden.

### 5.3.4 Einzelmessungen

Die Einzelmessung dient zur Erhebung von Messdaten längerer Ladezyklen von Elektrofahrzeugen. Dies dient einerseits zum Vergleich mit den meist relativ kurzen Ladezyklen gleicher EV mit der Langzeitmessung sowie zum generellen Vergleich zwischen unterschiedlichen EV. Die Messungen werden an allen vier Messpunkten mit den Fahrzeugen C, F und H - M durchgeführt. Drei dieser Messpunkte sind mit Wallboxen der Firma KEBA ausgestattet und an einem ist eine Schnellladestation der Firma Schrack angeschlossen (Tabelle 5.3). An den Wallboxen kann mit 22 kW, am AC-Anschluss der Schnellladestation mit bis zu 44 kW geladen werden. Für die Messungen werden EV aus dem Pool der Energie Steiermark AG und Energie Steiermark Mobilitäts GmbH verwendet. Die Fahrzeuge werden nach Möglichkeit auf unter 15 % SOC leergefahren und anschließend komplett aufgeladen.

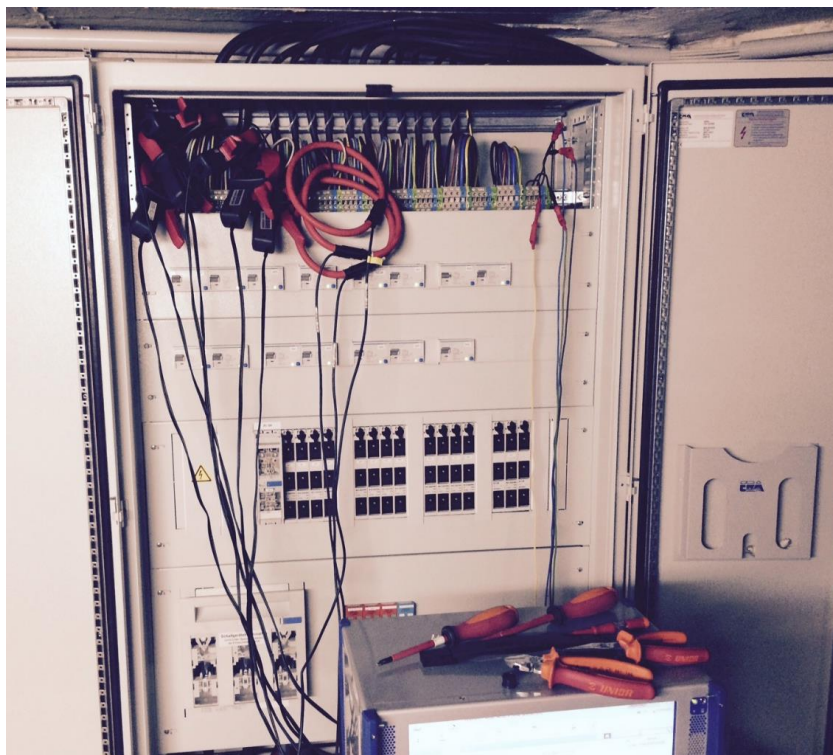


Abbildung 5.12 Messaufbau an Messplatz 2



## 6 Messergebnisse

### 6.1 Ladeverläufe

Bei der Langzeitmessung wurden, bis auf geringfügige Ausnahmen, zwischen den einzelnen Ladezyklen gleicher Elektrofahrzeuge keine wesentlichen Unterschiede in deren Ladeverhalten und Stromaufnahmen festgestellt. Für die meisten Auswertungen wird daher für jedes EV nur ein exemplarischer Messzyklus verwendet (siehe Tabelle 6.1). Die angegebenen Messnummern beziehen sich dabei auf die im Anhang befindliche Tabelle 10.1, in welcher alle aufgezeichneten Messzyklen aufgelistet sind. Wird eine Auswertung auf einen anderen als hier angeführten Ladevorgang bezogen, ist die entsprechende Messnummer aus Tabelle 10.1 angegeben. Die in Tabelle 6.1 aufgelisteten Ladevorgänge fanden an Ladestationen mit einer maximalen Ladeleistung von 22 kW statt.

Messung	Fahrzeug	Ladebeginn	Ladezeit	CC-Zeit	CV-Zeit	Messplatz
Nr.			min	min	min	
5	A	11:27	197	141	57	1
11	B	13:19	68	25	43	1
15	C	18:35	351	335	15	1
16	D	10:13	208	194	14	1
23	E	13:32	90	82	8	1
29	F	14:58	190	54	136	1
32	G	09:04	78	66	13	1
36	H	09:22	262	256	7	2
37	I	10:40	65	65	0	4
38	J	12:50	52	45	7	4
39	J	05:46	202	200	2	2
40	K	18:16	258	255	3	2
41	L	10:40	650	650	0	4

Tabelle 6.1 Für Auswertung verwendete Ladezyklen der einzelnen EV

Aus Messergebnissen zeigt sich, dass die meisten Fahrzeuge einphasig laden oder symmetrische dreiphasige Verbraucher darstellen, daher werden die meisten Betrachtungen nur für den Außenleiter L1 vorgenommen. Spannungen und Ströme werden als Stranggrößen angegeben, Leistungen als Gesamtwerte aller drei Phasen, Winkel beziehen sich auf die Grundschiwingung der jeweiligen Strangspannung.

Der typische Ladeverlauf eines Elektrofahrzeugs, mit CC- und CV-Phase, wurde in Kapitel 4.5 gezeigt. Anhand der Messungen kann gezeigt werden, dass etwa zwei Drittel der untersuchten EV einen solchen Verlauf aufweisen (Abbildung 6.1a). Die restlichen Fahrzeuge besitzen eine ähnliche CC-Phase, allerdings einen anderen Verlauf in der CV-Phase. Diese ist entweder nicht vorhanden oder besteht, wie in Abbildung 6.1b zu sehen, aus einer zweiten CC-Phase, in welcher jedoch ein wesentlich kleinerer Ladestrom fließt.

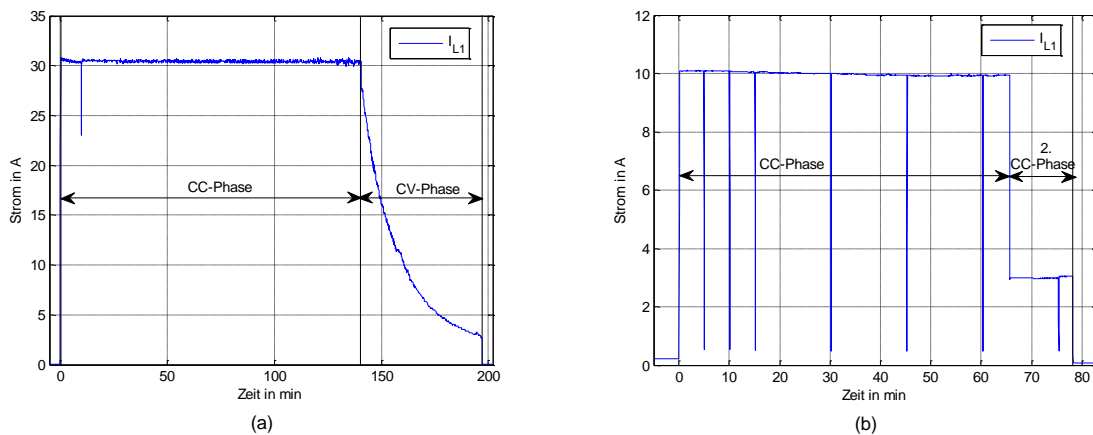


Abbildung 6.1 Ladeströme mit CC- und CV-Phase (a) EV A (b) EV G

EV I stellte zudem in der CV-Phase von 3-phasiger Ladung auf eine 2-phasige Ladung um (Abbildung 6.2).

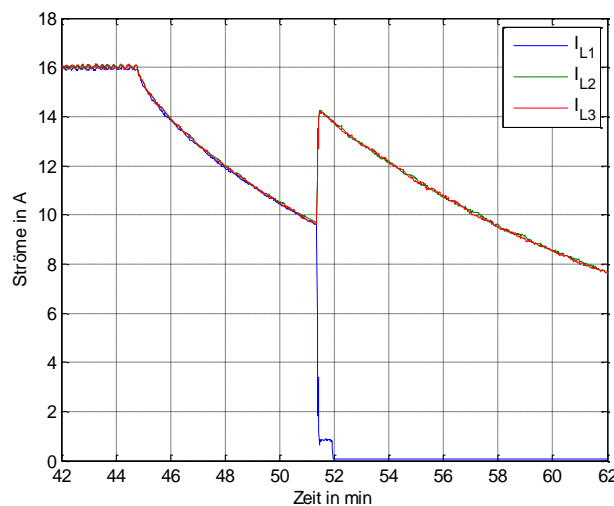


Abbildung 6.2 Ladeströme des Fahrzeug I im Übergang von CC- auf CV-Ladung

Da die aufgenommene Leistung jedoch gleich bleibt, bedeutet dies eine Erhöhung der Ströme in den beiden anderen Phasen um 50 %:

$$\begin{aligned}
 P_{2phasig} &= P_{3phasig} \\
 2 \cdot I_{2phasig} \cdot U_{Phase} &= 3 \cdot I_{3phasig} \cdot U_{Phase} \\
 I_{2phasig} &= 1,5 \cdot I_{3phasig}
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

In Abbildung 5.5b sieht man wiederkehrende Leistungseinbrüche, welche abhängig vom Fahrzeug in der CC- oder CV-Phase mit unterschiedlicher Häufigkeit und Intensität auftreten können. Meist treten diese nur relativ selten auf und dienen meist zur Feststellung des Ladezustands des Akkus (siehe Kapitel 4.5). Bei drei der untersuchten EV treten diese

Leistungseinbrüche, wie für EV E in Abbildung 6.3 beispielhaft dargestellt, jedoch in größerem Ausmaß auf. Die Intensität, Anzahl und Dauer dieser Einbrüche ist in Tabelle 6.3 aufgelistet.

EV	$t$ <i>min</i>	$n$	$\Delta I$ <i>A</i>	Messung Nr.
E	10	86	10	24
F	26	18	26	30
G	70	7	10	34

Tabelle 6.2 Einbrüche im Ladestrom der untersuchten Fahrzeuge E, F und G

Diese Leistungseinbrüche haben Spannungsschwankungen zur Folge und können bei geringer Netzkurzschlussleistung eine relevante Flickerbelastung verursachen. Bei den Messungen wurde aufgrund der hohen Kurzschlussleistung ( $> 9$  MVA) keine nennenswerte Auswirkung auf den Lang- oder Kurzzeitflicker im Netz beobachtet. Die Leistungseinbrüche bei EV F traten nur bei Ladung an einer Schnellladestation auf.

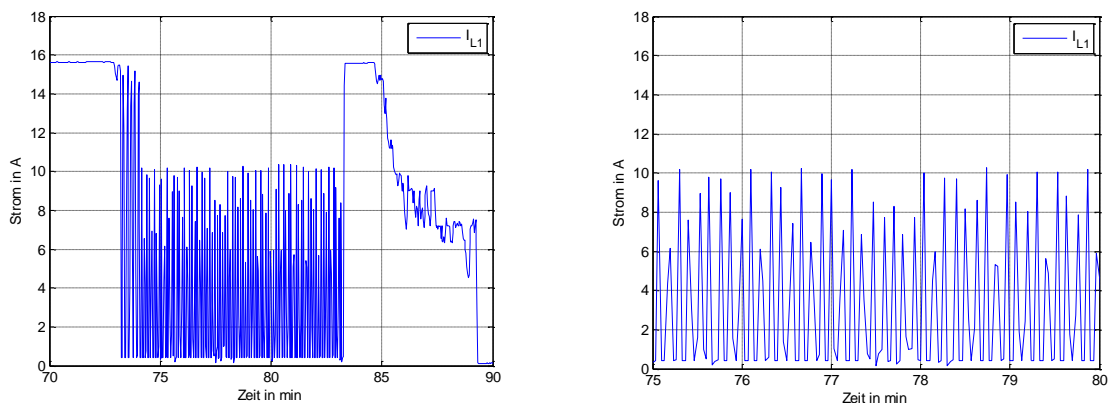


Abbildung 6.3 Ladestrom von EV E bei Messung Nr. 24 mit Leistungseinbrüchen am Ende der CC-Phase

## 6.2 Leistungen

Leistungen und Ströme werden nur für die CC-Phase des Ladevorgangs ausgewertet. In der CV-Phase sind Ströme und Leistungen geringer als in der CC-Phase und nicht mehr konstant, zudem dauert diese Phase bei jedem Ladevorgang unterschiedlich lange. Eine Mittelwertbildung während der CV-Phase würde für jeden Ladezyklus ein anderes Ergebnis liefern und wäre daher auch nicht aussagekräftig. Um keine Verfälschung durch ein- und ausschaltbedingte Vorgänge zu erhalten, werden nur Messdaten ab 10 Sekunden nach Beginn, bis 10 Sekunden vor Ende der CC-Phase berücksichtigt.

In Tabelle 6.3 sind die Mittelwerte von Schein-, Blind-, Wirkleistung, des Verschiebungsfaktors sowie des Phasenstroms während der CC-Phase aufgelistet. Zusätzlich ist noch ausgeführt auf wie vielen und welchen Phasen das EV lädt. Die angegebenen Mittelwerte weichen um max. 3 % von jenen der Maximalwerte ab.

EV	$S$	$P$	$Q$	$\cos\varphi$	$I_{ref}$	$n_{Phasen}$	verwendete Phasen
	<i>kVA</i>	<i>kW</i>	<i>kVAr</i>		<i>A</i>		Nr.
A	7,28	7,28	0,05	1,00	30,4	1	L1
B	3,20	3,19	-0,21	1,00	13,4	1	L1
C	3,15	3,08	-0,54	0,99 <sub>cap</sub>	13,1	1	L1
D	3,40	3,39	-0,16	1,00	14,2	1	L1
E	3,78	3,77	-0,25	1,00	15,7	1	L1
F	22,49	21,82	-4,70	0,97 <sub>cap</sub>	31,3	3	L1 / L2 / L3
G	2,36	2,35	-0,16	0,99 <sub>cap</sub>	9,9	1	L1
H	2,46	2,44	-0,16	1,00	10,3	1	L1
I	11,40	11,29	-1,52	0,99 <sub>cap</sub>	16,0	3 (2)	(L1) / L2 / L3
J	2,39	2,33	-0,44	0,98 <sub>cap</sub>	9,9	1	L1
K	3,63	3,60	-0,43	0,99 <sub>cap</sub>	15,1	1	L1
L	3,54	3,50	-0,54	0,99 <sub>cap</sub>	14,9	1	L1

Tabelle 6.3 Mittelwerte der Leistungen der untersuchten Fahrzeuge an einer 22 kW-Ladestation

Obwohl an den Ladesäulen mit bis zu 22 kVA (3x32 A) geladen werden könnte, laden die meisten der untersuchten EV mit weniger als 3,8 kVA bzw. 16 A. Zudem laden nur zwei der EV dreiphasig.

Bei Fahrzeug J, stellte das Bordladegerät in der CV-Phase, bei einem Strom von etwa 10 A, von drei- auf zweiphasige Ladung um (siehe Abbildung 6.2). Ob dieses EV bei einer noch geringeren Ladeleistung auf einphasige Ladung umstellt, konnte auf Grund fehlender Messdaten nicht festgestellt werden.

Durch die gleichzeitige Ladung mehrerer Fahrzeuge oder eines mit größerer Leistung, wie z.B. EV A, kann es zu Problemen in Bezug auf Spannungsunsymmetrie kommen, vor allem, da alle untersuchten EV auf Phase 1 laden. Auf diese Problematik wird in Kapitel 7.3 näher eingegangen.

Die Ladeströme der EV aus der Langzeitmessung sind bis auf bei Fahrzeug F, bei jedem Ladevorgang annähernd gleich. Bei Fahrzeug F ist der Ladestrom während der CC-Phase eines Ladezyklus zwar annähernd konstant, schwankt jedoch bei unterschiedlichen Ladevorgängen zwischen 14 – 32 A und ist von unterschiedlichen Faktoren wie z.B. dem Start-SOC abhängig (siehe Kapitel 4.5).

Bei den verwendeten Ladestationen handelt es sich um 22 kW Wallboxen, Fahrzeug F bezieht mit 22,5 kVA sogar eine höhere Leistung. Dies liegt daran, dass die Ladestationen nicht die maximale Leistung vorgeben mit der geladen werden kann sondern den max. Ladestrom, in diesem Fall 32 A. Da während den Messungen an den Ladestationen, aufgrund der Nähe zur Transformatorstation, eine Phasenspannung von etwa 240 V herrschte, und diese somit um 10 V über der Nennspannung liegt, ist diese leichte Abweichung erklärbar.

Bei den meisten Elektrofahrzeugen handelt es sich um ohmsche oder ohmsch-kapazitive Verbraucher, was man an dem negativen Vorzeichen der Blindleistung erkennen kann. Die Blindleistung ist meist geringer als 20 % der Wirkleistung, was sich in einem  $\cos \varphi \approx 1$  widerspiegelt. Die Blindleistung verringert sich, wie in Abbildung 6.4b beispielhaft zu sehen, in der der CV-Phase zwar nicht gleich stark wie die Wirkleistung aber auch in dieser Phase haben die meisten EV immer noch einen Verschiebungsfaktor von annähernd 1.

Eine Ausnahme zum meist ohmsch-kapazitiven Verhalten der meisten Fahrzeuge bildet EV A. Wie man in Abbildung 6.4a sieht, hat dieses EV während der CC-Phase einen geringen induktiven Stromanteil und während der CV-Phase einen kapazitiven Anteil. Der Blindleistungsbedarf ist bei diesem EV im Vergleich zu den anderen sehr gering. Durch einen möglichen Phasenfehler von bis zu  $1^\circ$  bei den Strommesszangen kann bei EV A jedoch keine eindeutige Aussage getroffen werden, ob der aufgenommene Strom induktiv oder kapazitiv ist.

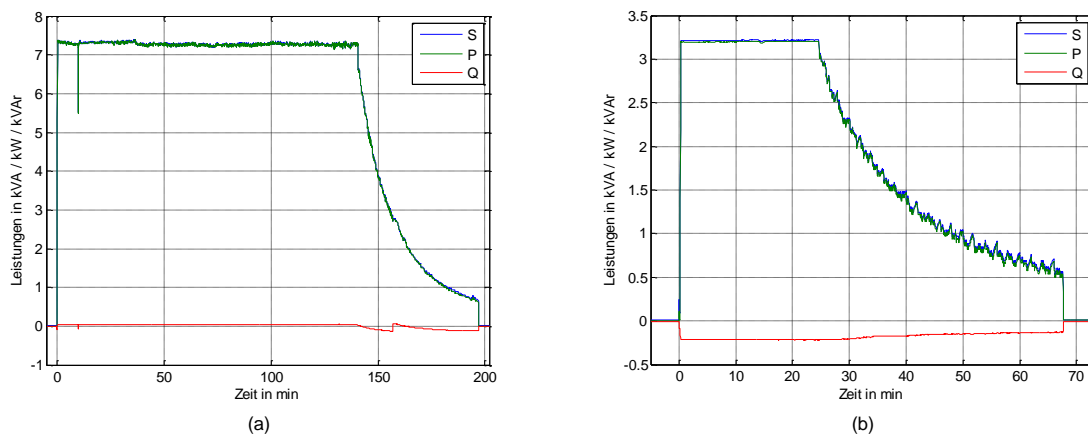


Abbildung 6.4 Verlauf der Ladeleistungen (a) EV A (b) EV B

In Tabelle 6.4 sind die Mittelwerte der Leistungen und des Phasenstromes von Fahrzeug F bei Ladevorgängen mit unterschiedlich hohen Ladeströmen aufgelistet. Bei Messung Nr. 1 wurde an einer Schnellladestation (max. 44 kW) bei den anderen beiden an einer 22 kW Wallbox geladen. Die Schnellladestation hat im Vergleich zur Wallbox eine nicht zu vernachlässigbare Leerlaufleistung ( $Q_{LL} = -680 \text{ VAr} / P_{LL} = 60 \text{ W}$ ). Dies wurde in den Ergebnissen durch Abzug dieser Leerlaufwerte bereits berücksichtigt.

Messung	$S$	$P$	$Q$	$\cos \varphi$	$I_{ref}$	Messstelle
Nr.	$kVA$	$kW$	$kVAr$		$A$	Nr.
30	36,50	36,34	-3,47	0,99 <sub>cap</sub>	51,8	4
29	22,49	21,82	-4,70	0,97 <sub>cap</sub>	31,3	1
25	10,57	8,19	-6,43	0,77 <sub>cap</sub>	14,8	1

Tabelle 6.4 Mittelwert der Leistungen des Fahrzeug F bei unterschiedlichen Ladeströmen

Man erkennt, dass mit geringerem Ladestrom die Blindleistung betragsmäßig nicht ab sondern zunimmt. Somit verringert sich auch der Verschiebungsfaktor mit Reduktion der Ladeleistung von 0,99 auf bis zu 0,77. In Abbildung 6.5 erkennt man zudem, dass sich die Blindleistung im CV-Bereich nicht wie bei den meisten anderen EV verringert, sondern ansteigt. Dies führt am Ende der CV-Phase zu einem sehr schlechten Verschiebungsfaktor von etwa 0,25 (bei  $I_{ref} = 14,8 A$  während der CC-Phase).

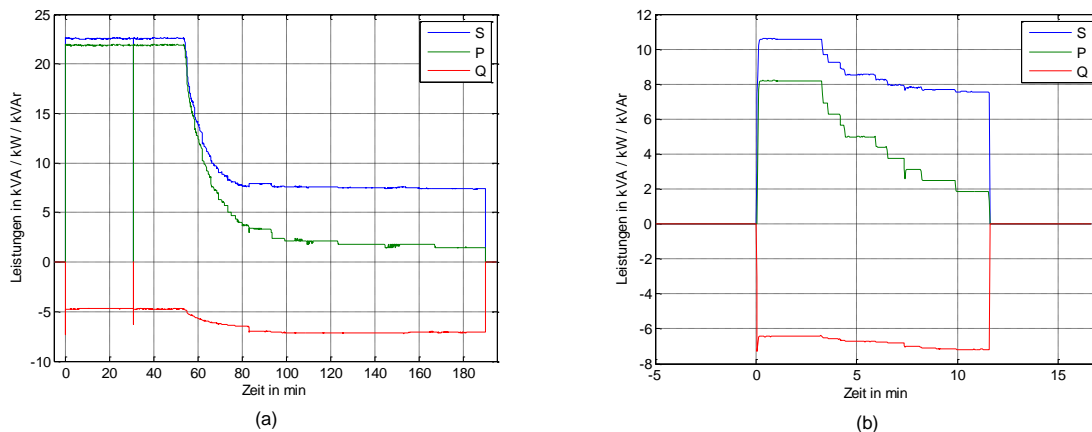


Abbildung 6.5 Verlauf der Ladeleistungen von Fahrzeug F bei unterschiedlichen Ladevorgängen  
(a)  $I_{Lade} = 31,3 A$  (b)  $I_{Lade} = 14,8 A$

### 6.3 Oberschwingungsströme

Bei Oberschwingungen werden Amplituden und Winkel nur für jene Harmonische angegeben, welche von relevanter Bedeutung sind. Dies sind im Bereich von Elektrofahrzeugen, wie bei den meisten anderen Verbrauchern mit Leistungselektronik, solche mit ungerader Ordnungszahl und wie sich anhand der Messungen zeigt, teilweise auch jene mit gerader Ordnungszahl. Für diese wird nur die zweite Harmonische angegeben, da höhere geradzahlige OS lediglich im unteren mA-Bereich auftreten.

Der Beobachtungszeitraum für Oberschwingungsströme, die Oberschwingungs-Gesamtverzerrung ( $TDH_i$ ) sowie den gesamten Oberschwingungsstrom ( $THC$ ) wird in Anlehnung an IEC 61851-21-1 gewählt. Der darin geforderte Beobachtungszeitraum liegt zwischen von 20 % bis 80 % SOC. Da bei den Messungen kein Zugriff auf den SOC-Status der Elektrofahrzeuge möglich war und bei 80 % SOC typischerweise das Ende der CC-Phase liegt, wird als Beobachtungszeitraum die CC-Phase verwendet. Um keine Verfälschung durch ein- und ausschaltbedingte Vorgänge zu erhalten, werden nur Messdaten ab 10 Sekunden nach Beginn, bis 10 Sekunden vor Ende der CC-Phase berücksichtigt.

Bisherige Erkenntnisse ([8] [5]) zeigen, dass eine Betrachtung der Oberschwingungsströme bis zur 20. Harmonischen ausreichend ist. Diese Annahme soll zu Beginn der Messungen anhand von zwei Fahrzeugen bestätigt werden. Dazu wurden die Oberschwingungsströme dieser beiden EV bis zur 40. Ordnungszahl gemessen und in Tabelle 6.5 eingetragen.

EV	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$	$I_{15}$	$I_{17}$	$I_{19}$	$I_{21}$	$I_{23}$	$I_{25}$	$I_{27}$	$I_{29}$	$I_{31}$	$I_{33}$	$I_{35}$	$I_{37}$	$I_{39}$	
	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A	A
A	0,89	0,31	0,36	0,40	0,10	0,33	0,22	0,15	0,11	0,08	0,08	0,03	0,03	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04	0,05	0,06
I	0,22	0,36	0,13	0,29	0,37	0,04	0,16	0,18	0,13	0,12	0,06	0,03	0,08	0,06	0,02	0,03	0,04	0,02	0,01	0,01

Tabelle 6.5 Mittelwerte von Stromüberschwingungen der Fahrzeuge A und I

Dabei zeigt sich, dass Amplituden von Harmonischen mit einer höheren Ordnungszahl als 23 sehr gering sind. Diese werden daher bei den weiteren Messungen und Analysen nicht berücksichtigt. Inwieweit die Amplituden von Oberschwingungen, aus messtechnischer Sicht, überhaupt zu berücksichtigen sind, kann durch Betrachtung des FFT-Spektrums, eines ausgewählten Ladevorgangs, in Abbildung 6.6 festgestellt werden.

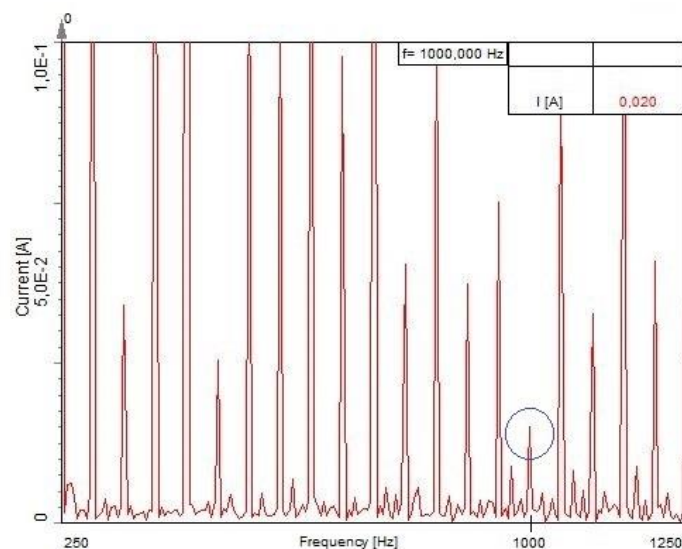


Abbildung 6.6 Noise floor im FFT-Spektrum

Im Spektrum ist neben den Anteilen der einzelnen Harmonischen auch der noise floor erkennbar. Dieser setzt sich aus mehreren Komponenten wie dem thermischen- oder Rosa-Rauschen zusammen und wird z.B. von der Messelektronik verursacht [34]. Ist eine Amplitude deutlich vom noise floor zu unterscheiden, wird diese für die weiteren Berechnungen verwendet. In Abbildung 6.6 ist die Amplitude des Frequenzanteils von 1000 Hz mit einem blauen Kreis markiert. Diese hebt sich mit 0,02 A noch deutlich vom noise floor ab. Die untere Grenze für angegeben OS-Ströme wird daher mit 0,02 A festgelegt.

Aus normativer Sicht werden für Geräte mit einem Eingangsstrom  $\leq 16$  A je Leiter, Oberschwingungsströme welche kleiner als 0,6 % des gemessenen Eingangsstromes oder kleiner als 0,05 A sind, nicht berücksichtigt [11]. Für Geräte mit einem Eingangsstrom  $> 16$  A und  $\leq 75$  A je Leiter werden Oberschwingungsströme welche kleiner als 1 % des gemessenen Eingangsstromes sind, nicht mehr berücksichtigt [14].

Ob eine Mittelwertbildung aufgrund möglicher Streuung der Daten auch bei Oberschwingungen zulässig ist, wird mittels eines Boxplotdiagramms festgestellt. Mit Hilfe dieser Darstellung lässt sich ein schneller Eindruck über die Streuung von Messdaten gewinnen. Beispielhaft für EV I siehe Abbildung 6.7.

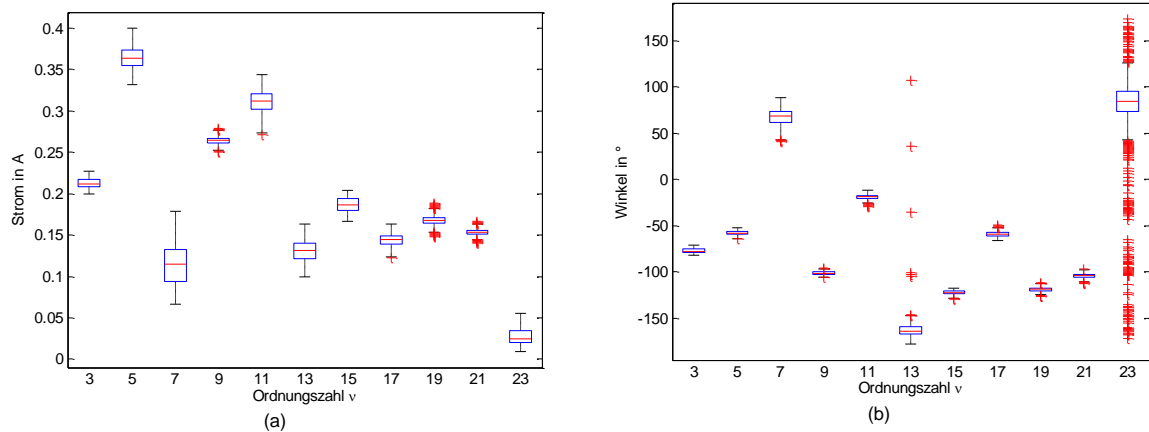


Abbildung 6.7 Streuung der Oberschwingungsströme EV I (a) OS-Amplituden (b) OS-Winkel

Die blaue Box entspricht dabei jenem Bereich, in dem 50 % der Messdaten liegen. Der darin befindliche rote Strich gibt den Median an. Die Whiskers geben den kleinsten bzw. größten Wert des Datensatzes an und in roten Kreuzen sind die Ausreißer markiert [35].

Wird im Boxplot eine größere Streuung der Daten festgestellt wird zudem ein Polarplot angefertigt.

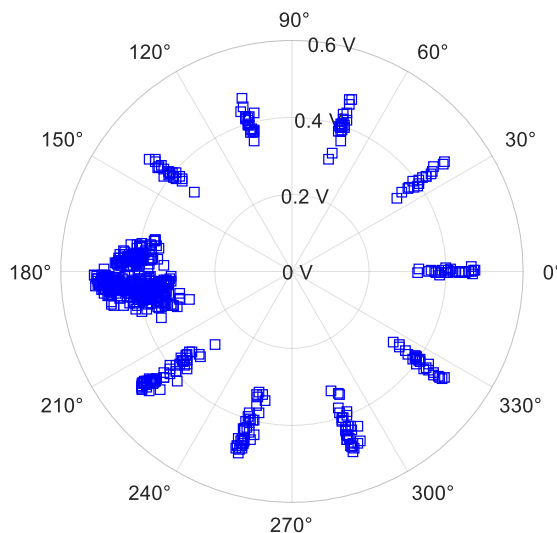


Abbildung 6.8 Messdatenfehler durch Mittelwertbildung

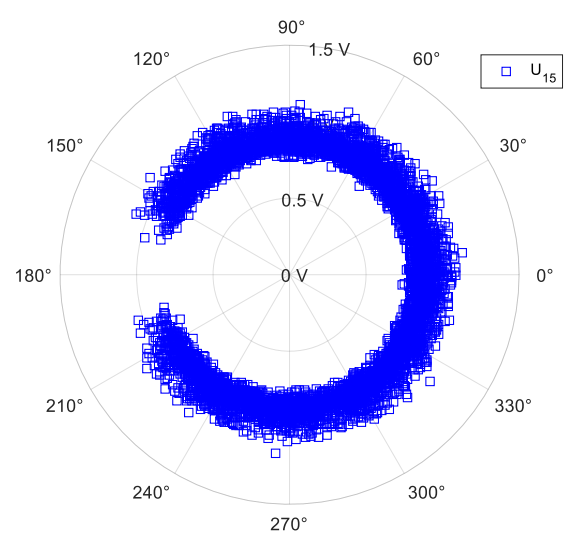


Abbildung 6.9 Drift des Winkels bei zu geringer Abtastrate



Eine zu große Streuung konnte dabei meist auf zwei Faktoren zurückgeführt werden:

Bei der Auswertung werden die von DEWESoft bereitgestellten reduzierten Messdaten verwendet. Wenn die zu reduzierenden Daten im Bereich von  $180^\circ$  liegen, kommt es aufgrund der geräteinternen arithmetischen Mittelwertbildung zu vereinzelt Ausreißern (siehe Abbildung 6.8). Diese Ausreißer stellen jedoch weniger als 1 % der Messdaten dar und brauchen daher auch nicht näher berücksichtigt werden.

Anders sieht dies bei Streuung der Daten wie sie in Abbildung 6.9 zu sehen ist aus. Diese Form der Streuung tritt nur bei OS-Winkeln mit einer Ordnungszahl größer 11 auf wenn am Messgerät eine Abtastfrequenz von 5 kHz eingestellt ist. Die Ursache dafür konnte nicht weiter geklärt werden ist jedoch auf den Messgerätehersteller zurückzuführen. Für die Auswertung wurden diese Oberschwingungswinkel, für Messungen die mit einer Abtastfrequenz von 5 kHz stattfanden, daher nicht berücksichtigt.

### 6.3.1 Übersicht Oberschwingungsströme

Eine Auflistung von Amplituden und Winkeln von Oberschwingungsströmen, dem Gesamtüberschwingungsstrom sowie der Oberschwingungs-Gesamtverzerrung aller für diese Arbeit zur Verfügung stehenden Elektrofahrzeuge findet sich in Tabelle 6.6.

EV	A		B		C		D		E		F	
$THD_i$	4,7 %		7,3 %		12,0 %		7,1 %		3,2 %		11,6 %	
$THC$	1,44 A		0,96 A		1,56 A		0,99 A		0,50 A		3,61 A	
Ordnungs- zahl	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$
v	A	°	A	°	A	°	A	°	A	°	A	°
1	30,40	0	13,36	4	13,01	10	14,16	3	15,72	4	31,07	12
2	0,94	91	-	-	-	-	-	-	-	-	0,13	-108
3	0,71	165	0,89	-159	1,54	-110	0,80	-176	0,31	-128	0,18	57
5	0,36	-103	0,26	-118	0,15	-112	0,46	-149	0,30	-113	1,86	-162
7	0,10	-147	0,04	-127	0,15	4	0,15	104	0,07	-53	2,48	69
9	0,48	167	0,15	-176	0,06	-128	0,16	127	0,11	-167	0,18	146
11	0,16	162	0,06	-162	0,05	-74	0,11	10	0,06	118	0,62	-41
13	0,24	-	0,09	-	0,06	-	0,05	-	0,08	-	0,32	-
15	0,25	-	0,11	-	0,05	-	0,11	-	0,11	-	0,12	-
17	0,15	-	0,05	-	0,04	-	0,11	-	0,08	-	0,93	-
19	0,05	-	0,02	-	0,02	-	0,06	-	0,06	-	0,95	-
21	0,10	-	0,03	-	0,05	-	0,04	-	0,05	-	0,10	-
23	0,13	-	0,07	-	0,11	-	0,09	-	0,10	-	0,26	-

EV	G		H		I		J		K		L	
$THD_i$	4,1 %		10,0 %		4,5 %		8,4 %		5,2 %		4,2 %	
$THC$	0,40 A		1,02 A		0,72 A		0,83 A		0,77 A		0,63 A	
Ordnungs- zahl	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$
v	A	°	A	°	A	°	A	°	A	°	A	°
1	9,89	4	10,27	4	15,94	7	9,91	11	15,09	7	14,87	9
2	0,05	-	-	-	0,15	68	0,02	-	0,02	-	0,02	-
3	0,26	6	0,95	-176	0,21	-77	0,23	-73	0,18	-76	0,17	-62
5	0,18	-62	0,35	-172	0,36	-58	0,37	-41	0,31	-82	0,22	-13
7	0,13	-16	0,11	81	0,11	67	0,20	11	0,16	2	0,11	78
9	0,07	-56	0,07	-	0,26	-101	0,27	-57	0,21	-80	0,29	-66
11	0,11	-30	0,04	72	0,31	-19	0,21	1	0,13	-23	0,22	34
13	0,07	-	0,04	-	0,13	-163	0,13	-	0,20	-	0,24	-132
15	0,03	-	0,04	-	0,19	-122	0,19	-	0,20	-	0,21	-118
17	0,04	-	0,02	-	0,14	-59	0,21	-	0,21	-	0,06	2
19	0,07	-	0,05	-	0,17	-119	0,32	-	0,30	-	0,20	-105
21	0,03	-	0,02	-	0,15	-104	0,14	-	0,12	-	0,09	-159
23	0,02	-	0,05	-	0,03	85	0,32	-	0,38	-	0,12	58

Tabelle 6.6 Mittelwerte relevanter Stromüberschwingungen aller untersuchten Fahrzeuge

Die einzelnen Fahrzeuge weisen für Amplituden und Winkel der Oberschwingungsströme für gleiche Ordnungszahlen teilweise sehr starke Unterschiede auf, auch wenn diese einen ähnlichen Grundschwingungsstrom haben. Der Grund für diese Unterschiede liegt in den verwendeten Topologien der Stromrichter sowie deren Ansteuerung.

Die Amplituden der Oberschwingungsströme nehmen bei vielen Fahrzeugen mit steigender Ordnungszahl ab, können wie bei den EV J und K aber auch bei höheren Ordnungszahlen verhältnismäßig große Werte annehmen. Eine, für die Ab- und Zunahme der Amplituden, leichter verständliche grafische Darstellung befindet sich im Anhang.

Bedeutende geradzahlige Harmonische kommen nur bei EV B vor. Diese treten auf, wenn die Wechselgröße wellenunsymmetrisch ist. In Abbildung 6.10 ist der zeitliche Verlauf des von EV B aufgenommen Stroms eingezeichnet. Man erkennt darin eine geringe Asymmetrie von positiver und negativer Halbwelle, speziell zu Beginn der jeweiligen Halbwelle. Bei Stromrichtern kann dies vorkommen, wenn die Spannungsmessung fehlerbehaftet ist und unsymmetrische Sollwertvorgaben erfolgen [36].

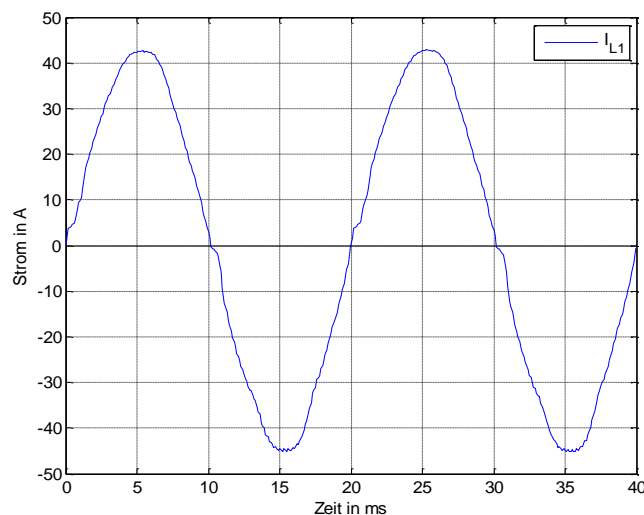


Abbildung 6.10 Zeitverlauf des Stroms von EV A

### 6.3.2 Oberschwingungsspannungen

Der Stromverlauf von Elektrofahrzeugen ist zum Teil auch von den Merkmalen der Versorgungsspannung abhängig. Es wird im Folgenden daher ein kurzer Überblick über die relevantesten Parameter der Spannung an den Messplätzen angegeben.

Da die Messplätze 1, 2 und 3 an der derselben Sammelschiene angeschlossen sind, wird stellvertretend für diese nur Messplatz 1 betrachtet (siehe Abbildung 6.11). Eine detaillierte Beschreibung der Messplätze findet sich in Kapitel 5.3.2. Eine Übersicht der wichtigsten Messdaten und des betrachteten Zeitraumes findet sich in Tabelle 6.7. Für Oberschwingungsspannungen und den Gesamtoberschwingungsgehalt der Spannung werden wie in der EN 50160 beschrieben, 10-Minuten-Mittelwerte der Spannungseffektivwerte gebildet.

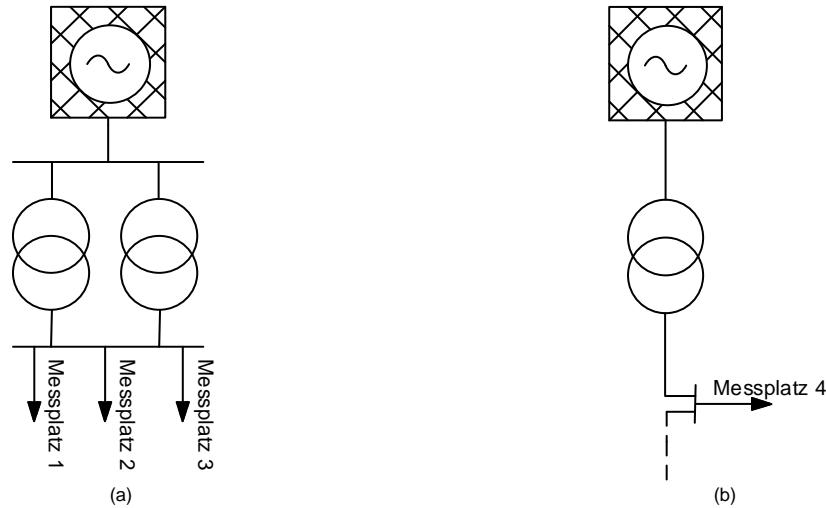


Abbildung 6.11 Übersicht der Messplätze (a) Messplatz 1, 2 und 3 (b) Messplatz 4

Messplatz	$U_{Phase}$ V	$THD_u$ %	Datum	Uhrzeit
1	239,6	1,88	28.06.2015	14:15
4	237,4	2,24	02.10.2015	10:52

Tabelle 6.7 Effektivwerte der wichtigsten Spannungsparameter

In Abbildung 6.12 sieht man in Blau die in EN 50160 festgelegten Grenzwerte von Oberschwingungsspannungen in Prozent der Grundschwingung, in Rot jene Werte, welche an den betrachteten Messplätzen gemessen wurden.

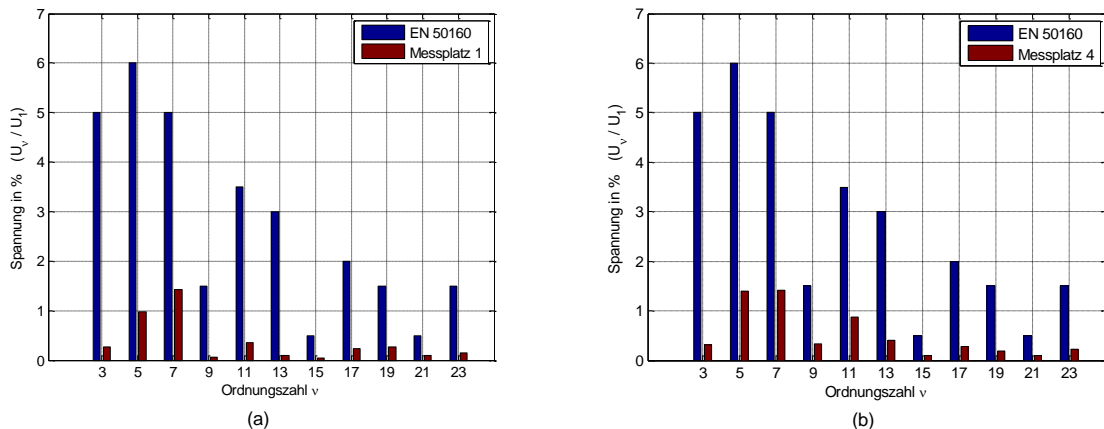


Abbildung 6.12 Grenzwertausschöpfung von Oberschwingungsspannung nach EN 50160 (a) Messplatz 1 (b) Messplatz 4

Die Amplituden der Oberschwingungsspannungen sind an Messplatz 4 (Abbildung 6.12b) zwar leicht höher als an Messplatz 1, liegen jedoch in beiden Fällen deutlich unter den geforderten Grenzwerten. Auch der in Tabelle 6.7 aufgelistete  $THD_u$ , liegt deutlich unter dem Grenzwert von 8 %, auch wenn nur Harmonische bis zur 23. Ordnung betrachtet werden. Diese geringen Werte lassen sich auch auf eine verhältnismäßig hohe Kurzschlussleistung

von 9 bis 33 MVA an den Messpunkten zurückführen, welche dadurch zustande kommt, dass diese direkt am Niederspannungstransformator angeschlossen sind.

Aus dieser Transformatornähe resultiert auch eine etwas höhere Versorgungsspannung, welche etwa um 4 % über der Nennspannung von 230 V liegt. Elektrofahrzeuge können in erster Näherung als Stromquellen betrachtet werden, eine höhere Versorgungsspannung führt daher auch zu einer höheren Leistungsaufnahme.

Die Messpunkte 1 und 4 unterscheiden die Lage und die im dahinterliegenden Niederspannungsnetz zu versorgenden Verbraucher. Messpunkt 1 befindet sich in einem städtischen Netz, hinter zwei parallel geschalteten Transformatoren, welche ein Bürogebäude versorgen, wohingegen Messpunkt 2 sich in einem ländlichen Netz befindet, in welchem hauptsächlich Wohngebäude versorgt werden. Aus den im jeweiligen Netz typischerweise vorkommenden Verbrauchern und deren spezifischen Stromaufnahme, resultieren auch unterschiedliche Winkel der Oberschwingungen. In Abbildung 6.13 wurden alle Endpunkte der komplexen Stromzeiger, der 5. Harmonischen, für jeden Außenleiter während des Beobachtungszeitraumes eingezeichnet.

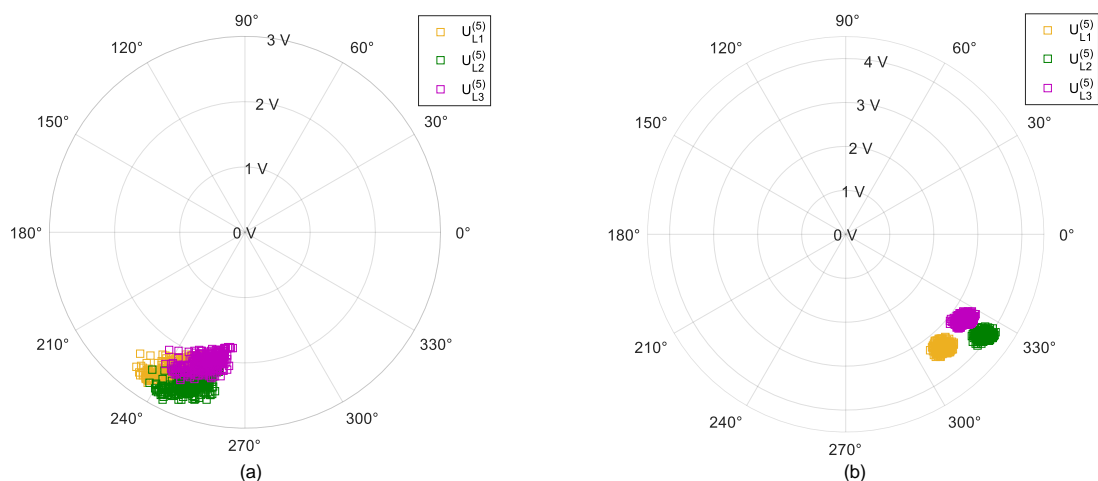


Abbildung 6.13 Lage der 5. Oberschwingungsspannung (a) Messplatz 1 (b) Messplatz 4

Die Oberschwingungen in den drei Außenleitern sind in Betrag und Winkel annähernd gleich, unterscheiden sich jedoch an den beiden Messplätzen. Die Winkel der 5. Harmonischen für Messplatz 1 (Abbildung 6.13a) befinden sich im 3. Quadranten, jene von Messplatz 2 (Abbildung 6.13b) im 4. Quadranten. Die Winkel der Oberschwingungsspannungen sind jedoch nicht als konstant anzusehen und unterliegen tages- und wochenzeitlichen Schwankungen. Die Winkellage der OS-Spannungen hat, wie in Kapitel 6.3.5 näher ausgeführt, einen Einfluss auf die Winkel der Oberschwingungsströme.

### 6.3.3 Unterschiede in den Außenleitern 3-phasig ladender EV

In Tabelle 6.8 sind Grund- und Oberschwingungsströme der beiden für die Messungen zur Verfügung stehenden 3-phasig ladender Elektrofahrzeuge, für alle drei Außenleiter aufgelistet.

EV	I						F					
	L1		L2		L3		L1		L2		L3	
	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$
Phase	A		°		A		°		A		°	
Ordnungszahl	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$
v	A	°	A	°	A	°	A	°	A	°	A	°
1	15,94	7,00	16,02	7	16,01	89	31,07	12	30,99	12	30,98	12
3	0,21	-77	0,22	-84	0,23	-89	0,18	57	0,07	-137	0,15	-123
5	0,36	-58	0,36	-44	0,31	-51	1,86	-162	1,67	-163	1,81	-169
7	0,11	67	0,05	86	0,09	99	2,48	69	2,43	68	2,44	70
9	0,26	-101	0,27	-90	0,25	-96	0,18	146	0,10	28	0,17	-51
11	0,31	-19	0,23	-16	0,26	-14	0,62	-41	0,72	-31	0,58	-26

Tabelle 6.8 Grund- und Oberschwingungsströme 3phasiger EV

Die Amplituden und Winkel in den drei Außenleitern weisen für fast alle Ordnungszahlen nur geringe Abweichungen auf. Eine Ausnahme bilden für EV F die Oberschwingungswinkel 3. und 9. Ordnung. Wie in Tabelle 6.9 zu sehen ist, weisen diese trotz ähnlicher OS-Spannungswinkel, in zumindest zwei Phasen, stark unterschiedliche Winkel bei den Oberschwingungsströmen auf.

EV	F							
	L1		L2		L3			
	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$	$I_v$	$\varphi_{i,v}$		
Phase	V		°		V		°	
Ordnungszahl	$I_v$ <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> <td><math>I_v</math> <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> <td><math>I_v</math> <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> <td><math>I_v</math> <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> </td></td></td>	$\varphi_{i,v}$	$I_v$ <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> <td><math>I_v</math> <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> <td><math>I_v</math> <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> </td></td>	$\varphi_{i,v}$	$I_v$ <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> <td><math>I_v</math> <td><math>\varphi_{i,v}</math></td> </td>	$\varphi_{i,v}$	$I_v$ <td><math>\varphi_{i,v}</math></td>	$\varphi_{i,v}$
v	V	°	V	°	V	°	V	°
3	0,62	56	0,14	69	0,65	163		
9	0,12	179	0,39	-113	0,23	-124		

Tabelle 6.9 Oberschwingungsspannungen für EV F

Da bei beiden Elektrofahrzeugen Oberschwingungsströme 3. Ordnung und Vielfache davon auftreten, und diese auch einphasig geladen werden können, kann bei diesen EV nicht immer von symmetrischen Verbrauchern gesprochen werden. In weiterer Folge wird bei den Auswertungen nur die Phase L1 betrachtet.

### 6.3.4 Vergleich mit Grenzwerten aus Normen

Die in Tabelle 6.6 aufgelisteten Werte sollen mit den Grenzwerten aus den entsprechenden Normen verglichen werden.

Elektrofahrzeuge mit einem Eingangslaststrom  $\leq 16$  A je Leiter fallen in die Kategorie A für welche sich die Grenzwerte in [11] Tabelle 1 finden (siehe Abbildung 3.1). Die Grenzwerte sind in Absolutbeträgen angegeben und sind für jedes Gerät unabhängig vom Eingangsstrom gleich.

Die Grenzwerte für Fahrzeuge mit einem Eingangsstrom  $> 16$  A und  $\leq 75$  A je Leiter finden sich in [14] Tabelle 2 in (siehe Abbildung 3.2). Die Grenzwerte für einzelne OS-Amplituden sind in dieser Norm nur bis zur 13. Harmonischen definiert und in Prozent vom Bezugsstrom angegeben. Es müssen jedoch zusätzliche Grenzwerte eingehalten werden. Diese sind der Gesamtüberschwingungsstrom  $THC$  und der gewichtete Oberschwingungs-Teilstrom bezogen auf den Bezugsstrom  $PWHC/I_{ref}$ .

Elektrofahrzeuge deren Eingangsstrom variabel ist und der einen Wert unter und über 16 A annehmen kann, müssen nach [16] die Grenzwerte beider Normen erfüllen:

- Für den Wertebereich  $\leq 16$  A die Grenzwerte nach [11]
- Für den Wertebereich  $> 16$  A und  $\leq 75$  A die Grenzwerte nach [14]

In Tabelle 6.10 und Tabelle 6.11 sind neben der Auflistung der Harmonischen welche die Grenzwerte überschreiten, auch wichtige Kenngrößen des Eingangsstroms angeführt.

EV	$I_{ref}$	$THC$	$THD_i$	Überschreitung der Grenzwerte		
				schwach ( $< 25$ %)	mittel ( $25 - 100$ %)	stark ( $> 100$ %)
	A	A	%	v	v	v
B	13,4	0,96	7,3	-	-	-
C	13,1	1,56	12,0	23*	-	-
D	14,2	0,97	6,9	-	-	-
E	15,7	0,49	3,2	-	-	-
G	9,9	0,40	4,2	-	-	-
H	10,3	1,02	10,1	-	-	-
I	16,0	0,74	4,6	15, 17	19, 21	-
J	9,9	0,82	8,4	-	15, 17, 21*	19, 23
K	15,1	0,77	5,2	21*	15, 17	19, 23
L	14,9	0,63	4,3	13	15, 19, 23*	-

Tabelle 6.10 Vergleich der Grenzwerte für EV mit einem Eingangsstrom  $\leq 16$  A

Die mit einem Stern markierten Oberschwingungen dürfen die anwendbaren Grenzwerte um 50 % überschreiten wenn Bedingungen von 6.2.3.4 in [11] eingehalten werden. Auf diese Regelung wird hier allerdings nicht eingegangen.

EV	$I_{Phase}$	$THC$	$THD_i$	Überschreitung der Grenzwerte			$\frac{THC}{I_{ref}}$	$\frac{PWHC}{I_{ref}}$
				schwach ( $< 25$ %)	mittel ( $25 - 100$ %)	stark ( $> 100$ %)		
	A	A	%	v	v	v	%	%
A	30,4	1,5	4,8	-	-	-	4,3	0,0
F	31,3	3,6	12,0	7	-	-	11,3	19,3

Tabelle 6.11 Vergleich der Grenzwerte für EV mit einem Eingangsstrom  $> 16$ A und  $\leq 75$  A

Für den Vergleich von Fahrzeugen mit einem Eingangsstrom über 16 A werden die Grenzwerte in Abbildung 3.2 für ein  $R_{sce} = 33$  verwendet. Für die Berechnung dieser wurden nach [14], anders als bisher, nur Werte  $> 1\%$  von  $I_{ref}$  verwendet.

Bei der Hälfte der Fahrzeuge mit einem Eingangsstrom kleiner 16 A tritt eine Grenzwertüberschreitung für meist mehrere Ordnungszahlen auf, vor allem für Harmonische höherer Ordnung. Für Fahrzeuge mit einem höheren Eingangsstrom als 16 A wurden die Grenzwerte, bis auf eine leichte Überschreitung eingehalten.

Vergleicht man die  $THC$ - und  $THD_i$ -Werte von Elektrofahrzeugen mit Grenzwertüberschreitungen mit jenen ohne, kann kein Zusammenhang festgestellt werden. Das heißt, auch bei Fahrzeugen mit einem vermeintlich niedrigen  $THD_i$ , treten zum Teil große Überschreitungen einzelner Harmonischer auf.

Details zu den in Tabelle 6.10 und Tabelle 6.11 grob unterteilten Grenzwertüberschreitungen findet sich im Anhang in Tabelle 10.5.

### 6.3.5 Verhalten bei ähnlichen Ladeströmen

Bei Ladung mit annähernd gleichem Ladestrom kommt es bei gleichen Elektrofahrzeugen bei unterschiedlichen Ladevorgängen zu Unterschieden in Betrag und Winkel von Oberschwingungsströmen. In Tabelle 6.12 werden für zwei EV die OS-Strömen den OS-Spannungen der 5. Harmonischen gegenübergestellt.

EV	B					C				
	Messung	$I_5$	$\varphi_{i,5}$	$U_5$	$\varphi_{u,5}$	Messung	$I_5$	$\varphi_{i,5}$	$U_5$	$\varphi_{u,5}$
	Nr.	A	°	A	°	Nr.	A	°	A	°
	7	0,23	-121	2,91	-95	12	0,18	-59	3,47	-87
	8	0,25	-114	3,44	-90	13	0,18	-70	3,62	-97
	9	0,21	-115	2,94	-86	14	0,20	-79	4,13	-106
	10	0,24	-117	3,15	-91	15	0,15	-112	3,56	-134
	11	0,26	-118	3,41	-97	-	-	-	-	-
Streuung		0,05	7	0,54	12		0,05	53	0,66	47

Tabelle 6.12 Abhängigkeit der OS-Strömen von den OS-Spannungen

Die Amplituden der OS-Spannungen streuen zwischen den einzelnen Messungen für beide EV um etwa 0,6 V, jene der OS-Ströme um 0,05 A. In Abbildung 6.14 werden die Oberschwingungsamplituden mit den Werten aus Tabelle 6.12 einander gegenübergestellt.



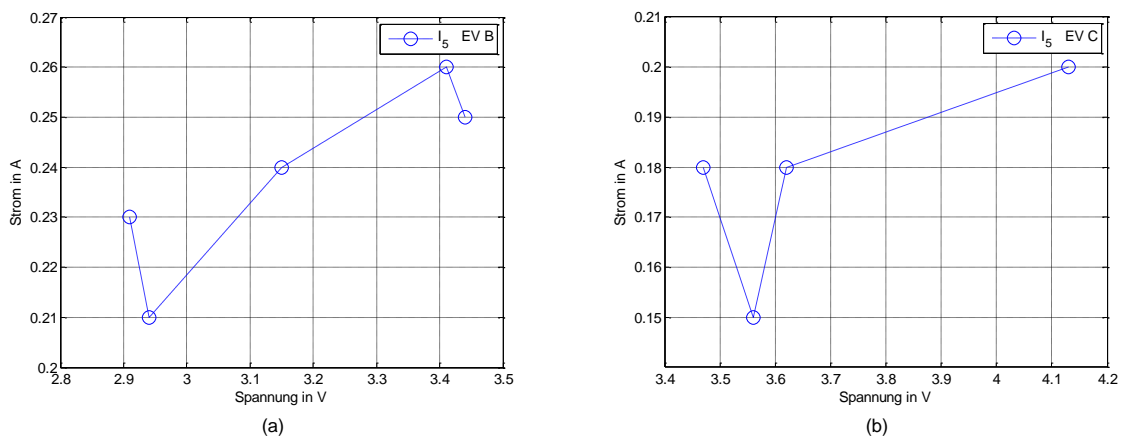


Abbildung 6.14 Amplitude OS-Strom in Abhängigkeit der OS-Spannung für die 5. Harmonische (a) EV B (b) EV C

Bei beiden EV ist ein Trend in der Abhängigkeit des OS-Stroms von der OS-Spannung zu erkennen. Steigt die OS-Spannung an, führt dies zu einer Erhöhung des OS-Stroms. Die von einem EV emittierten OS-Ströme sind daher von der OS-Spannungsvorbelastung im Stromnetz abhängig.

Für einen Vergleich der Abhängigkeit der OS-Stromwinkel von jenen der OS-Spannungswinkel wurde EV C ausgewählt, da hier die Winkel der OS-Spannungen in den verschiedenen Ladezyklen sehr unterschiedlich sind, wohingegen bei EV B eine nur geringe Streuung dieser auftritt. Aus den Werten in Tabelle 6.12 erkennt man, dass bei einer nur geringen Streuung der OS-Spannungswinkel (EV B) es diese auch bei jenen der OS-Stromwinkel gibt, wobei auch hier, wie bei den Amplituden, nicht immer ein direkter Zusammenhang besteht. Ist die Streuung OS-Spannungswinkel wie bei EV C jedoch größer ( $\varphi_{u,5}$  liegt zwischen  $-58^\circ$  und  $-134^\circ$ ), ist ein direkter Zusammenhang erkennbar (siehe Abbildung 6.15).

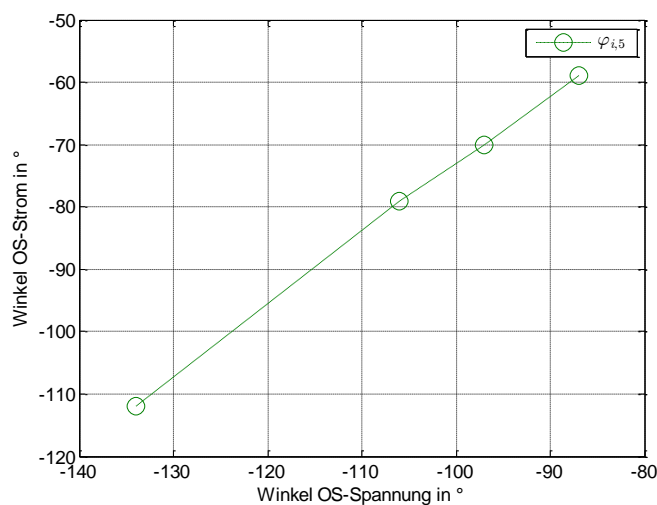


Abbildung 6.15 Winkel des OS-Stroms in Abhängigkeit des Winkels der OS-Spannung für die 5. Harmonische für EV C

Die Winkel der Oberschwingungsströme sind also von jenen der Oberschwingungsspannungen abhängig. Dies bedeutet auch, dass die Winkel der OS-Ströme tages- und wochenzeitlichen Schwankungen unterliegen und sich, wie in Kapitel 6.3.2 gezeigt, auch in unterschiedlichen Netzen unterscheiden.

Eine Angabe der Winkel von Oberschwingungsströmen von Elektrofahrzeugen ist daher nicht allgemein gültig und sollte unter Angabe des korrespondierenden Winkels der Oberschwingungsspannung erfolgen. Ein Vergleich der Winkel von OS-Strömen von EV ist nur bei ähnlichen Winkeln der OS-Spannungen gleicher Ordnungszahl möglich.

### 6.3.6 Verhalten bei unterschiedlichen Ladeströmen

Bei den Messungen waren die Ladeströme der Elektrofahrzeuge, bis auf EV F, bei jedem Ladevorgang ähnlich groß. Für EV F variierten diese je nach Status des SOC und waren auch durch Vorgabe des max. Ladestroms an der Ladestation reguliert. Da dieses EV einen sehr großen Leistungsbereich besitzt, wurde ein Ladezyklus an einer Schnellladestation gemessen, an welcher mit bis zu 44 kW geladen werden kann.

Bei anderen Elektrofahrzeuge würde sich die Höhe des max. Ladestroms über die Ladestation regeln und teilweise über das Bordmenü einstellen lassen. Von diesen Optionen wurde jedoch nicht Gebrauch gemacht.

In Tabelle 6.13 ist der Oberschwingungs-Gesamtstrom  $THC$  von EV F bei verschiedenen großen Ladeströmen aufgelistet.

Messung	$S$	$I_{ref}$	$THC$	Abbildung	Messstelle
Nr.	kVA	A	A		Nr.
30	36,5	51,8	4,30	Abbildung 6.16a	4
29	22,5	31,3	3,60	Abbildung 6.16b	1
25	10,6	14,8	2,33	Abbildung 6.16c	1

Tabelle 6.13 Oberschwingungs-Gesamtstrom von EV F bei unterschiedlich hohen Ladeströmen

Der Oberschwingungs-Gesamtstrom verringert sich nicht im gleichen Maße wie der Ladestrom. So unterscheidet sich bei Messung Nr. 29 und 25 der Ladestrom um den Faktor 2 während sich der  $THC$  lediglich um den Faktor 1,54 verringert.

In Abbildung 6.16 sind die einzelnen emittierten Oberschwingungsströme von EV F bei drei verschiedenen Ladeströmen mit den Grenzwerten der entsprechenden Normen verglichen. Dabei sind die Grenzwerte der entsprechenden Normen in Blau eingetragen, die Messwerte der Fahrzeuge in Rot.

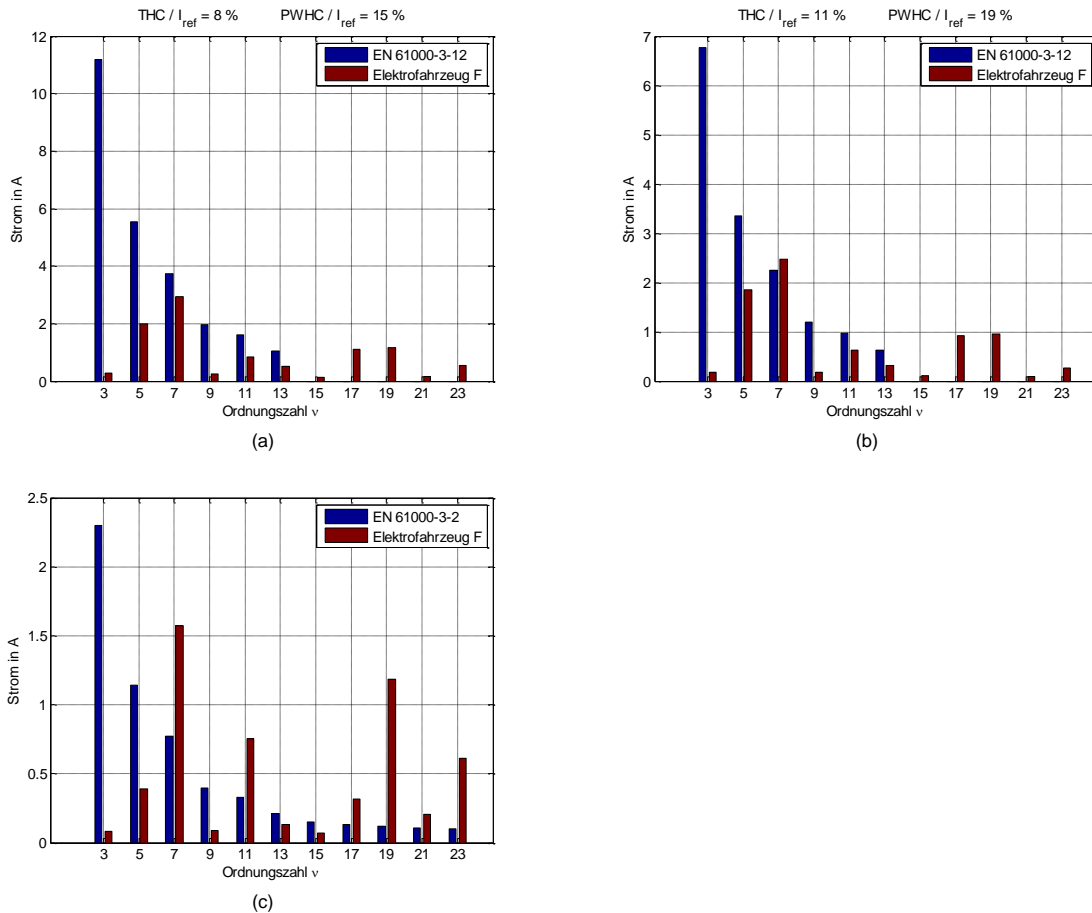


Abbildung 6.16 Grenzwertausschöpfung von Oberschwingungsströmen von EV F  
 (a)  $I_{ref} = 51,8 A$  (b)  $I_{ref} = 31,3 A$  (c)  $I_{ref} = 14,8 A$

Mit sinkendem Ladestrom nehmen zwar die meisten Oberschwingungsströme betragsmäßig ab, die Überschreitung der Grenzwerte nimmt hingegen zu. Hierbei gilt zu beachten, dass für unterschiedlich große Ladeströme andere Normen gelten (siehe Kapitel 6.3.4).

### 6.3.7 Kompensationseffekte

Durch die unterschiedlichen Phasenwinkel von Oberschwingungsströmen der Elektrofahrzeuge, kann es bei gleichzeitigen Ladevorgängen zu Kompensationseffekten einzelner Harmonischer kommen.

Zur Auswertung dieser Effekte wird der Gleichphasigkeitsfaktor  $k_p$ , wie in (6.2) definiert, angewendet.

$$k_p^{(v)} = \frac{\text{abs} \left( \sum_{i=1}^n I_i^{(v)} \right)}{\sum_{i=1}^n \text{abs} \left( I_i^{(v)} \right)} \left( = \frac{\text{Betrag der Vektorsummen}}{\text{arithmetische Summe}} \right) \quad (6.2)$$

Der Gleichphasigkeitsfaktor repräsentiert das Verhältnis zwischen dem Betrag der Vektorsumme und der arithmetischen Summe. Sein Wertebereich liegt zwischen 0 und 1, wobei  $k_p = 0$  beste Kompensation (Auslöschung) und  $k_p = 1$  keine Kompensation bedeuten [37].

Als kleines Berechnungsbeispiel wird der Gleichphasigkeitsfaktor des 5. OS-Stroms von zwei EV berechnet:

$$EV\ 1: \underline{I}_1^{(5)} = 0,36\ A\ e^{-j103^\circ}$$

$$EV\ 2: \underline{I}_2^{(5)} = 0,22\ A\ e^{j20^\circ}$$

$$\begin{aligned} k_p^{(5)} &= \frac{\text{abs}\left(\underline{I}_1^{(5)} + \underline{I}_2^{(5)}\right)}{\text{abs}\left(\underline{I}_1^{(5)}\right) + \text{abs}\left(\underline{I}_2^{(5)}\right)} \\ &= \frac{\text{abs}\left(0,36\ A\ e^{-j103^\circ} + 0,22\ A\ e^{j20^\circ}\right)}{\text{abs}\left(0,36\ A\ e^{-j103^\circ}\right) + \text{abs}\left(0,22\ A\ e^{j20^\circ}\right)} = \frac{\text{abs}\left(0,30\ A\ e^{-j65^\circ}\right)}{0,36\ A + 0,22\ A} \\ &= \frac{0,30\ A}{0,58\ A} = 0,52 \end{aligned}$$

Wie in Kapitel 6.3.5 gezeigt wurde, sind die Winkel der Oberschwingungsströme von jenen der OS-Spannungen abhängig. Es werden daher nur Kompensationseffekte für jene Stromharmonischen berechnet, welche während des Ladevorgangs in den korrespondierenden Oberschwingungsspannungen einen ähnlichen Winkel haben ( $< 10^\circ$  Unterschied). Eine Berechnung des Kompensationseffekts wird in Tabelle 6.14 einmal für fünf Fahrzeuge (A, B, D, E, G) durchgeführt, sowie einmal für eine möglichst große Anzahl von Fahrzeugen, wobei sich die Fahrzeugtypen für jede Ordnungszahl unterscheiden (Details siehe Tabelle 10.4).

Ordnungszahl	Anz. EV	$k_p$	Anz. EV	$k_p$
v				
3	5	0,77	9	0,74
5	5	0,90	6	0,85
7	5	0,08	9	0,49
9	5	0,82	9	0,49
11	5	0,14	9	0,39

Tabelle 6.14 Kompensationseffekte einzelner Harmonischer für EV unterschiedlichen Typs

Abhängig von der Kombination und Anzahl der Fahrzeuge kann für manche Harmonische, wie z.B. der 7. und 11., eine sehr große Auslöschung stattfinden. Zudem nimmt der Gleichphasigkeitsfaktor bei einer größeren Anzahl von Fahrzeugen und mit steigender Ordnungszahl ab. Durch die unvorhersehbare Anzahl und Kombination von Elektrofahrzeugen welche gleichzeitig laden, jedoch keine qualifizierte Aussage über mögliche Kompensationseffekte im Stromnetz gegeben werden.

## 6.4 Vergleich mit bestehender Studien

Bei den Messungen und der Auswertung wurden Einschaltströme nur bedingt berücksichtigt. Dies liegt zum einen an der 2-sec-Mittelwertbildung, durch welche keine Aussage über mögliche erhöhte Anlaufströme getroffen werden kann, zum anderen ist aus Messreihen des Austrian Institute of Technology [38] bekannt, dass diese nur selten höher als der Bemessungsstrom sind. In [9] wurde allerdings nachgewiesen, dass es zumindest ein Elektrofahrzeug gibt, bei welchem der Einschaltstrom bis zum 8-fachen des Bemessungsstroms betragen kann. Hier ist mit einer Überschreitung des Grenzwerts für die relative Spannungsänderung zu rechnen.

Einige Elektrofahrzeuge weisen in der Ladephase starke Leistungsschwankungen auf. Auf Grund der hohen Kurzschlussleistung an den Messpunkten konnte keine Auswirkung auf den Flickerpegel im Netz beobachtet werden, rechnerisch wurde allerdings eine solche nachgewiesen. Bei Messungen in [4] wurden auch ähnliche Leistungsschwankungen festgestellt, welche dort unzulässige Werte des Flickerpegels, besonders in schwachen Netzen, zur Folge hatten.

Bei Verminderung des Ladestromes verringern sich die Oberschwingungsströme nicht im gleichen Ausmaße. Dieses Verhalten wurde auch in [8] festgestellt. Das Störspektrum des Stroms und der Stromverzerrungsfaktor  $THD_i$  werden wesentlich durch den Auslastungsgrad der Leistungselektronik bestimmt. Das wird durch konstante Einflussgrößen wie die Taktfrequenz der Schalter, die Schaltverluste und die Totzeiten der Leistungselektronik verursacht [36].

Die Verminderung des Ladestromes kann vom Batteriemangement des EV abhängen oder extern z.B. über die Ladestation mit einem angeschlossenen Lastmanagement erfolgen. Bei Eingriff eines Lastmanagementsystems wäre es auf Grund des beschriebenen Verhaltens sinnvoller die Leistungsreduktion nicht durch Leistungsrosselung aller angeschlossenen im Ladezustand befindlichen EV zu erreichen sondern durch Wegschaltung einzelner ganzer Fahrzeuge. Die Wegschaltung einzelner EV ist auch vor dem Hintergrund sinnvoller, dass es einige Fahrzeuge gibt, welche einen minimalen Ladestrom von 7 - 13 A benötigen um überhaupt zu laden.

Durch die unterschiedliche Phasenlage einzelner Harmonischer kann es zu Kompensationseffekten kommen. Diese lagen bei den untersuchten Elektrofahrzeugen abhängig von der Ordnungszahl und der Anzahl der betrachteten EV zwischen 8 % und 92 %. Auch in [7] wurden Kompensationseffekte von bis zu 4 Fahrzeugen untersucht und ebenfalls hier wurden große Unterschiede festgestellt. Für die 3. und 5. Harmonische lag der Kompensationseffekt zwischen 6 % und 83 %.

Aus den Veröffentlichungen [5] und [6] werden vier Hauptaussagen bzgl. Elektrofahrzeuge mit den Ergebnissen aus dieser Masterarbeit verglichen.

- [6] Starke Beeinflussung der Stromverzerrung durch die Spannungsverzerrung ( $THD_u = 1,6 \% \rightarrow THD_i = 14,7 \% / THD_u = 3,4 \% \rightarrow THD_i = 27,8 \%$ ):  
Ein solcher starker Einfluss konnte nicht festgestellt werden, wobei der  $THD_u$  während der Messungen bei etwa 2 % lag und auch nur geringen Schwankungen von etwa 0,5 Prozentpunkten unterlag. In dieser Arbeit wurde zudem ein Einfluss von OS-Spannungen auf OS-Ströme bei einzelnen Harmonischen untersucht. Hierbei konnte ein Trend festgestellt werden, steigt die OS-Spannung an, führt dies zu einer Erhöhung des OS-Stroms (Kapitel 6.3.5). Nach [36] können zudem OS-Spannungen anderer Harmonische Einfluss auf den OS-Strom einer einzelnen Ordnungszahl haben.
- [13], [6] Ähnliche Phasenlage der 3. und 5. Stromharmonischen von Elektrofahrzeugen unterschiedlichen Typs:  
Diese ähnliche Phasenlage konnte auch hier festgestellt wird. 8 von 12 Fahrzeugen hatten eine ähnliche Phasenlage der 3. und 5. Stromharmonischen.
- [13], [6] Sehr ähnliche Phasenlage zwischen Fahrzeugen und Haushalten bei der 3. Harmonischen (Vorzugsphasenlage Haushalte  $\varphi_{i,3} = 180^\circ - 210^\circ$ ):  
Diese ähnliche Phasenlage bei der der 3. Stromharmonischen konnte nicht festgestellt werden. Nur bei 25 % der Fahrzeuge war die Phasenlage im Bereich von  $180^\circ - 210^\circ$ .
- [13], [6] Deutlicher Unterschied der Winkellagen zwischen Fahrzeugen und Haushalten bei der 5. Harmonischen (Vorzugsphasenlage Haushalte  $\varphi_{i,5} = 300^\circ - 330^\circ$ ):  
Dieser deutliche Unterschied wurde auch bei diesen Messungen festgestellt. Bei nur einem Elektrofahrzeug war die Phasenlage der 5. Stromharmonischen im Bereich von  $300^\circ$  bis  $330^\circ$ .

Ein Vergleich der Phasenlagen, wie bei den letzten drei Unterpunkten angestellt, ist nur eingeschränkt zulässig, da wie in Kapitel 6.3.5 gezeigt wurde, die Phasenlage der OS-Ströme stark von denen der OS-Spannungen abhängig ist.

In [39] wurde die Höhe von OS-Spannungen in Niederspannungsnetzen untersucht und mit den Grenzwerten in der EN 50160 verglichen. Dabei wurden keine Reserve zu den Grenzwerten für die 15. Harmonische und nur geringe für die 19. und 21. Harmonische festgestellt. Dies wurde im Rahmen dieser Arbeit bei Durchsicht einiger durch einen Netzbetreiber zur Verfügung gestellten PQ-Messungen auch festgestellt, wobei die Reserven zu den Grenzwerten hier größer waren. Aus Sicht der Elektromobilität sollte die Entwicklung dieser OS-Pegel weiter beobachtet werden, da es bei EV genau bei diesen zu teils starken Überschreitungen der erlaubten OS-Ströme kommt. Bei etwa 50 % der Fahrzeuge gibt Überschreitungen der Grenzwerte bzgl. OS-Ströme, vor allem bei Ordnungszahl höherer Ordnung (15, 17, 19, 21, 23).

## 7 Netzbetrachtungen

In den „Technische organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer – Hauptabschnitt D1“ sind Leistungsgrenzwerte für *Betriebsmittel mit Komponenten der Leistungselektronik* aufgelistet, für deren Einsatz eine Anfrage beim Netzbetreiber erforderlich ist (Abbildung 7.1). Diese Forderung gilt sinngemäß auch für Elektrofahrzeuge, da diese Bordladegeräte mit Komponenten der Leistungselektronik besitzen.

Anschlussart	Maximal zulässige Leistung
L – N	1,3 kVA
L – L	1,9 kVA
L – L – L (– N)	3,8 kVA

Abbildung 7.1 Leistungsgrenzwerte bzgl. Oberschwingungen – Tabelle 2-1 [17]

Auch in der TAEV ist in 3.1 festgehalten, dass es sich bei den oben erwähnten Betriebsmitteln mit Komponenten der Leistungselektronik um „z.B Ladestationen für Elektromobilität“ handelt.

Es sollen daher Kurzschlussleistungen ermittelt werden, für welche bei Betrieb eines bzw. mehrerer Elektrofahrzeuge am öffentlichen Stromnetz, keine unzulässigen Auswirkungen auf andere Netzbenutzer zu erwarten sind. Dazu werden Werte und Berechnungsmethoden aus den entsprechenden Normen verwendet.

Für Elektrofahrzeuge sind dies folgende Normen:

- ÖVE/ÖNORM EN 50160  
(Merkmale der Spannungsqualität in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen)
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2  
(Grenzwerte für Oberschwingungsströme für Geräte mit  $I_{ref} \leq 16 A$ )
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-3  
(Grenzwerte Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker für Geräte mit  $I_{ref} \leq 16 A$ )
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-11  
(Grenzwerte Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker für Geräte mit  $I_{ref} \leq 75 A$ )
- ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-12  
(Grenzwerte für Oberschwingungsströme für Geräte mit  $I_{ref} > 16 A$  und  $\leq 75 A$ )
- IEC 61851-21-1 CDV  
(Electric Vehicle onboard charger EMC requirements)

Für gesamte Kundenanlagen, wie dies einzelne oder mehrere Ladestationen im öffentlichen Raum sein können oder bei Anlagen wie Einfamilienhäusern bei denen ein Elektrofahrzeug einen dominanten Verbraucher darstellt, ist zudem der Hauptabschnitt D2 der Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen zu beachten.



Im Weiteren werden Netzurückwirkungen auf folgende Weise unterteilt:

- Oberschwingungen  $U_v, I_v$
- Spannungsschwankungen  $d$ 
  - kurzfristige  $d_{max}$ 
    - selten:  $r < 0,01 \text{ min}^{-1}$
    - gelegentlich:  $0,01 \text{ min}^{-1} \leq r < 0,1 \text{ min}^{-1}$
    - häufig:  $r \geq 0,1 \text{ min}^{-1}$
  - langfristige  $d_c$
- Unsymmetrie  $k_u, k_i$

Es werden dabei Werte für die unterschiedlichen Netzurückwirkungen von Elektrofahrzeugen ermittelt, bei welchen die Emissionswerte bei Betrieb am realen Netz, die festgelegten Grenzwerten aus den Produktnormen nicht überschreiten. Zudem werden auch Werte für Elektrofahrzeuge berechnet, bei denen diese Grenzwerte im Zuge der vorgenommenen Messungen überschritten wurden. Dies ist für etwa 50 % der untersuchten Fahrzeuge der Fall. Die berechneten Werte können dabei die Kurzschlussleistung  $S_{kV}$  selbst oder das Kurzschlussleistungsverhältnis  $R_{sce}$  sein.

Die Kurzschlussleistung ist über die Nennspannung und Netzimpedanz am Verknüpfungspunkt definiert:

$$S_{kV} = \frac{U_{verk}^2}{Z_{kV}} \quad (7.1)$$

Das Kurzschlussleistungsverhältnis stellt das Verhältnis von Anlagenleistung zur Kurzschlussleistung des Netzes dar:

$$R_{sce} = \frac{S_{kV}}{S_A \cdot \frac{3}{n_{phasen}}} \quad (7.2)$$

In den Normen finden sich folgende vordefinierten Impedanzen:

Bezugsimpedanz ([12] [13]):

- Einphasiges Gerät:  $Z_{1k ref} = (0,4 + j0,25) \Omega = 0,47 \Omega e^{j32^\circ} \cong 340 \text{ kVA}$
- Dreiphasiges Gerät:  $Z_{3k ref} = (0,24 + j0,15) \Omega = 0,28 \Omega e^{j32^\circ} \cong 570 \text{ kVA}$

Testimpedanz [13]:

- Einphasiges Gerät:  $Z_{1k test} = (0,25 + j0,25) \Omega = 0,35 \Omega e^{j45^\circ} \cong 450 \text{ kVA}$
- Dreiphasiges Gerät:  $Z_{3k test} = (0,15 + j0,15) \Omega = 0,21 \Omega e^{j45^\circ} \cong 750 \text{ kVA}$

## 7.1 Oberschwingungsspannungen

Oberschwingungsströme entstehen durch Verbraucher mit nichtlinearer Strom-Spannungskennlinie wie sie auch Elektrofahrzeuge darstellen. Durch die emittierten Oberschwingungsströme entstehen an den Netzimpedanzen OS-Spannungsabfälle, welche sich auf die Netzspannung auswirken. Hohe Oberschwingungsanteile in der Netzspannung können sowohl zu Beeinträchtigungen des Netzbetriebes als auch von elektrischen Betriebsmitteln bei Netzbenutzern führen. Zudem steht jedem Netzbenutzer eine Netzspannung in ausreichender Qualität gemäß EN 50160 zu.

### 7.1.1 EV mit einem Eingangsstrom $\leq 16$ A je Leiter

Für EV mit einem Eingangsstrom  $\leq 16$  A wird die Auswirkung der Oberschwingungsströme auf die Netzspannung anhand der Bezugsimpedanz ermittelt. Die Berechnungen werden nicht für die Oberschwingungsströme aller untersuchten EV durchgeführt, sondern nur für die Mittel- und Maximalwerte der OS-Ströme aus Tabelle 6.6 für die Fahrzeuge B, C, D, E, F, G, H, I, J und K ( $I_{ref} \leq 16$  A).

Ordnungs- zahl	$I_{v,mittel}$	$I_{v,max}$
$v$	A	A
3	0,55	1,54
5	0,30	0,46
7	0,12	0,20
9	0,17	0,29
11	0,13	0,31
13	0,11	0,24
15	0,13	0,21
17	0,10	0,21
19	0,13	0,32
21	0,07	0,15
23	0,13	0,38

Tabelle 7.1 Mittel- und Maximalwerte der OS-Ströme aus Tabelle 6.6 für EV mit einem  $I_{ref} \leq 16$  A

Nach [40] ist die Oberschwingungsimpedanz  $Z_v$  im Niederspannungsnetz durchwegs ohmsch-induktiv, Netzresonanzen treten im Frequenzbereich bis 2 kHz im Allgemeinen nicht auf. Für die Berechnung von OS-Impedanzen mit einer Ordnungszahl bis zu 23 kann daher folgende Berechnung verwendet werden:

$$Z_v = \sqrt{R_{50Hz}^2 + (v \cdot X_{50Hz})^2} \quad (7.3)$$

Mittels der OS-Impedanzen können die durch OS-Strömen resultierenden OS-Spannungen ermittelt werden:

$$U_v = I_v \cdot Z_v \quad (7.4)$$

Als Berechnungsbeispiel wird die OS-Spannung der 15. Harmonischen an der Bezugsimpedanz für den maximalen OS-Strom aus Tabelle 7.1 ermittelt.

Da es sich um ein einphasig ladendes EV handelt, wird mit der einphasigen Bezugsimpedanz gerechnet ( $Z_{1k\text{ref}} = (0,4 + j0,25) \Omega = 0,47 \Omega e^{j32^\circ}$ ).

Die OS-Impedanz ergibt sich nach (7.3) zu:

$$Z_{15} = \sqrt{R_{50\text{Hz}}^2 + (15 \cdot X_{50\text{Hz}})^2} = \sqrt{(0,4 \Omega)^2 + (15 \cdot 0,25 \Omega)^2} = 3,77 \Omega$$

Mit einem OS-Strom von 0,21 A ergibt sich somit eine OS-Spannung von:

$$U_{15} = I_{15} \cdot Z_{15} = 0,21 \text{ A} \cdot 3,77 \Omega = 0,78 \text{ V}$$

Diese bezogen auf die Nennspannung von 230 V ergibt:

$$U_{v,ber} = u_{15} = \frac{U_{15}}{U_n} \cdot 100 \% = \frac{0,78 \text{ V}}{230 \text{ V}} \cdot 100 \% = 0,34 \%$$

Der Grenzwert nach EN 50160 liegt bei 0,5 %. Der Grenzwert wird daher zu folgendem Prozentsatz ausgelastet:

$$\frac{U_{v,ber}}{U_{v,Norm}} = \frac{u_{15,ber}}{u_{15,Norm}} \cdot 100 \% = \frac{0,34 \%}{0,5 \%} \cdot 100 \% = 68 \%$$

In Tabelle 7.2 sind die berechneten OS-Spannungen welche sich aus den OS-Impedanzen der Bezugsimpedanz sowie den OS-Strömen aus Tabelle 7.1 ergeben. Die berechneten OS-Spannungen sind dabei auf die Grenzwerte in EN 50160 bezogen.

		Mittelwert	Maximalwert
Ordnungszahl	$Z_v$	$U_{v,ber}/U_{v,Norm}$	$U_{v,ber}/U_{v,Norm}$
$v$	$\Omega$	%	%
3	0,85	4	11
5	1,31	3	4
7	1,80	2	3
9	2,29	11	19
11	2,78	5	11
13	3,27	5	11
15	3,77	41	68
17	4,27	9	20
19	4,77	17	45
21	5,27	33	70
23	5,76	21	63

Tabelle 7.2 Vergleich der berechneten OS-Spannungen für EV mit  $I_{ref} \leq 16 A$  an der Bezugsimpedanz bezogen auf die Grenzwerte aus EN 50160

Man sieht, dass für die Maximalwerte dieser EV die berechneten Werte der Oberschwingungsspannungen für die Ordnungszahlen 15, 21 und 23 mehr als 50 % der erlaubten Grenzwerte aus [10] erreichen.

In Tabelle 7.3 ist die bestehende Oberschwingungsbelastung an Netzausläufern in Prozent der erlaubten Grenzwerte aus EN 50160 eingetragen. Die Messungen stammen aus anlassbezogenen PQ-Messungen eines Netzbetreibers.

	PQ-M <sup>1</sup> 1	PQ-M <sup>1</sup> 2	PQ-M <sup>1</sup> 3	PQ-M <sup>1</sup> 4	PQ-M <sup>1</sup> 5
Ordnungszahl	$U_{v,gem}/U_{v,Norm}$	$U_{v,gem}/U_{v,Norm}$	$U_{v,gem}/U_{v,Norm}$	$U_{v,gem}/U_{v,Norm}$	$U_{v,gem}/U_{v,Norm}$
$v$	%	%	%	%	%
15	35	14	53	17	61
17	7	4	11	15	6
19	5	2	29	6	16
21	11	4	25	26	37
23	3	3	13	19	17

Tabelle 7.3 Ausschöpfung der OS-Spannungsgrenzwerte in realen Netzen

Vor allem bei vielfachen der dritten Harmonischen (15, 21) zeigt sich in den untersuchten Netzen eine höhere Belastung. Da es auch bei den untersuchten EV bei diesen Harmonischen zu teilweisen hohen Emissionen kommt, ist auf die Entwicklung der OS-Pegel dieser Spannungsharmonischen zu achten.

Die berechneten OS-Spannungen wurden in Tabelle 7.2 nur betragsmäßig berechnet. Im realen Netz würden sich diese nicht linear zu bestehenden Oberschwingungen addieren, sondern nur unter Berücksichtigung eines entsprechenden OS-Winkels. Bei Ladung eines EV an einem Netz mit einer Kurzschlussleistung von 570 kVA ( $\triangleq$  einphasig  $(0,4 + j0,25) \Omega$  bei Grundschiwingung) und bei gleichzeitiger Ladung mehrerer gleicher Elektrofahrzeuge könnte es aber zu teilweisen Überschreitungen der erlaubten Grenzwerte kommen.

### 7.1.2 EV mit einem Eingangsstrom $>16$ A und $\leq 32$ A je Leiter

Für EV mit einem Eingangsstrom  $> 16$  A und  $\leq 32$  A wird die Auswirkung der Oberschwingungsströme auf die Netzspannung nicht anhand der Bezugsimpedanz sondern für ein Kurzschlussleistungsverhältnis von 33 bzw. 66 berechnet. Nur zwei der untersuchten Fahrzeuge (EV A und F) fallen in diese Kategorie ( $I_{ref} > 16$  A und  $\leq 32$  A). Für die Berechnung werden die Oberschwingungsströme aus Tabelle 7.4 verwendet.

	EV A	EV F
Ordnungs- zahl	$I_v$	$I_v$
v	A	A
3	0,55	0,18
5	0,30	1,86
7	0,12	2,48
9	0,17	0,18
11	0,13	0,62
13	0,11	0,32
15	0,13	0,12
17	0,10	0,93
19	0,13	0,95
21	0,07	0,10
23	0,13	0,26

Tabelle 7.4 OS-Ströme für EV A und F  
(Auszug aus Tabelle 6.6)

Beide Fahrzeuge laden mit einem Strom von etwa 32 A. Durch umformen von (7.2) lässt sich für ein Kurzschlussleistungsverhältnis von 33 folgende Kurzschlussleistung berechnen:

$$\begin{aligned}
 S_{kV} &= S_A \cdot \frac{3}{n_{\text{phasen}}} \cdot R_{sce} = U_n \cdot I_A \cdot \sqrt{3} \cdot \frac{3}{3} \cdot R_{sce} \\
 &= 400 \text{ V} \cdot 32 \text{ A} \cdot \sqrt{3} \cdot 33 = 732 \text{ kVA}
 \end{aligned}$$

Dies entspricht in etwa der Testimpedanz:

- Einphasiges Gerät:  $Z_{1k\ test} = (0,25 + j0,25) \Omega = 0,35 \Omega e^{j45^\circ} \cong 450\ kVA$
- Dreiphasiges Gerät:  $Z_{3k\ test} = (0,15 + j0,15) \Omega = 0,21 \Omega e^{j45^\circ} \cong 750\ kVA$

Im Weiteren werden für die Berechnungen für ein  $R_{sce} = 33$  die Werte der Testimpedanz, bzw. für ein  $R_{sce} = 66$  die halben Werte der Testimpedanz verwendet.

Für die weitere Berechnung wird angenommen, dass die OS-Ströme für die einzelnen Harmonischen in allen drei Außenleitern symmetrisch sind. Dies bedeutet, dass sich OS-Ströme (bis auf die 3. Harmonische und Vielfache davon) im Sternpunkt des Ladegeräts auslöschen und am Neutralleiter keinen Spannungsabfall verursachen. Für die Berechnung der OS-Impedanz der 3. Harmonischen und Vielfachen davon wird daher die einphasige Testimpedanz  $Z_{1k\ test} = (0,25 + j0,25) \Omega$  verwendet, für alle anderen Harmonischen die dreiphasige Testimpedanz  $Z_{3k\ test} = (0,15 + j0,15) \Omega$ .

Für das Berechnungsbeispiel werden die Werte von EV F für die 7. Harmonische verwendet und die Auswirkungen an der Testimpedanz berechnet.

Die OS-Impedanzen wird wie in (7.3) berechnet:

$$Z_7 = \sqrt{R_{50Hz}^2 + (7 \cdot X_{50Hz})^2} = \sqrt{(0,15 \Omega)^2 + (7 \cdot 0,15 \Omega)^2} = 1,06 \Omega$$

Mit einem OS-Strom von 2,48 A ergibt sich somit eine OS-Spannung von:

$$U_7 = I_7 \cdot Z_7 = 2,48\ A \cdot 1,06 \Omega = 2,63\ V$$

Diese bezogen auf die Nennspannung von 230 V ergibt:

$$U_{v,ber} = u_7 = \frac{U_7}{U_n} \cdot 100\ \% = \frac{2,63\ V}{230\ V} \cdot 100\ \% = 1,14\ \%$$

Der Grenzwert nach EN 50160 liegt bei 5 %. Der Grenzwert wird daher zu folgendem Prozentsatz ausgelastet:

$$\frac{U_{v,ber}}{U_{v,Norm}} = \frac{u_{7,ber}}{u_{7,Norm}} \cdot 100\ \% = \frac{1,14\ \%}{5\ \%} \cdot 100\ \% = 23\ \%$$

In Tabelle 7.5 und Tabelle 7.6 sind die berechneten OS-Spannungen für EV A bzw. F, bezogen auf die Grenzwerte in EN 50160, aufgelistet. Die OS-Spannungen ergeben sich aus den OS-Strömen aus Tabelle 7.4 sowie den berechneten OS-Impedanzen für unterschiedliche Kurzschlussleistungsverhältnisse.

$R_{sce}$	33	66	33	66
Ordnungs- zahl	$Z_v$	$Z_v$	$U_{v,ber}/U_{v,Norm}$	$U_{v,ber}/U_{v,Norm}$
$v$	$\Omega$	$\Omega$	%	%
3	0,79	0,40	5	2
5	1,27	0,64	3	2
7	1,77	0,88	1	1
9	2,26	1,13	31	16
11	2,76	1,38	5	3
13	3,26	1,63	11	6
15	3,76	1,88	81	40
17	4,26	2,13	14	7
19	4,76	2,38	7	4
21	5,26	2,63	45	23
23	5,76	2,88	22	11

Tabelle 7.5 Vergleich der berechneten OS-Spannungen für EV A für Kurzschlussleistungsverhältnisse von 33 bzw. 66 bezogen auf die Grenzwerte aus EN 50160

$R_{sce}$	33	66	33	66
Ordnungs- zahl	$Z_v$	$Z_v$	$U_{v,ber}/U_{v,Norm}$	$U_{v,ber}/U_{v,Norm}$
$v$	$\Omega$	$\Omega$	%	%
3	0,79	0,40	1	1
5	0,76	0,38	10	5
7	1,06	0,53	23	11
9	2,26	1,13	12	6
11	1,66	0,83	13	6
13	1,96	0,98	9	5
15	3,76	1,88	39	20
17	2,55	1,28	52	26
19	2,85	1,43	79	39
21	5,26	2,63	44	22
23	3,45	1,73	27	13

Tabelle 7.6 Vergleich der berechneten OS-Spannungen für EV F für Kurzschlussleistungsverhältnisse von 33 bzw. 66 bezogen auf die Grenzwerte aus EN 50160

Für ein Kurzschlussleistungsverhältnis von 33 erkennt man bei EV A für die 15. Harmonische und bei EV F für die 19. Harmonische eine Auslastung der Grenzwerte von etwa 80 %. Dies ist für einzelne Verbraucher relativ hoch. Bei der Berechnung wurden zwar noch keine Phasenwinkel und mögliche Auslöschungseffekte berücksichtigt, bei gleichzeitiger Ladung von zwei EV oder starker OS-Spannungsvorbelastung des Stromnetzes kann es jedoch zu Überschreitung der Grenzwerte nach EN 50160 kommen. Bei Anschluss eines solchen Fahrzeugs an einem Verknüpfungspunkt mit einer Kurzschlussleistung von 750 kVA ist durch Messungen zu überprüfen, ob die OS-Spannungspegel innerhalb der geforderten Grenzwerte liegen. Kann dies nicht sichergestellt werden, müssen am Verknüpfungspunkt geeignete

Maßnahmen getroffen werden. Bei einer Verdoppelung der Kurzschlussleistung ist mit einer Halbierung der durch das EV erzeugten OS-Spannung zu rechnen.

## 7.2 Spannungsänderungen

Spannungsänderungen lassen sich in langfristige und kurzfristige unterteilen. Zur Erklärung dieser dient Abbildung 7.2. Darin ist der relative Spannungsänderungsverlauf  $d(t)$  zu erkennen:

$$d(t) = \frac{\Delta U(t)}{U_n} \quad (7.5)$$

Der sprungförmige Verlauf soll die Beurteilung der Spannungsschwankungen in 10-ms-Effektivwerten darstellen.

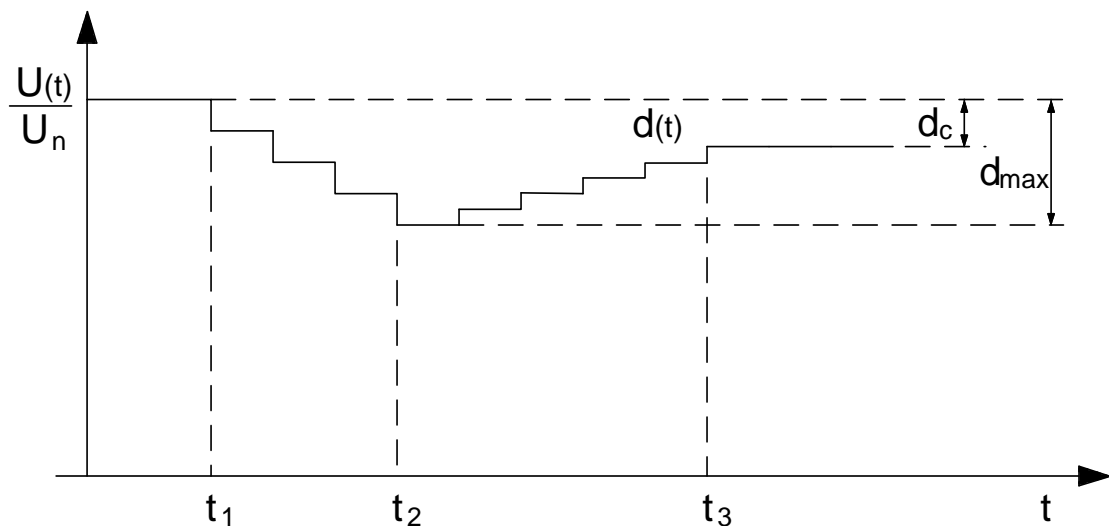


Abbildung 7.2 Erklärung von kurz- und langfristigen Spannungsschwankungen

Ab Zeitpunkt  $t_1$  beginnt der Anstieg der Laständerung, welche einen Spannungseinbruch  $d(t)$  zur Folge hat. Bei  $t_2$  erreicht dieser seinen maximalen Wert  $d_{max}$ :

$$d_{max} = \frac{\Delta U_{max}}{U_n} \quad (7.6)$$

Diese größte Spannungsänderung wird für die Beurteilung von kurzfristigen Spannungsschwankungen benötigt.

Ab  $t_2$  wird die Spannungsänderung wieder geringer und erreicht ihren stationären Wert bei  $t_3$  mit:

$$d_c = \frac{\Delta U_c}{U_n} \quad (7.7)$$

Diese größte Änderung des stationären Zustandes einer Spannung wird für die Beurteilung von langfristigen Spannungsschwankungen benötigt.



Spannungsänderungen werden von Leistungs- bzw. Stromänderungen hervorgerufen und sind umso stärker, je schneller sich diese Änderung vollzieht. Die Kurvenform der Änderungen ist daher ausschlaggebend für die Höhe der Netzrückwirkungen. Für eine genaue Beurteilung dieser, müssten 10-ms-Effektivwerte zur Verfügung stehen. Bei den Messungen selbst wurden aufgrund der Langzeitmessung allerdings nur 2-sec-Mittelwerte gebildet. Daher wird für die weitere Betrachtung eine rechteckförmige Änderung angenommen bzw. ein Kurvenverlauf angegeben, für welchen keine Überschreitung der Grenzwerte zu erwarten ist.

Ein zweiter wesentlicher Einflussfaktor auf die Höhe Rückwirkung ist die Wiederholrate  $r$  der Spannungsänderungen. Kurzfristige Spannungsänderungen können dabei in Bezug auf Elektromobilität folgendermaßen unterteilt werden:

- Seltene kurzfristige Spannungsänderungen bei Einschaltvorgängen von EV bei privater oder halböffentlicher Ladung. In beiden Fällen ist mit wenigen Ladevorgängen pro Tag zu rechnen ( $r < 0,01 \text{ min}^{-1} \cong 1 \text{ Ladevorgang alle 2 Stunden}$ ).
- Gelegentliche kurzfristige Spannungsänderungen entstehen durch Einschaltvorgänge bei öffentlicher Ladung ( $0,01 \text{ min}^{-1} \leq r < 0,1 \text{ min}^{-1} \cong \text{max. 144 Ladevorgänge pro Tag}$ ).
- Häufige kurzfristige Spannungsänderungen können während des Ladevorgangs, wie in Abbildung 6.3 zu sehen, durch Leistungsschwankungen auftreten ( $r \geq 0,1 \text{ min}^{-1}$ ).

Kurzfristige Spannungsänderungen werden durch Angabe eines maximal zulässigen relativen Spannungsabfalls  $d_{max}$  und den Flickeremissionswerten  $P_{st}$  und  $P_{st}$  begrenzt. Für die Ermittlung der Flickerstärke ist in Abbildung 7.3 die Emissionsgrenzkurve für rechteckförmige Spannungsänderungen abgebildet.

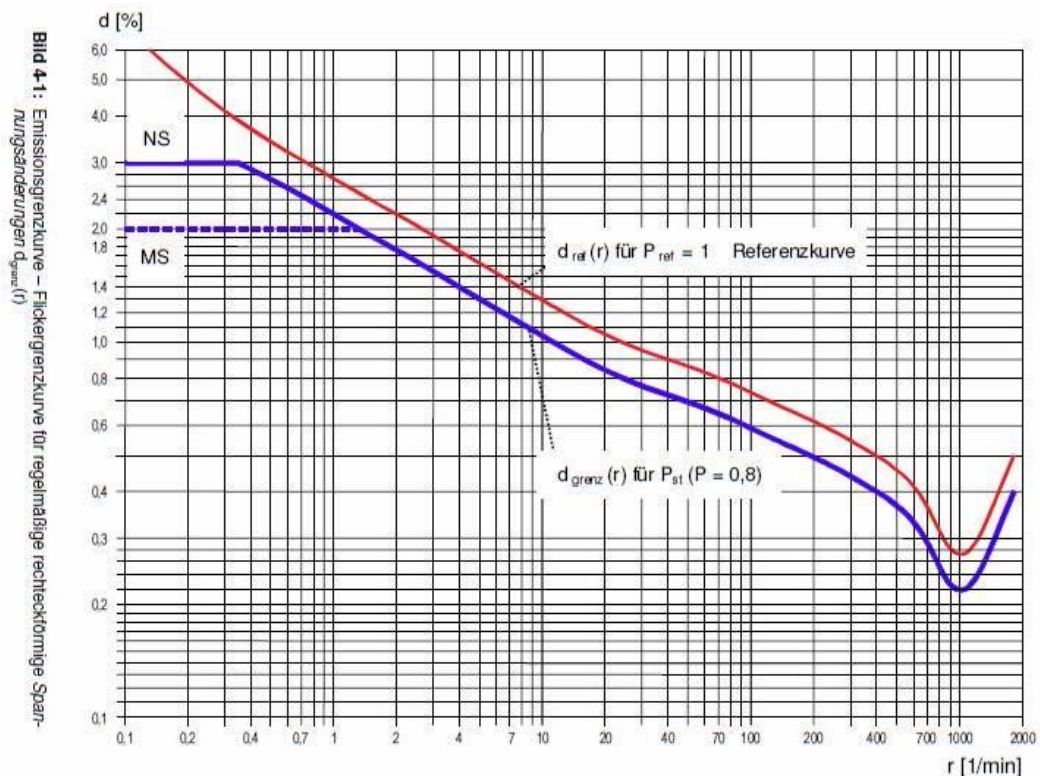


Abbildung 7.3 Emissionsgrenzkurve für regelmäßige, rechteckförmige Spannungsänderungen [18]

In Rot ist die Referenzkurve für ein  $P_{ref} = 1$  eingezeichnet. Dies ist der Kurzzeitflickerwert  $P_{st}$  für Einzelgeräte welcher in [12] festgelegt ist. Der Langzeitflickerwert  $P_{lt}$  darf dabei 0,65 nicht überschreiten.

Für eine einzelne Kundenanlage ist nach [18] jedoch nur eine Kurzzeitflickeremission von  $P_{st} = 0,8$  zulässig. Diese Referenzkurve ist in Blau eingezeichnet. Für die Langzeitflickeremission ist der Grenzwert mit  $P_{lt} = 0,5$  festgelegt.

Zu Beginn der blauen Kurve ( $P = 0,8$ ) sieht man im Vergleich zur Roten ( $P = 1$ ) einen horizontalen Verlauf. Diese Begrenzung ist nicht aufgrund der Flickerwirkung, sondern wegen der Einhaltung des Spannungsniveaus erforderlich.

In den Normen finden sich folgende Grenzwerte in Bezug auf Spannungsänderungen:

	EN 61000-3-2 EN 61000-3-11	TOR D2
$d_{max}$	4 % / 6 % <sup>2</sup>	3 % ( $r \geq 0,01 \text{ min}^{-1}$ ) 6 % ( $r < 0,01 \text{ min}^{-1}$ )
$P_{lt}$	0,65	0,5
$P_{st}$	1	0,8
$d_c$	3,3 %	nicht definiert

Tabelle 7.7 Grenzwerte aufgrund von Spannungsschwankungen

---

<sup>2</sup> Bei automatischen Wiederanlauf mit einer Verzögerung einiger weniger 10 s  
Andreas Sulzenbacher

Tabelle 7.8 gibt eine Übersicht der anwendbaren Produktnormen in Abhängigkeit des Eingangsstroms des Gerätes und den darin enthaltenen Testbedingungen.

Geräte mit einem Eingangsstrom $\leq 16$ A je Leiter	Prüfung nach ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-3 [12] <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prüfung an Bezugsimpedanz: Anschluss bei <math>S_{k\text{ Netz}} \geq 570\text{ kVA}</math> möglich bei Nichteinhaltung: Prüfung nach EN 61000-3-11</li> </ul>
Geräte mit einem Eingangsstrom $> 16$ A und $\leq 75$ A je Leiter	Prüfung nach ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-11 [13] <ul style="list-style-type: none"> <li>- Prüfung an Bezugsimpedanz: keine Sonderanschlussbedingung – Übereinstimmung mit EN 61000-3-3 erklären Anschluss bei <math>S_{k\text{ Netz}} \geq 570\text{ kVA}</math> möglich</li> <li>- Prüfung an Testimpedanz: Anschluss bei <math>S_{k\text{ Netz}} \geq 750\text{ kVA}</math> wenn Strombelastbarkeit <math>\geq 100</math> A je Leiter gegeben</li> <li>- Prüfung an selbst definierter Impedanz: Angabe einer Mindestkurzschlussleistung Anschluss bei <math>S_{k\text{ Netz}} \geq S_{k\text{ Herstellerangabe}}</math> möglich</li> </ul>

Tabelle 7.8 Mindestkurzschlussleistungen aufgrund von Spannungsschwankungen lt. Normen  
Die weiteren Berechnungen bezüglich Spannungsschwankungen wird für jene EV durchgeführt, welche bei der Ladung relevante Leistungsschwankungen zeigen (EV E und G). Bei den Messungen konnte aufgrund der 2-sec-Mittelung nicht festgestellt werden welche Form der Verlauf der Leistungsschwankung hat, es wird bei der Berechnung daher ein rechteckförmiger Verlauf angenommen (worst-case). Für den Vergleich mit den Grenzwerten aus den Normen, werden jene aus der TOR D2 verwendet, da diese strenger als in EN 61000-3-2 bzw -3-12 definiert sind.

Für EV mit einem Eingangsstrom  $\leq 16$  A wird angenommen, dass diese an einem Verknüpfungspunkt angeschlossen sind, welcher eine Kurzschlussleistung gleich der Bezugsimpedanz besitzt ( $S_{3kV} \geq 570\text{ kVA}$ ).

Für EV mit einem Eingangsstrom  $> 16$  A und  $\leq 32$  A wird angenommen, diese sie an einem Verknüpfungspunkt angeschlossen sind, welcher eine Kurzschlussleistung gleich der Testimpedanz besitzt ( $S_{3kV} \geq 750\text{ kVA}$ ).

### 7.2.1 Langfristige Spannungsänderungen

Langfristige Spannungsänderungen  $d_c$  treten z.B. durch Zuschalten von Lasten auf. Der Grenzwert für die größte Spannungsänderung ist in den TOR D2 nicht eindeutig definiert und wird mit  $d_c = 3\%$  angenommen.

Die größte Spannungsänderung durch einen Einschaltstrom an einem Verknüpfungspunkt ergibt sich zu:

$$d_c = \frac{\Delta I \cdot Z_{kV}}{U_{phase}} \cdot 100 \quad (7.8)$$

### EV mit einem Eingangsstrom $\leq 16$ A je Leiter

Ein einphasig ladendes EV mit einem Eingangsstrom von 16 A, verursacht an der Bezugsimpedanz ( $Z_{kV} = Z_{1k\text{ref}} = 0,47 \Omega$ ) folgenden Spannungsabfall:

$$d_c = \frac{16 \text{ A} \cdot 0,47 \Omega}{230 \text{ V}} \cdot 100 = 3,3 \%$$

Die berechnete Spannungsänderung liegt nur gering über dem Grenzwert von 3 % und ist somit noch tolerierbar. Für eine zweiphasige Ladung ergeben sich dieselben Spannungsabfälle wie bei einphasiger Ladung. Bei dreiphasiger Ladung würde bei der Berechnung mit der geringeren dreiphasigen Bezugsimpedanz ( $Z_{3k\text{ref}} = 0,28 \Omega$ ) gerechnet, wodurch sich auch geringere Spannungsabfälle ergeben. Werden daher die Grenzwerte bei einphasiger Ladung eingehalten, werden diese auch bei zwei- bzw. dreiphasiger Ladung eingehalten.

### EV mit einem Eingangsstrom $>16$ A und $\leq 32$ A je Leiter

Für ein EV mit einem Eingangsstrom von 32 A, ergibt sich bei dreiphasiger Ladung an der Testimpedanz ( $Z_{kV} = Z_{3k\text{test}} = 0,21 \Omega$ ) folgender Spannungsabfall:

$$d_c = \frac{32 \text{ A} \cdot 0,21 \Omega}{230 \text{ V}} \cdot 100 = 2,9 \%$$

Bei einphasiger Ladung ( $Z_{kV} = Z_{1k\text{test}} = 0,35 \Omega$ ) errechnet sich ein Spannungsabfall von:

$$d_c = \frac{32 \text{ A} \cdot 0,35 \Omega}{230 \text{ V}} \cdot 100 = 4,9 \% \quad (7.9)$$

Für dreiphasige Ladung wird der Grenzwert für Eingangsströme bis 32 A eingehalten. Bei einphasiger Ladung mit einem Eingangsstrom von 32 A wird, bei Anschluss an der Testimpedanz, der geforderte Grenzwert überschritten. Dieser kann durch Erhöhung der Netzkurzschlussleistung oder Begrenzung des Eingangsstroms eingehalten werden.

Eine Kurzschlussleistung, bei welcher der Grenzwert eingehalten wird, kann folgendermaßen berechnet werden:

$$S_{3kV,d_c} = S_{3k\text{ref}} \cdot \frac{d_{c,\text{berechnet}}}{d_{c,\text{Norm}}} \quad (7.10)$$

Mit dem Wert aus (7.9) ergibt sich bei einphasiger Ladung mit 32 A eine benötigte dreiphasige Kurzschlussleistung von:

$$S_{3kV,d_c} = 750 \text{ kVA} \cdot \frac{4,9\%}{3\%} = 1225 \text{ kVA}$$

Dies entspricht einem Kurzschlussleistungsverhältnis von:

$$R_{sce} = \frac{S_{kS_{3kV,d_c}}}{S_A \cdot \frac{3}{n_{phasen}}} = \frac{1225 \text{ kVA}}{32 \text{ A} \cdot 230 \text{ V} \cdot \frac{3}{1}} \approx 55$$

Durch Begrenzung des Eingangsstroms bei einphasiger Ladung, kann auch an der Testimpedanz der geforderte Grenzwert für  $d_c$  eingehalten werden. Durch Umformen von (7.8) lässt sich der maximale Eingangsstrom berechnen:

$$d_c = \frac{I_n \cdot Z_{kV}}{U_n} \cdot 100 \rightarrow I_n = \frac{d_c \cdot U_n}{Z_{kV} \cdot 100} \quad (7.11)$$

$$I_n = \frac{3\% \cdot 230 \text{ V}}{0,35 \Omega \cdot 100} \approx 20 \text{ A}$$

Für EV mit einem Eingangsstrom  $> 16 \text{ A}$  wird bei ein- und zweiphasiger Ladung die max. Spannungsänderung eingehalten, falls an der Testimpedanz mit weniger als 20 A geladen wird. Wenn ein höherer Strom zu erwarten ist, muss ein Kurzschlussleistungsverhältnis von 55 gegeben sein.

## 7.2.2 Kurzfristige Spannungsänderungen

Häufige kurzfristige Spannungsänderungen ( $r \geq 0,1 \text{ min}^{-1}$ ) treten bei Leistungsschwankungen während des Ladevorgangs auf.

Die Grenzwerte nach TOR D2 sind:

- maximaler Spannungsabfall:  $d_{max} = 3\%$
- Kurzzeitflicker:  $P_{st} = 0,8$
- Langzeitflicker:  $P_{lt} = 0,5$

Nennenswerte Leistungsschwankungen treten nur bei EV E und G auf (Tabelle 7.9)

EV	$t$ <i>min</i>	$N$	$r$ <i>min</i> <sup>-1</sup>	$\Delta I$ <i>A</i>
E	10	86	8,6	10
G	70	7	0,1	10

Tabelle 7.9 Einbrüche im Ladestrom der EV E und G

Für die Beispielberechnung werden die Daten von Fahrzeug E verwendet. Dieses ist ein einphasiges Gerät, es wird somit die Auswirkung an der einphasigen Bezugsimpedanz ( $Z_{kV} = Z_{1kref} = 0,47 \Omega$ ) berechnet. Für den maximalen Spannungsabfall ergibt sich ein Wert von:

$$d_{max} = \frac{10 A \cdot 0,47 \Omega}{230 V} \cdot 100 = 2,04\%$$

Die Ermittlung der Flickeremissionen erfolgt mittels den  $P_{ref}$  Kurven in den TOR Hauptabschnitt D2, diese lassen sich nach [12] und [41] näherungsweise approximieren durch:

$$P_{st} = 0,36 \cdot d \cdot F \cdot \sqrt[3,2]{r} \quad (7.12)$$

Diese Approximation ist für den Bereich  $0,1 \text{ min}^{-1} < r < 1000 \text{ min}^{-1}$  gültig.

Es ergibt sich ein Kurzzeitflicker von:

$$P_{st} = 0,36 \cdot 2,04 \% \cdot 1 \cdot \sqrt[3,2]{8,6} = 1,44$$

Der Langzeitflicker ermittelt sich aus 12 aufeinander folgende Kurzzeitflickerwerte:

$$P_{lt} = \sqrt[\alpha]{\sum_{n=1}^{12} \frac{P_{st,n}^\alpha}{12}} \quad (7.13)$$

wobei  $\alpha = 3$  gewählt wird

Bei einem konstanten Wert des Kurzzeitflickers ergibt sich der Langzeitflicker zu:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{t}{120} \cdot P_{st}^3} \quad (7.14)$$

Für EV E ergibt sich somit eine Langzeitflickerwert von:

$$P_{lt} = \sqrt[3]{\frac{10 \text{ min}}{120 \text{ min}} \cdot 1,44^3} = 0,63$$

In Tabelle 7.10 finden sich die Werte für die größte Spannungsänderung sowie Kurzzeit- und Langzeitflicker für die Fahrzeuge E und G.

EV	$d_{max}$	$P_{st}$	$P_{lt}$
	%		
E	2,04	1,44	0,63
G	2,04	0,36	0,30
TOR D2	3	0,8	0,5
EN 50160	-	-	1

Tabelle 7.10 max. Spannungsabfall und Flickerwerte für EV E und G an der Bezugsimpedanz sowie die Grenzwerte aus [18] und [10]

Fahrzeug G hält die geforderten Grenzwerte ein, bei EV E übersteigen die Flickerwerte die Grenzwerte nach TOR D2. Der für die Netzrückwirkung relevantere Langzeitflicker wird von EV E mit  $P_{lt} = 0,63$  nur leicht überschritten. Da ein Elektrofahrzeug, bei üblicher Nutzung, nur einige male pro Woche geladen wird und die Langzeit-Flickerstärke nach EN 50160 bei  $P_{lt} = 1$  liegen darf, kann EV E an einem Verknüpfungspunkt mit einer Kurzschlussleistung von 570 kVA angeschlossen werden, ohne dass mit einer Überschreitung des Langzeitflickerpegels nach EN 50160 zu rechnen ist. Müssen die Flickerwerte nach TOR D2 jedoch eingehalten werden, kann dies durch Anschluss des EV an einem Verknüpfungspunkt mit folgender Kurzschlussleistung erreicht werden:

Die benötigte Kurzschlussleistung aufgrund des Kurzzeitflickers ergibt sich mit:

$$S_{3kV,Pst} = S_{3kref} \cdot \frac{P_{st,berechnet}}{P_{st,Norm}} \quad (7.15)$$

Für den Langzeitflicker erfolgt die Berechnung analog zu (7.15):

$$S_{3kV,Plt} = S_{3kref} \cdot \frac{P_{lt,berechnet}}{P_{lt,Norm}} \quad (7.16)$$

Für EV E ergibt sich somit eine Kurzschlussleistung bzgl. des Kurzzeitflickers von:

$$S_{3kV,Pst} = 570 \text{ kVA} \cdot \frac{1,44}{0,8} = 1026 \text{ kVA}$$

Aufgrund des Langzeitflickers ergibt sich eine Kurzschlussleistung von:

$$S_{3kV,Plt} = 570 \text{ kVA} \cdot \frac{0,63}{0,5} = 718 \text{ kVA}$$

### 7.3 Spannungsunsymmetrie

Ein Großteil der untersuchten Elektrofahrzeuge sind einphasige Verbraucher. Dies bedeutet, dass im Vergleich zu einer dreiphasigen Ladung, bei gleicher Ladeleistung, der Leiterstrom den dreifachen Wert annimmt. Neben der höheren Strombelastung führt dies auch zu einem 6-fach höheren Spannungsabfall (in p.u.-Werten) sowie zu 6-fach höheren Verlusten.

Zudem führt die unsymmetrische Strombelastung zu einer Spannungsunsymmetrie. Diese wirkt sich besonders auf Drehfeldmaschinen schädlich aus und führt bei diesen zu zusätzlichen Erwärmungen. Der Verträglichkeitspegel für den Unsymmetriegrad durch das Zusammenwirken aller Netzverbraucher ist im stationären Betrieb gemäß EN 50160 mit  $k_U \leq 2\%$  festgelegt. Für einzelne Verbraucheranlagen ist der resultierende Unsymmetriegrad mit  $k_{U,i} \leq 0,7\%$  begrenzt [18].

Der Spannungs-Unsymmetriegrad ist dabei vom Strom-Unsymmetriegrad und dem Verhältnis von Anlagen- zu Kurzschlussleistung abhängig:

$$k_u \approx k_i \cdot \frac{S_A}{S_{kV}} \quad (7.17)$$

Mit der Forderung einer max. Spannungsunsymmetrie von  $k_u = 0,7\%$  ergibt sich für die Kurzschlussleistung somit:

$$k_u = k_i \cdot \frac{S_A}{S_{kV}} \rightarrow S_{kV} = k_i \cdot \frac{S_A}{0,007} \quad (7.18)$$

Alternativ kann auch das Kurzschlussleistungsverhältnis angegeben werden. Durch Umformen von (7.17) ergibt sich:

$$\frac{S_{kV}}{S_A} = \frac{k_I}{k_U}$$

Dieser Term in (7.2) eingesetzt ergibt:

$$R_{sce} = \frac{S_{kV}}{S_A \cdot \frac{3}{n_{Phasen}}} = \frac{k_I}{k_u \cdot \frac{3}{n_{Phasen}}} = \frac{1}{0,007 \cdot \frac{3}{1}} \approx 48$$

Für EV A ergibt sich mit den Werten aus Tabelle 6.3 eine Mindestkurzschlussleistung von:

$$S_{kV} = k_I \cdot \frac{S_A}{0,007} = 1 \cdot \frac{7,3 \text{ kVA}}{0,007} = 1040 \text{ kVA}$$



## 7.4 Kurzschlussleistungen

Bezüglich der verschiedenen Netzrückwirkungen (Oberschwingungen, Leistungsschwankungen und Unsymmetrie) ergeben sich auch jeweils unterschiedliche Kurzschlussleistungen. Tabelle 7.11 gibt einen Überblick über die in den Kapiteln 7.1 bis 7.3 durch Berechnung auf Grund der Messdaten bzw. Interpretation der entsprechenden Normen ermittelnden dreiphasigen Mindestkurzschlussleistung.

Oberschwingungsspannungen	<p><i>EV mit einem Eingangsstrom <math>\leq 16</math> A je Leiter</i> mind. 570 kVA (<math>\triangleq</math> Bezugsimpedanz)</p> <p><i>EV mit einem Eingangsstrom <math>&gt;16</math> A und <math>\leq 32</math> A je Leiter</i> mind. 750 kVA (<math>\triangleq</math> Testimpedanz), bei mehreren gleichzeitig ladenden EV oder starker Vorbelastung des Netzes 1500 kVA</p>
Spannungsschwankungen	<p><i>EV mit einem Eingangsstrom <math>\leq 16</math> A je Leiter</i> 570 kVA (<math>\triangleq</math> Bezugsimpedanz)</p> <p><i>EV mit einem Eingangsstrom <math>&gt; 16</math> A und <math>\leq 32</math> A je Leiter</i> <u>3-phasig</u>: 750 kVA (<math>\triangleq</math> Testimpedanz) <u>1/2-phasig</u>: bis 20 A: 750 kVA, <math>&gt; 20</math> A: <math>R_{sce} = 55</math></p>
Spannungsunsymmetrie	<p><math>R_{sce} = 48</math> (nur für 1- und 2-phasige Ladung)</p>

Tabelle 7.11 Zusammenfassung der Mindestkurzschlussleistungen  $S_{3kV}$  aufgrund von OS-Spannungen, Spannungsschwankungen und Spannungsunsymmetrie

Für die berechneten Kurzschlussleistungen bzw. Kurzschlussleistungsverhältnisse, speziell jene aufgrund von OS-Spannungen, kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass es zu unzulässigen Auswirkungen auf die Spannungsqualität kommen kann. Vor allem da bei einzelnen EV eine teilweise starke Überschreitung der Grenzwerte auftritt. Hier ist durch Messungen zu klären wie hoch die OS-Spannungsvorbelastung im betrachteten Netz ist und wie sich die OS-Ströme eines anzuschließenden EV darauf auswirken.

Für Ladestationen an welchen Elektrofahrzeuge mit bis zu 22 kW laden können, ergeben sich bei verschiedenen großen Ladeströmen für die verschiedenen Netzrückwirkungen folgende Mindestkurzschlussleistungen:

	Ladeleistung		OS-Spannungen	Spannungsschwankungen		Spannungsunsymmetrie		max. Wert
	1	3	1 / 2 / 3	1 / 2	3	1	2	1 / 2 / 3
$I_{ref}$	$S_A$	$S_A$	$S_{3k}$	$S_{3k}$	$S_{3k}$	$S_{3k}$	$S_{3k}$	$S_{3k}$
$A$	$kVA$	$kVA$	$kVA$	$kVA$	$kVA$	$kVA$	$kVA$	$kVA$
10	2,3	6,9	570	570	570	330	170	570
13	3,0	9,0	570	570	570	430	220	570
16	3,7	11,1	570	570	570	530	270	570
20	4,6	13,9	750	750	570	670	330	750
25	5,8	17,3	750	950	570	830	420	950
32	7,4	22,2	750	1230	750	1070	530	1230

Tabelle 7.12 Mindestkurzschlussleistungen für Ladestationen auf Grund der Messergebnisse

In der ersten Spalte findet sich der max. Bezugsstrom der an der Ladestation eingestellt ist und mit dem ein angeschlossenes EV laden kann. In den restlichen Spalten findet sich die für die verschiedenen Netzrückwirkungen gerundete dreiphasige Kurzschlussleistung:

Ladeleistungen: hier finden sich die aus dem Bezugsstrom und der Nennspannung berechneten maximalen Ladeleistungen für 1- bzw. 3-phasige Ladung.

OS-Spannungen: Mindestkurzschlussleistungen auf Grund der Berechnungen in Kapitel 7.1 (siehe auch Tabelle 7.11). Abhängig von der OS-Vorbelastung des Netzes sind teilweise Überschreitungen der OS-Pegel jedoch nicht ausgeschlossen.

Spannungsschwankungen: Mindestkurzschlussleistung auf Grund der Berechnungen in Kapitel 7.2 (siehe auch Tabelle 7.11). Durch Einschränkung der 1- und 2-phasigen Ladung lassen sich die Mindestkurzschlussleistungen um einen Faktor von bis zu 1,65 minimieren.

Spannungsunsymmetrie: Mindestkurzschlussleistung auf Grund der Berechnungen in Kapitel 7.3 (siehe auch Tabelle 7.11). Unsymmetrie tritt nur bei 1- oder 2-phasiger Ladung auf. Durch

max. Werte: höchster Wert aus den Spalten für OS-Spannungen, Spannungsschwankungen oder Spannungsunsymmetrie.

Werden an einem Verknüpfungspunkt mehrere EV bzw. Ladesäulen angeschlossen, müssen die in Tabelle 7.12 angegebenen Kurzschlussleistungen nicht in der Anzahl der Ladepunkte linear erhöht werden. Für die durch mehrere EV resultierenden Netzrückwirkungen können Faktoren wie Gleichzeitigkeit der Ladvorgänge oder Kompensationseffekte für Oberschwingungsströme mitberücksichtigt werden.

## 8 Zusammenfassung

### 8.1 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Durch die im Zuge dieser Arbeit durchgeführten Langzeit- und Einzelmessungen der Ladezyklen von 12 unterschiedlichen Elektrofahrzeugen können folgende Aussagen getroffen werden:

Der Ladeverlauf der meisten EV besteht aus einer Konstantstrom- und einer Konstantspannungsphase wie in Kapitel 4.5 beschrieben. Die Höhe des Ladestroms ist bis auf ein EV bei jedem Ladevorgang annähernd gleich und somit unabhängig vom Ladezustand des Fahrzeugs. Bei drei der untersuchten Fahrzeuge treten teilweise hohe Leistungsschwankungen am Ende der CC-Phase auf, welche eine unzulässige Flickerbelastung darstellen können. Aufgrund der Langzeitmessung standen für die Betrachtung der Messergebnisse nur 2-sec-Mittelwerte zur Verfügung. Dadurch konnten etwaige erhöhte Anlaufströme oder flickerrelevante Rückwirkungen nur bedingt beurteilt werden.

Obwohl an den betrachteten Ladesäulen mit bis zu 22 kVA (3x32 A) geladen werden könnte, laden die meisten Elektrofahrzeuge mit weniger als 3,7 kVA bzw. 1x16 A. Zudem laden nur zwei der EV dreiphasig. Bei den meisten Elektrofahrzeugen handelt es sich um ohmsche oder ohmsch-kapazitive Verbraucher, die abgegebene Blindleistung ist meist geringer als 20 % der Wirkleistung, was sich in einem Verschiebungsfaktor  $\cos \varphi$  nahezu 1 widerspiegelt. Die Blindleistung verringert sich in der CV-Phase zwar nicht gleich stark wie die Wirkleistung aber auch in dieser Phase haben die meisten EV immer noch einen Verschiebungsfaktor von annähernd 1.

Bei der Hälfte der Fahrzeuge tritt eine Grenzwertüberschreitung der Oberschwingungsströme für meist mehrere Ordnungszahlen auf, vor allem für Harmonische höherer Ordnung. Vergleicht man die  $THC$ - und  $THD_i$ -Werte von Elektrofahrzeugen mit Grenzwertüberschreitungen mit jenen ohne, kann kein Zusammenhang festgestellt werden. Das heißt, dass bei Fahrzeugen mit einem vermeintlich niedrigen  $THD_i$  zum Teil große Überschreitungen einzelner Harmonischer auftreten.

Die Winkel der Oberschwingungsströme sind von jenen der Oberschwingungsspannungen abhängig. Die OS-Spannungen sind von den im jeweiligen Netz typischerweise vorkommenden Verbrauchern abhängig und unterscheiden sich somit in unterschiedlichen Netzgebieten (Stadt, Land, Industrie, ...) und unterliegen zudem tages- und wochenzeitlichen Schwankungen. Eine Angabe der Winkel von Oberschwingungsströmen von Elektrofahrzeugen ist daher nicht allgemein gültig und sollte unter Angabe des korrespondierenden Winkels der Oberschwingungsspannung erfolgen. Ein Vergleich der Winkel von OS-Strömen von EV ist nur bei ähnlichen Winkeln der OS-Spannungen gleicher Ordnungszahl möglich.

Auch die Amplituden der OS-Ströme sind von den OS-Spannungen abhängig. Steigt die OS-Spannung an, führt dies zu einer Erhöhung des OS-Stroms. Die von einem EV emittierten OS-Ströme sind daher von der OS-Spannungsvorbelastung im Stromnetz abhängig.

Abhängig von der Kombination und Anzahl der Fahrzeuge kann für manche Harmonische ein sehr großer Auslöschungseffekt der Stromüberschwingungen stattfinden. Durch die unvorhersehbare Anzahl und Kombination von Elektrofahrzeugen welche gleichzeitig laden, kann jedoch allgemeine Aussage über mögliche Kompensationseffekte gegeben werden.

Durch die genannten Netzurückwirkungen, welche zum Teil über den zulässigen Grenzwerten liegen (EN 61000 Teile 3-2, 3-3, 3-11 und 3-12), wird an den Anschlusspunkten von Ladestationen eine vergleichsweise hohe Kurzschlussleistung benötigt (bis 1230 kVA bei einer 22 kW Ladestation) um keine unzulässige Auswirkung auf Spannungsqualität zu verursachen. Um kostenintensive Netzausbaukosten auf Grund der hohen benötigten Kurzschlussleistungen zu minimieren, sollte die Einhaltung der Grenzwerte von Seiten der Automobilindustrie eingefordert werden. Dies würde sich durch Einbau netzfreundlicherer, dreiphasiger Bordladegeräte erreichen lassen.

Nach TOR D1 müssen Betriebsmittel mit Komponenten der Leistungselektronik, hierzu zählen auch EV, ab bestimmten Leistungsgrenzwerten (z.B. 1,3 kVA 1-phasig) beim Netzbetreiber gemeldet werden. Diese Regelung ist in den TAEV mit dem zusätzlichen Hinweis übernommen, dass dies „z.B. *Ladestationen für Elektromobilität*“ betrifft. Dieser Hinweis sollte allgemeiner definiert werden, z.B. „*Lademöglichkeit für Elektrofahrzeuge*“, da in den meisten Privathaushalten EV mittels Ladebetriebsart 1 oder 2 geladen werden und hierfür keine dedizierte Ladestation notwendig ist sondern eine handelsübliche Schuko- bzw. CEE-Steckdose verwendet kann. Wie sich bei den Messungen gezeigt hat, können auch 1-phasig ladende EV mit einem Ladestrom < 16 A unzulässige Netzurückwirkungen verursachen.

Für Elektrofahrzeuge gibt es in TOR D1 nur allgemein definierte Leistungsgrenzwerte bzgl. Oberschwingungen. Die Messungen für diese Arbeit ergaben, dass EV aktuell meist nur einphasig laden, dadurch kann es zu Problemen bzgl. der Spannungsunsymmetrie kommen. Dies würde sich durch Begrenzung der einphasigen Ladung auf z.B. 3,7 kVA, wie dies in TOR D4 schon ähnlich für Erzeugungsanlagen vorgeschrieben ist, erreichen lassen.

## 8.2 Ausblick

Bei den durchgeführten Betrachtungen von Elektrofahrzeugen wurde meist nur der CC-Bereich des Ladevorgangs betrachtet. Die Emissionen in der CV-Phase der meisten Fahrzeuge sind Großteils geringer als in der CC-Phase, können aber z.B. für einzelne Harmonische von OS-Strömen auch ansteigen. Auch die Phasenlage von OS-Strömen ändert sich in der CV-Phase, wodurch Kompensationseffekte größer oder auch kleiner werden können.

Neben den niederfrequenten Emissionen treten auch hochfrequente Rückwirkungen im Bereich von 2-150 kHz auf. Diese können zu Dämpfung von PLC-Signalen, unerwünschten Geräuschen, reversible Funktionsstörungen, thermischen Belastungen und beschleunigter Alterung von Bauelementen führen [6]. Es fehlt jedoch noch an praktisch einsetzbarer Messtechnik, zudem ist die Normung für Messung, Emissionsbegrenzung und Störfestigkeit derzeit noch in Ausarbeitung [9].

Während der Langzeitmessung war das Messgerät auch eine Woche an einer Schnellladestation angeschlossen. In dieser Woche wurde jedoch nie über den DC-Teil der Ladestation geladen. Obwohl bei Schnellladestationen aufgrund der hohen Anschlussleistung und daher einem transformatornahen Anschluss mit eher geringen Auswirkungen auf die Spannungsqualität zu rechnen ist, sind noch entsprechende Messungen durchzuführen.

## 9 Literaturverzeichnis

- [1] Europäische Kommission, „Weissbuch: Fahrplan zu einem einheitlichen Verkehrsraum - Hin zu einem wettbewerbsorientierten und ressourcenschonenden Verkehrssystem,“ Brüssel, 2011.
- [2] BMLFUW; BMVIT; BMWFJ, „Umsetzungsplan - Elektromobilität in und aus Österreich,“ 2012.
- [3] „Statistik Austria,“ [Online]. Available: <http://www.statistik-austria.at>. [Zugriff am 27.04.2016].
- [4] H. Seljeseth, H. Taxt und T. Solvang, „Measurement of Network Impact from Electric Vehicles during Slow and Fast Charging,“ in *CIGRE - 22nd International Conference on Electricity Distribution - Paper 1353*, Stockholm, 2013.
- [5] J. Meyer, F. Möller, S. Müller, P. Schegner, C. Wald und S. Isensee, „Impact of Electric Vehicle Charging on Unbalance and Harmonic Distortion - Field Study In An Urban Residential Area,“ in *CIGRE - 23rd International Conference on Electricity Distribution - Paper 1404*, Lyon, 2015.
- [6] J. Meyer, A.-M. Blanco, M. Domagk und M. Klatt, „Oberschwingungen und höherfrequente Emission in Niederspannungsnetzen,“ in *Power Quality Fachtagung*, Graz, 2015.
- [7] L. Kütt, E. Saarijärvi, M. Lehtonen, H. Molder und J. Niitsoo, „Current Harmonics of EV Chargers and Effects of Diversity to Charging Load Current Distortions in Distribution Networks,“ in *ICCVI - 2nd International Conference on Connected Vehicles & Expo*, Las Vegas, 2013.
- [8] C. Noce, S. Riva und G. Sapienza, „Preliminary Tests Results about E-Car Harmonic Emissions,“ in *CIGRE - 22nd International Conference on Electricity Distribution - Paper 0778*, Stockholm, 2013.
- [9] A. Abart, „Spannungsqualität & EMV,“ in *Power Quality Fachtagung*, Graz, 2015.
- [10] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 50160,“ *Merkmale der Spannungsqualität in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen*, Mai 2008.
- [11] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2,“ *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom  $\leq 16$  A je Leiter)*, April 2015.
- [12] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-3,“ *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-*

*Versorgungsnetzen für Geräte mit einem Bemessungsstrom  $\leq 16$  A je Leiter, die keiner Sonderanschlussb. unterl. , April 2014.*

- [13] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-11,“ *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Grenzwerte - Begrenzung von Spannungsänderungen, Spannungsschwankungen und Flicker in öffentlichen Niederspannungs-Versorgungsnetzen - Geräte und Einrichtungen mit einem Bemessungsstrom  $< 75$  A, ..., Juni 2001.*
- [14] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-12,“ *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom  $> 16$ A und  $\leq 75$ A je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind, Juli 2012.*
- [15] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 61000-4-7,“ *Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Allgemeiner Leitfadens für Verfahren und Geräte zur Messung von Oberschwingungen und Zwischenharmonischen in Stromversorgungsnetzen und angeschlossenen Geräten, Februar 2010.*
- [16] IEC - International Electrotechnical Commission, „IEC 61851-21-1 CDV,“ *Electric vehicle conductive charging system - Part 21-1: Electric vehicle onboard charger EMC requirements for conductive connection to an a.c./d.c supply, 2015.*
- [17] Energie-Control Austria, „TOR D1,“ *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen - Hauptabschnitt D1: Netzzückwirkungsrelevante elektrische Betriebsmittel, 2004.*
- [18] Energie-Control Austria, „TOR D2,“ *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen - Hauptabschnitt D2: Richtlinie zur Beurteilung von Netzzrückwirkungen, 2006.*
- [19] Nationale Plattform Elektromobilität, „Technischer Leitfadens Ladeinfrastruktur,“ Berlin, 2013.
- [20] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 61851-1,“ *Elektrische Ausrüstung von Elektro-Fahrzeugen - Konduktive Ladesysteme für Elektrofahrzeuge - Allgemeine Anforderungen, März 2012.*
- [21] „Mennekes,“ [Online]. Available: <http://www.mennekes.de>. [Zugriff am 27 03 2016].
- [22] „Phoenix Contact,“ [Online]. Available: <https://www.phoenixcontact.com>. [Zugriff am 13 04 2016].
- [23] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 62196-2,“ *Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Kunduktives Laden von Elektrofahrzeugen - Teil 2: Anforderungen und Hauptmaße für die Kompatibilität und*

*Austauschbarkeit von Stift- und Buchsenvorrichtungen für Wechselstrom (IEC 62196-2:2011)*, Jänner 2015.

- [24] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, „ÖVE/ÖNORM EN 62196-3,“ *Stecker, Steckdosen, Fahrzeugkupplungen und Fahrzeugstecker - Kunduktives Laden von Elektrofahrzeugen - Teil 3: Anforderungen (...) dedizierten Laden mit Gleichstrom und als kombinierte Ausführung zum Laden mit Wechselstrom/Gleichstrom (IEC 62196-3:2014)*, Juni 2015.
- [25] „JAE,“ [Online]. Available: <http://www.jae.com>. [Zugriff am 23 04 2016].
- [26] „KEBA,“ [Online]. Available: <http://www.keba.com>. [Zugriff am 23 04 2016].
- [27] „Schrack Technik,“ [Online]. Available: <http://www.schrack.at/>. [Zugriff am 04 27 2016].
- [28] D. Schulz, *Akkus und Ladetechniken*, Haar bei München: Franzis Verlag, 2014.
- [29] M. Mültin, „Das Elektrofahrzeug als flexibler Verbraucher und Energiespeicher im Smart Home,“ in *Karlsruher Institut für Technologie, Dissertation*, Karlsruhe, 2014.
- [30] „Directindustry,“ [Online]. Available: [www.directindustry.de](http://www.directindustry.de). [Zugriff am 19 02 2016].
- [31] DEWETRON elektronische Messgeräte GesmbH, „Power Tutorial - User Manual,“ Graz, 2015.
- [32] „Chauvin Arnoux,“ [Online]. Available: <http://www.chauvin-arnoux.at/>. [Zugriff am 22 02 2016].
- [33] „Fluke,“ [Online]. Available: <http://www.fluke.com>. [Zugriff am 22 02 2016].
- [34] „National Instruments,“ [Online]. Available: <http://www.ni.com/white-paper/4018/en/>. [Zugriff am 05 01 2016].
- [35] F. Kronthaler, *Statistik angewandt*, Chur: Springer Spektrum, 2016.
- [36] D. Schulz, in *Netzrückwirkungen - Theorie, Simulation, Messung und Bewertung*, Berlin, VDE Verlag GmbH, 2004.
- [37] Technische Universität Dresden - Institut für elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik, „Jahresbericht 2011,“ Dresden, 2011.
- [38] M. Nöhner, „AW: Vortrag Energieinnovation Symposium Graz,“ in *email: martin.noehrer@ait.ac.at*, Austrian Institute of Technology, (01.04.2016).
- [39] M. Kaspirek, D. Mezera und K. Prochazka, „Problems of Harmonic Voltage in the LV Distribution Grid,“ in *CIGRE - 23rd International Conference on Electricity Distribution - Paper 0403*, Lyon, 2015.



- [40] H. Renner und M. Sakulin, „Spannungsqualität und Versorgungszuverlässigkeit, Vorlesungsskriptum,“ Graz, 2008.
- [41] D. Stade, H. Schäfer und P. Ulrich, Power Quality in Netzen mit Schweißanlagen der Automobilindustrie, VDE Verlag, 2006.
- [42] Österreichs E-Wirtschaft, „TAEV,“ *Technische Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 1000 Volt, mit Erläuterungen der einschlägigen Vorschriften*, 2012.
- [43] Energie-Control Austria, „TOR D4,“ *Technische und organisatorische Regeln für Betreiber und Benutzer von Netzen - Hauptabschnitt D4: Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen mit Verteilernetzen*, Februar 2016.

## 10Anhang

In Tabelle 10.1 finden sich alle Ladezyklen welche für die Analysen und Auswertungen verwendet wurden.

Messung	Fahrzeug	Datum	Ladebeginn	Ladezeit	CC-Zeit	CV-Zeit	Messplatz
Nr.				min	min	min	Nr.
1	A	16.06.2015	19:28	208	156	52	1
2	A	18.06.2015	06:48	119	38	81	1
3	A	19.06.2015	15:17	117	66	50	1
4	A	22.06.2015	09:14	51	10	41	1
5	A	23.06.2015	11:27	197	141	57	1
6	A	24.06.2015	08:57	59	6	53	1
7	B	15.06.2015	13:13	48	14	34	1
8	B	17.06.2015	07:33	274	41	233	1
9	B	19.06.2015	15:43	37	6	32	1
10	B	22.06.2015	15:32	50	13	36	1
11	B	23.06.2015	13:19	68	25	43	1
12	C	17.06.2015	06:33	62	58	4	1
13	C	17.06.2015	14:57	54	36	18	1
14	C	18.06.2015	17:50	86	81	5	1
15	C	20.06.2015	18:35	351	335	15	1
16	D	17.06.2015	10:13	208	194	14	1
17	D	17.06.2015	18:28	31	17	14	1
18	D	20.06.2015	08:33	140	123	17	1
19	D	24.06.2015	08:08	45	45	0	1
20	D	24.06.2015	12:25	232	204	28	1
21	E	19.06.2015	10:53	58	45	13	1
22	E	22.06.2015	13:28	79	72	7	1
23	E	23.06.2015	13:32	90	82	8	1
24	E	24.06.2015	13:29	89	72	16	1
25	F	15.06.2015	17:50	12	3	8	1
26	F	16.06.2015	19:36	19	1	18	1
27	F	17.06.2015	16:29	26	0	25	1
28	F	19.06.2015	17:41	102	27	76	1
29	F	28.06.2015	14:58	190	54	136	1
30	F	07.07.2015	11:14	63	29	34	3
31	G	15.06.2015	07:51	69	56	13	1
32	G	16.06.2015	09:04	78	66	13	1
33	G	16.06.2015	15:36	51	39	12	1
34	G	19.06.2015	19:59	84	72	12	1
35	G	22.06.2015	15:01	59	47	12	1
36	H	01.07.2015	09:22	262	256	7	2
37	I	02.10.2015	10:40	65	65	0	4
38	I	02.10.2015	12:50	52	45	7	4
39	J	26.06.2015	05:46	202	200	2	2
40	K	25.06.2015	18:16	258	255	3	2
41	L	02.10.2015	10:40	650	650	0	4

Tabelle 10.1 Auflistung aller für die Auswertung verwendeten Ladezyklen

Eine Übersicht über die Zuordnung der in DEWESoft verwendeten Messgrößenbezeichnungen und der jeweiligen Bezeichnung in den für die Auswertung verwendeten Matlabdateien:

Bezeichnung in Matlab	Beschreibung	Bezeichnung in DEWESoft
U_rms_Lx	Phasenspannung in V	U_rms_Lx
I_rms_Lx	Phasenstrom in A	I_rms_Lx
P_Lx	Wirkleistung in W	P_Lx
Q_Lx	Blindleistung in Var	QH_Lx
S_Lx	Scheinleistung in VA	S_Lx
cos_phi_Lx	Wirkungsfaktor der Grundschiwingung	cos_phi_Lx_H1
P	Gesamt-Wirkleistung aller drei Phasen in W	P
Q	Gesamt-Blindleistung aller drei Phasen in VAR	Q
S	Gesamt-Scheinleistung aller drei Phasen in VA	S
U_Lx_H	Spannungsharmonische in V	U_Lx_H
I_Lx_H	Stromharmonische in V	I_Lx_H
phi_Ux_H	Winkel der Spannungsharmonischen in °	phi_Ux_H*(-1)
phi_Ix_H	Winkel der Stromharmonischen in °	phi_Ix_H*(-1)
H_Vector	Vektor mit den individuellen Harmonischen	H_Vector
THD_U_Lx	Gesamtverzerrungsfaktor der Spannung in %	THD_U_Lx
THD_I_Lx	Gesamtverzerrungsfaktor des Stroms in %	THD_I_Lx
Plt_Lx	Kurzzeitflicker	Plt_Lx
Pst_Lx	Langzeitflicker	Pst_Lx
	<i>(alle als Effektivwerte)</i>	
Sample_rate	Abtastrate bei Messung in Hz	
Reduced_rate	Speicherrate der Messdaten in sec	
location	Ort an dem die Messung stattfand	
t_charge	Dauer des vollen Ladezyklus in sec	
t_cc	Dauer der CC-Ladung in sec	
t_cv	Dauer der CV-Ladung in sec	
Start_time	Zeitpunkt an dem Messdatenaufzeichnung beginnt	
t_abs	Zeitvektor mit absoluten Zeitstempeln	
t_rel	Zeitvektor mit relativen Zeitstempeln	
charge_start	Zeitpunkt des Beginns des Ladezyklus	
charge_reduction	Zeitpunkt d. Übergang CC -> CV Ladung	
charge_end	Zeitpunkt des Endes des Ladezyklus	
car_manufacturer	Autohersteller	
car_model	Automodell	
car_type	Typ des Fahrzeugs: eCar oder Hybrid	
car_license_plate	Kennzeichen des Fzg. (falls bekannt)	
File_name	Name der DEWESoft-Datei aus der exportiert wurde	
filename	Name der Matlab-Datei	

Tabelle 10.2 Beschreibung der in den Messdateien verwendeten Größen

In Tabelle 10.3 finden sich die zu der in Tabelle 6.6. aufgelisteten Stromüberschwingungen korrespondierenden Spannungsüberschwingungen.

EV	A		B		C		D		E		F	
Ordnungs- zahl	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$
$v$	V	°	V	°	V	°	V	°	V	°	V	°
1	239,26	0	238,94	0	240,52	0	239,64	0	240,42	0	239,74	0
2	0,09	46	-	-	-	-	-	-	-	-	0,06	115
3	1,31	81	1,37	81	0,66	73	1,21	80	1,36	82	0,62	57
5	3,37	-97	3,41	-97	3,56	-134	3,64	-93	3,47	-101	2,38	-117
7	2,75	-26	2,76	-26	2,91	-23	2,89	-28	2,75	-27	3,62	-10
9	0,44	-169	0,42	-178	0,12	162	0,52	-162	0,38	-176	0,12	-179
11	1,34	-53	1,33	-53	0,92	-59	1,27	-56	1,34	-54	0,92	-71
13	0,15	-	0,15	-	0,17	-	0,15	-	0,15	-	0,19	-
15	0,41	-	0,37	-	0,07	-	0,43	-	0,39	-	0,08	-
17	0,34	-	0,32	-	0,58	-	0,35	-	0,35	-	0,79	-
19	0,96	-	0,92	-	0,69	-	0,90	-	0,89	-	0,88	-
21	0,38	-	0,38	-	0,21	-	0,39	-	0,34	-	0,27	-
23	0,61	-	0,58	-	0,59	-	0,53	-	0,59	-	0,42	-

EV	G		H		I		J		K		L	
Ordnungs- zahl	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$	$U_v$	$\varphi_{u,v}$
$v$	V	°	V	°	V	°	V	°	V	°	V	°
1	238,28	0	238,16	0	237,21	0	239,62	0	240,23	0	237,79	0
2	0,08	-	-	-	0,10	49	0,10	-	0,10	-	0,12	-
3	1,19	79	1,29	80	0,72	59	1,04	81	0,73	73	0,12	-15
5	3,67	-89	2,90	-80	3,33	-49	3,30	-81	3,24	-111	3,76	-36
7	3,04	-29	2,76	-9	3,44	36	2,79	-23	2,61	-30	2,58	34
9	0,60	-166	0,66	-168	0,71	171	0,49	-156	0,19	-154	0,77	-160
11	1,26	-54	1,22	-54	2,13	-39	1,18	-53	1,21	-52	1,91	-27
13	0,16	-	0,21	-	1,19	73	0,36	-	0,26	-	0,96	94
15	0,46	-	0,36	-	0,42	122	0,34	-	0,20	-	0,38	106
17	0,38	-	0,24	-	0,38	-39	0,35	-	0,45	-	0,56	-6
19	0,90	-	0,84	-	0,23	126	0,93	-	0,85	-	0,11	158
21	0,33	-	0,37	-	0,09	-144	0,46	-	0,46	-	0,24	28
23	0,54	-	0,42	-	0,36	33	0,60	-	0,61	-	0,49	-5

Tabelle 10.3 Mittelwerte relevanter Spannungsüberschwingungen aller untersuchten Fahrzeuge

In Tabelle 10.4 finden sich die für die Berechnung des Kompensationseffekts verwendeten Fahrzeuge. Die für die Auswertung verwendeten Ladezyklen finden sich bis auf EV C in Tabelle 6.1. Für EV C wurde für Ordnungszahl 5 Messung Nr. 13, für die anderen Ordnungszahlen Nr. 12 verwendet.

Ordnungs- zahl	$k_p$	Beteiligte EV	$k_p$	Beteiligte EV
v				
3	0,77	A, B, D, E, G	0,74	A, B, C, D, E, G, H, J, K
5	0,90	A, B, D, E, G	0,85	A, B, C, D, E, G
7	0,08	A, B, D, E, G	0,49	A, B, C, D, E, G, J, K, L
9	0,82	A, B, D, E, G	0,49	A, B, C, D, E, G, H, I, L
11	0,14	A, B, D, E, G	0,39	A, B, C, D, E, G, H, J, K

Tabelle 10.4 Kompensationseffekt einzelner Harmonischer mit Auflistung der beteiligten EV

Tabelle 10.5 beinhaltet detailliertere Werte als in Tabelle 6.10 und Tabelle 6.11, in denen sich nur grob unterteilten Grenzwertüberschreitungen finden. Für EV A und F nur bis zur Ordnungszahl 13 angeführt da diese einen Eingangsstrom > 16 A besitzen und die entsprechende Norm nur Grenzwerte bis zur 13. Harmonische anführt. Für die Auswertung

wurde das Verhältnis  $k_{OS}$  definiert:  $k_{OS} = \frac{I_{gem}^{(v)}}{I_{Norm}^{(v)}}$

Ordnungs- zahl	Elektrofahrzeug											
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
v	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$	$k_{OS}$
3	0,11	0,39	0,67	0,35	0,13	0,03	0,11	0,41	0,09	0,10	0,08	0,07
5	0,11	0,23	0,14	0,40	0,26	0,56	0,16	0,30	0,32	0,32	0,27	0,19
7	0,04	0,05	0,19	0,19	0,09	1,10	0,16	0,15	0,15	0,26	0,21	0,15
9	0,41	0,37	0,14	0,39	0,28	0,15	0,18	0,17	0,66	0,68	0,52	0,73
11	0,17	0,19	0,15	0,34	0,18	0,64	0,34	0,13	0,94	0,63	0,40	0,67
13	0,39	0,45	0,28	0,22	0,39	0,51	0,33	0,19	0,62	0,62	0,96	1,13
15	-	0,75	0,34	0,76	0,76	-	0,22	0,29	1,25	1,26	1,35	1,38
17	-	0,40	0,28	0,81	0,65	-	0,31	0,12	1,11	1,62	1,64	0,48
19	-	0,20	0,18	0,47	0,52	-	0,55	0,40	1,40	2,69	2,51	1,63
21	-	0,32	0,42	0,37	0,47	-	0,30	0,18	1,39	1,29	1,05	0,80
23	-	0,71	1,13	0,92	0,95	-	0,17	0,47	0,28	3,24	3,76	1,20

Tabelle 10.5 Verhältnis gemessener Oberschwingungsstrom zu Grenzwert aus Norm

## 10.1 Formeln

Gesamter Oberschwingungsstrom:

$$THC = \sqrt{\sum_{v=2}^{23} I_v^2} \quad (10.1)$$

Oberschwingungs Gesamtverzerrungsstrom:

$$THD_i = \frac{THC}{I_1} \quad (10.2)$$

Oberschwingungs Gesamtverzerrungsspannung:

$$THD_u = \sqrt{\sum_{v=2}^{23} \left(\frac{U_v}{U_1}\right)^2} \quad (10.3)$$

Gewichteter Oberschwingungs-Teilstrom:

$$PWHC = \sqrt{\sum_{v=14}^{23} v \cdot I_v^2} \quad (10.4)$$

Wirkleistung:

$$P = \sum_{v=1}^{23} P_v = \sum_{v=1}^{23} U_v \cdot I_v \cdot \cos \varphi_v \quad (10.5)$$

Blindleistung:

$$Q = \sum_{v=1}^{23} Q_v = \sum_{v=1}^{23} U_v \cdot I_v \cdot \sin \varphi_v \quad (10.6)$$

Scheinleistung:

$$S = \sum_{v=1}^{23} S_v = \sum_{v=1}^{23} U_v \cdot I_v \quad (10.7)$$

Verschiebungsfaktor:

$$\cos \varphi = \frac{P_1}{S_1} \quad (10.8)$$

## 10.2 Elektrofahrzeuge

### Elektrofahrzeug A

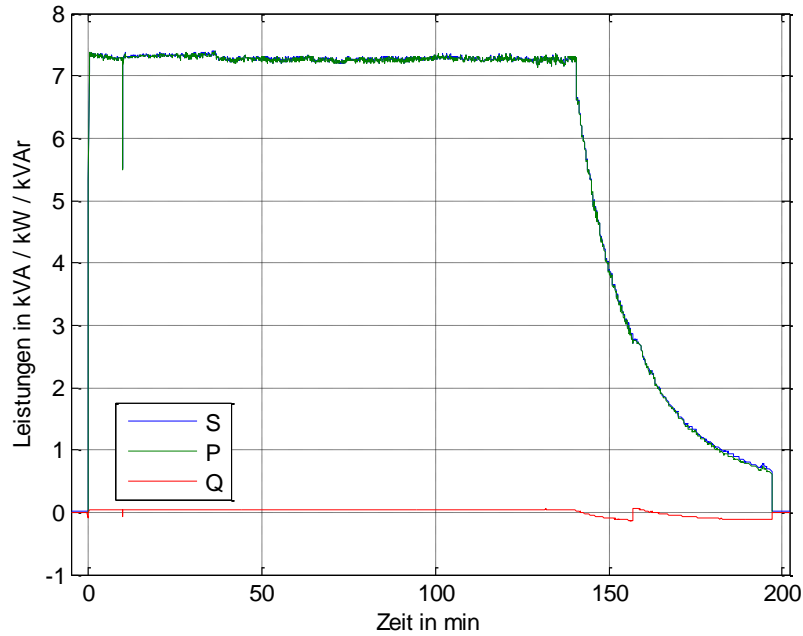


Abbildung 10.1 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug A

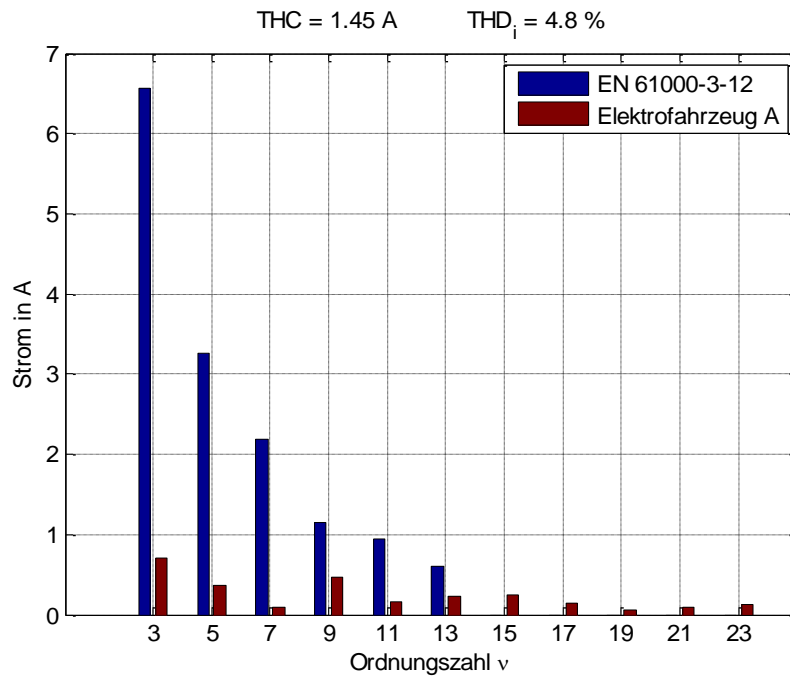


Abbildung 10.2 Vgl.- der emittierten OS-Ströme von EV A mit den Grenzwerten aus [14] für  $R_{scc} = 33$

### Elektrofahrzeug B

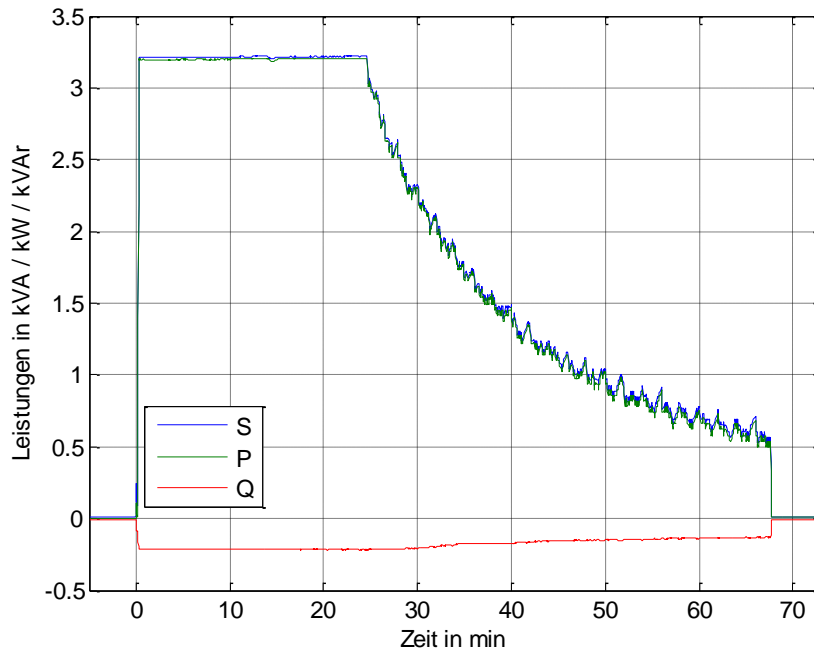


Abbildung 10.3 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug B

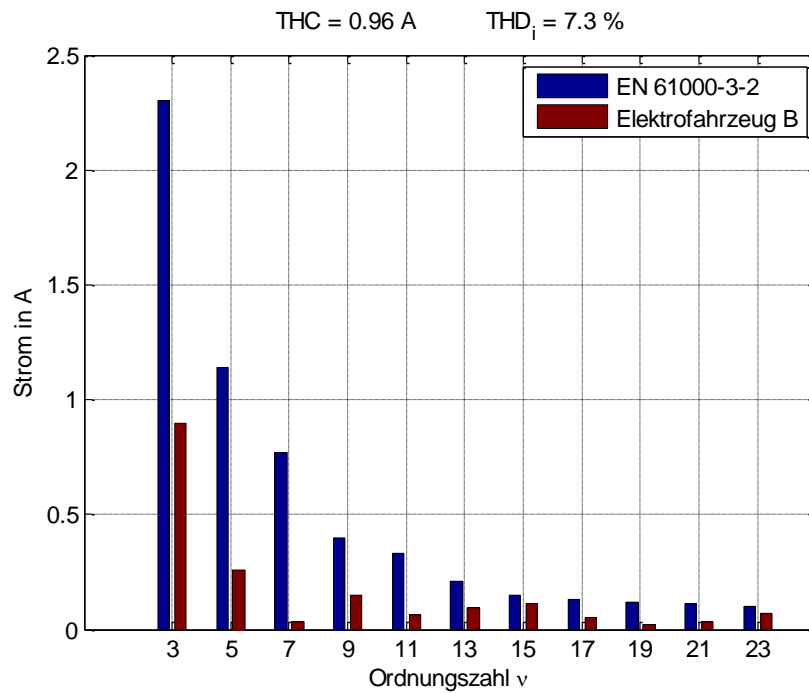


Abbildung 10.4 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV B mit den Grenzwerten aus [11]



### Elektrofahrzeug C

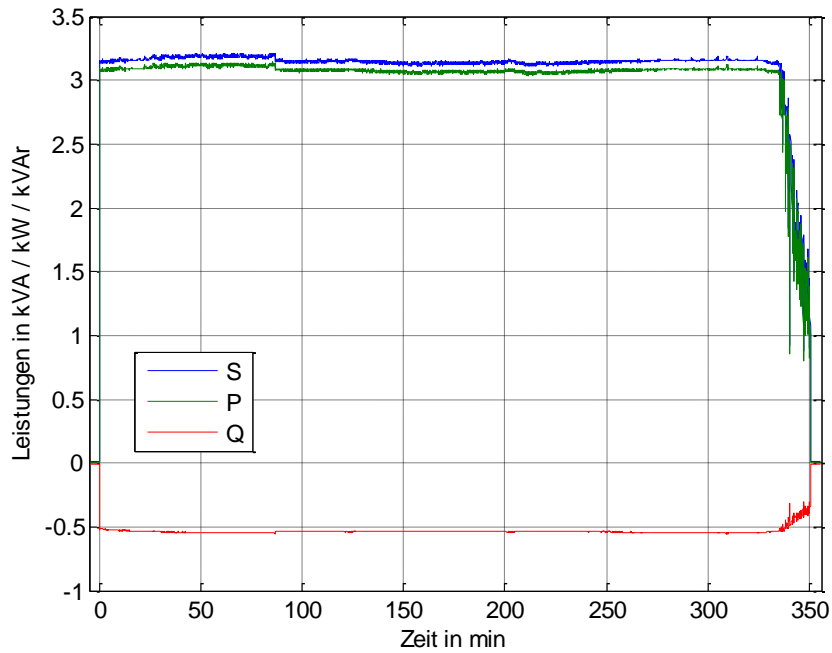


Abbildung 10.5 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug C

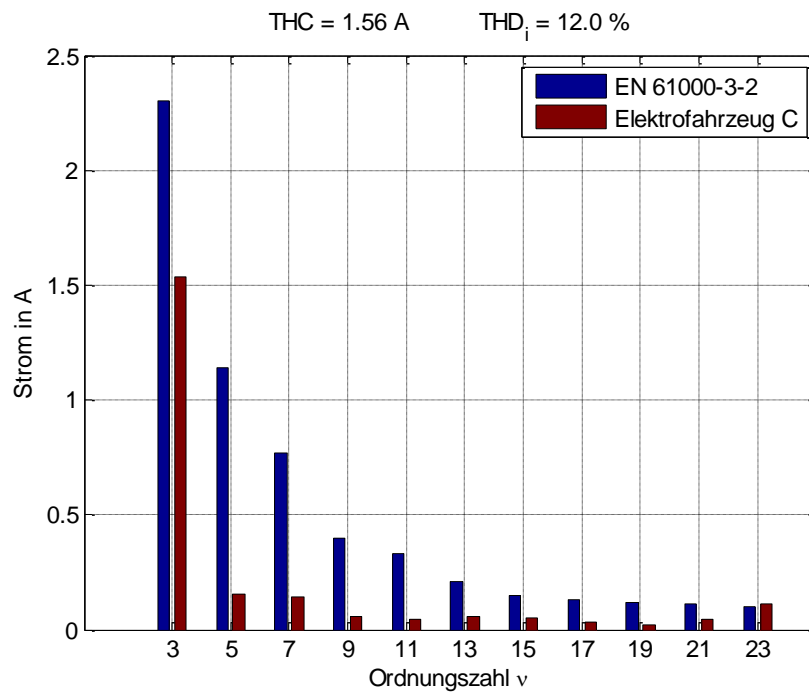


Abbildung 10.6 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV C mit den Grenzwerten aus [11]

Elektrofahrzeug D

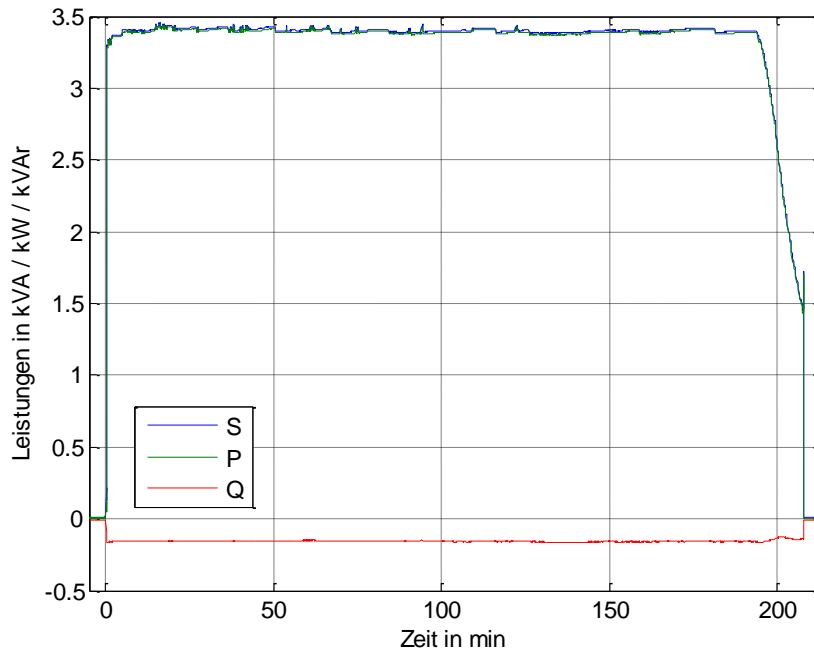


Abbildung 10.7 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug D

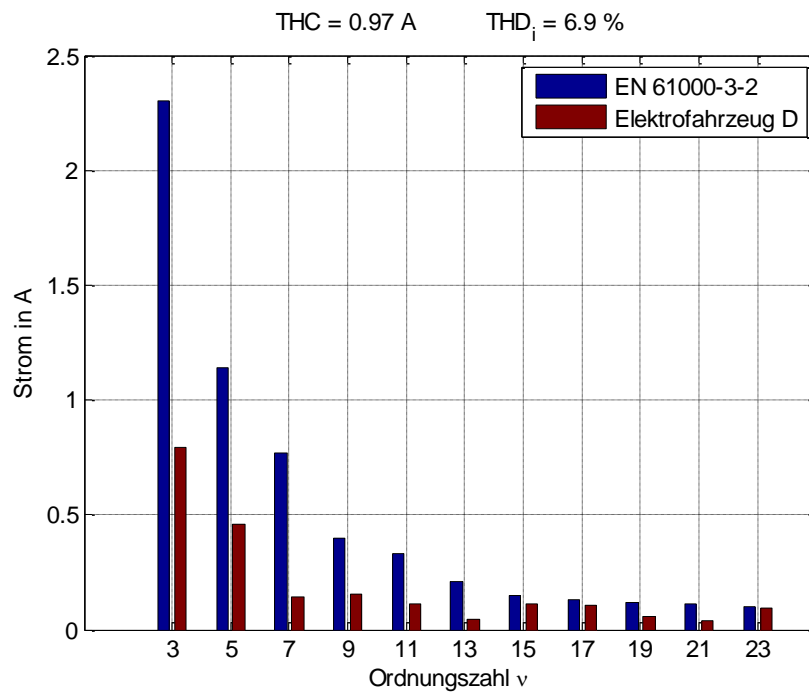


Abbildung 10.8 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV D mit den Grenzwerten aus [11]

Elektrofahrzeug E

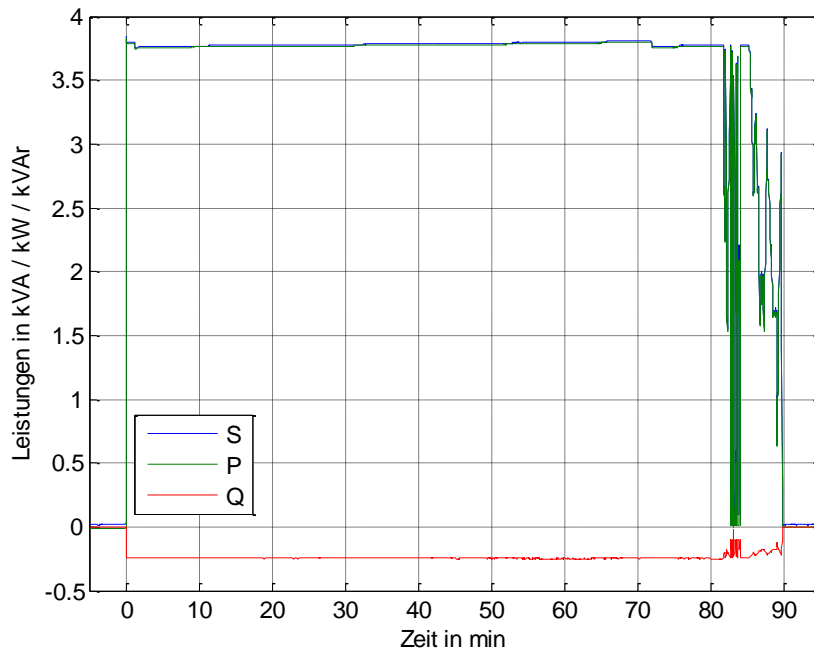


Abbildung 10.9 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug E

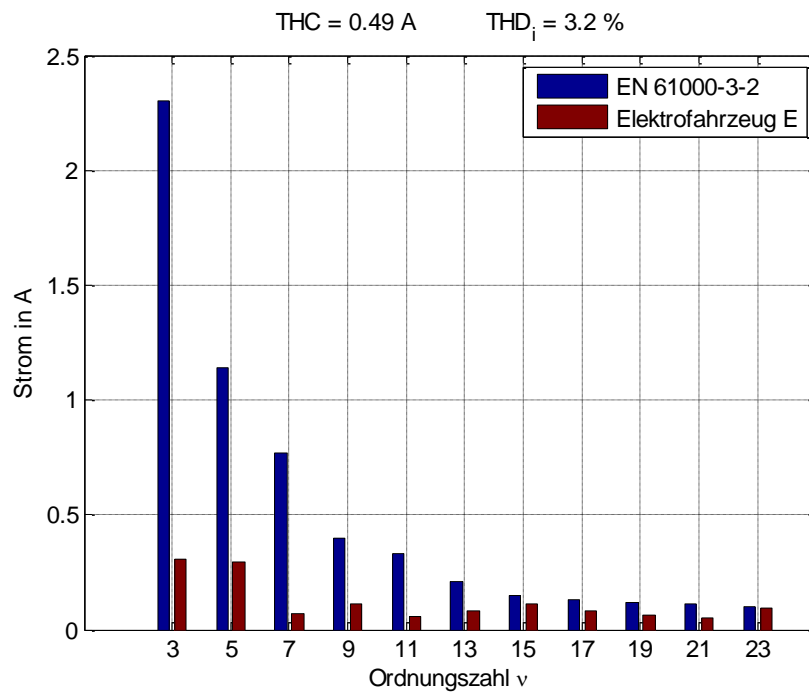


Abbildung 10.10 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV E mit den Grenzwerten aus [11]

Elektrofahrzeug F

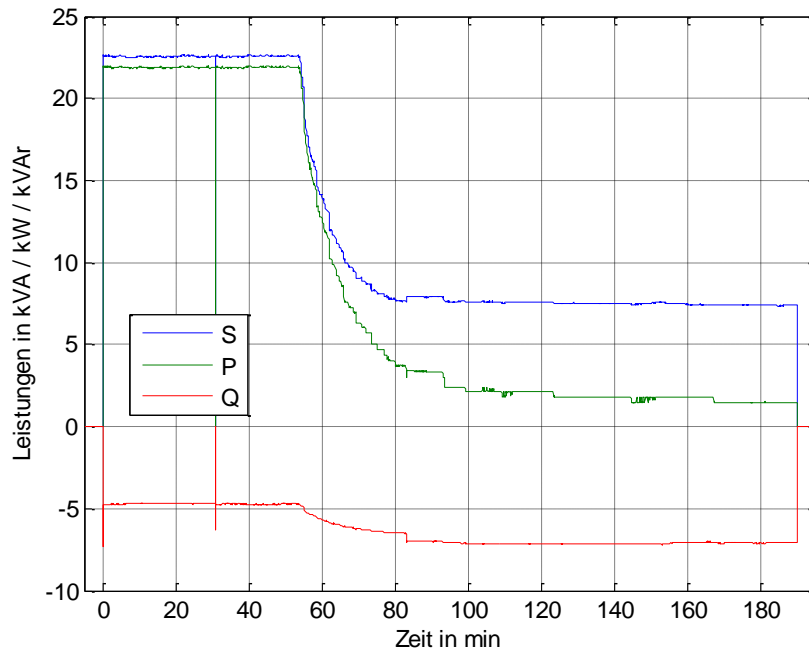


Abbildung 10.11 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug F

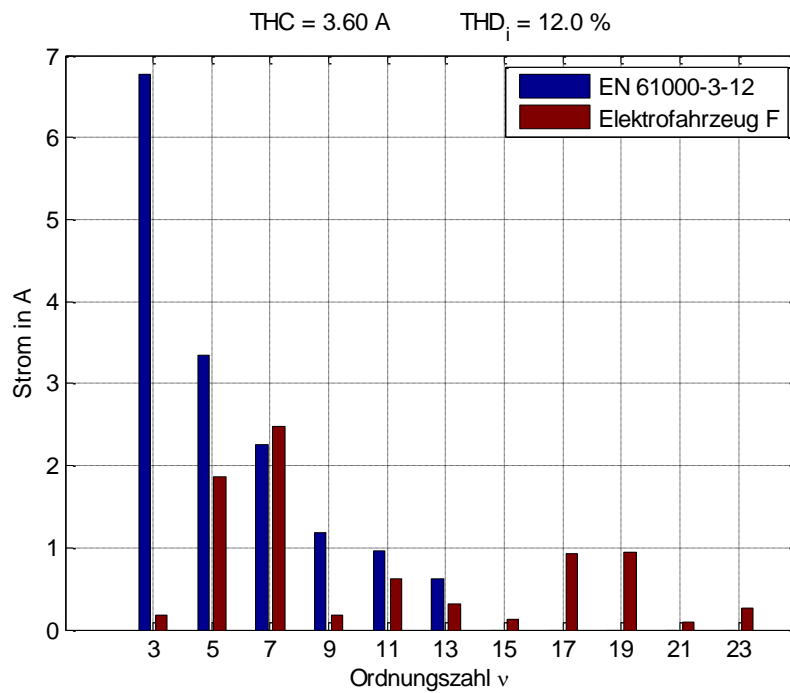


Abbildung 10.12 Vgl. der emittierten OS-Ströme von EV F mit den Grenzwerten aus [14] für  $R_{sce} = 33$

Elektrofahrzeug G

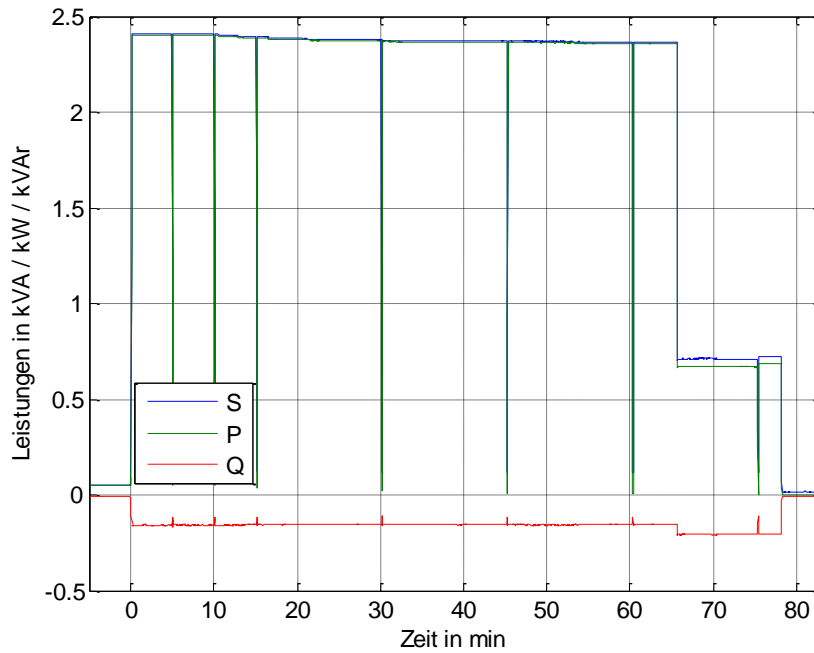


Abbildung 10.13 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug G

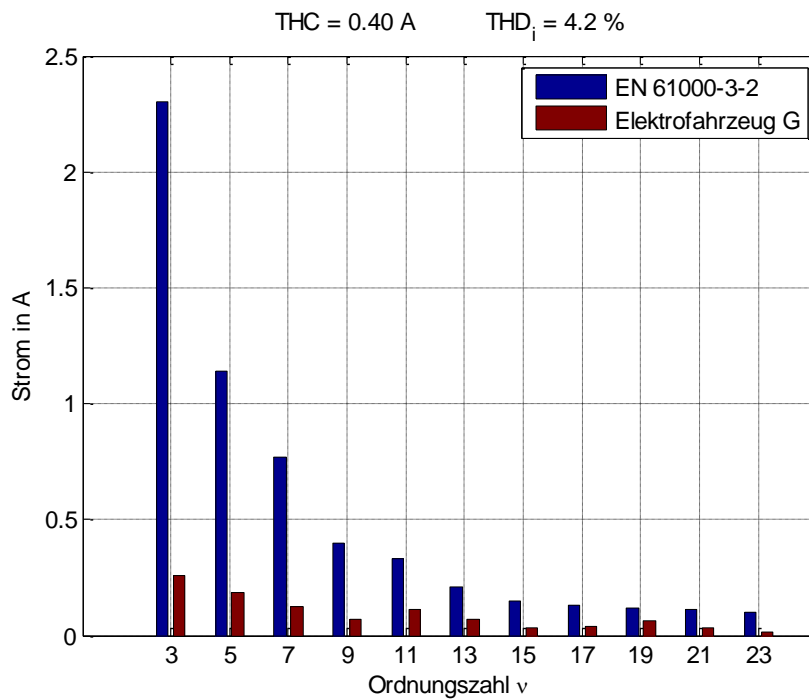


Abbildung 10.14 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV G mit den Grenzwerten aus [11]

### Elektrofahrzeug H

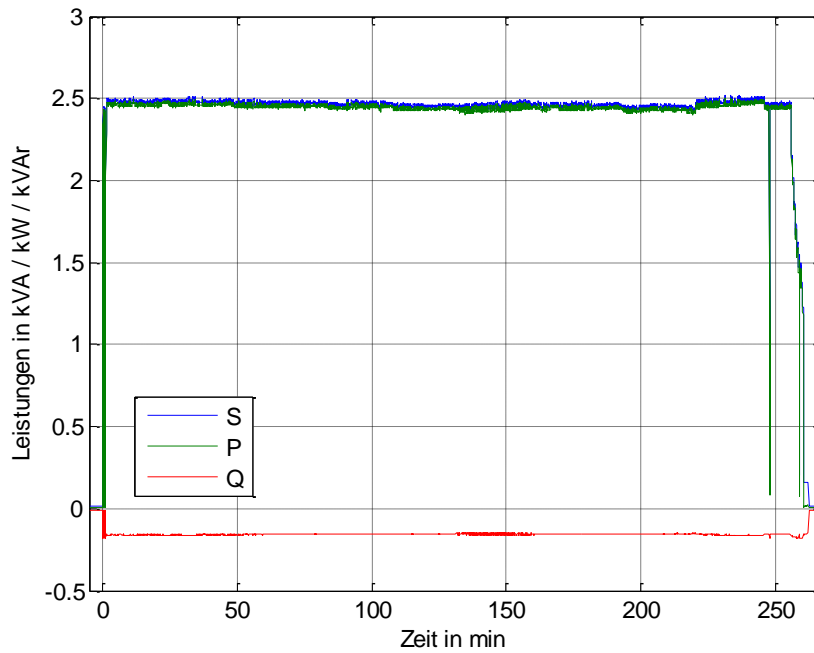


Abbildung 10.15 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug H

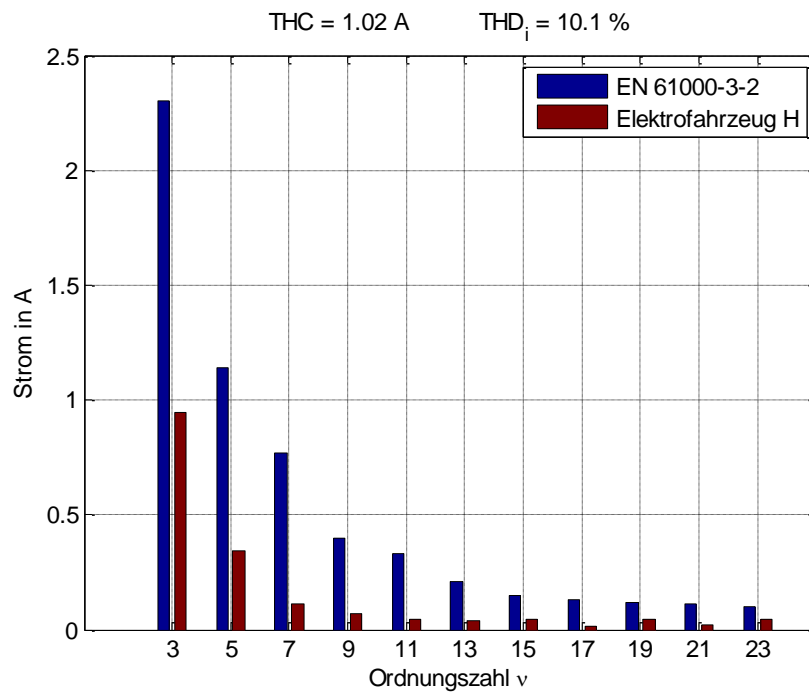


Abbildung 10.16 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV H mit den Grenzwerten aus [11]

Elektrofahrzeug I

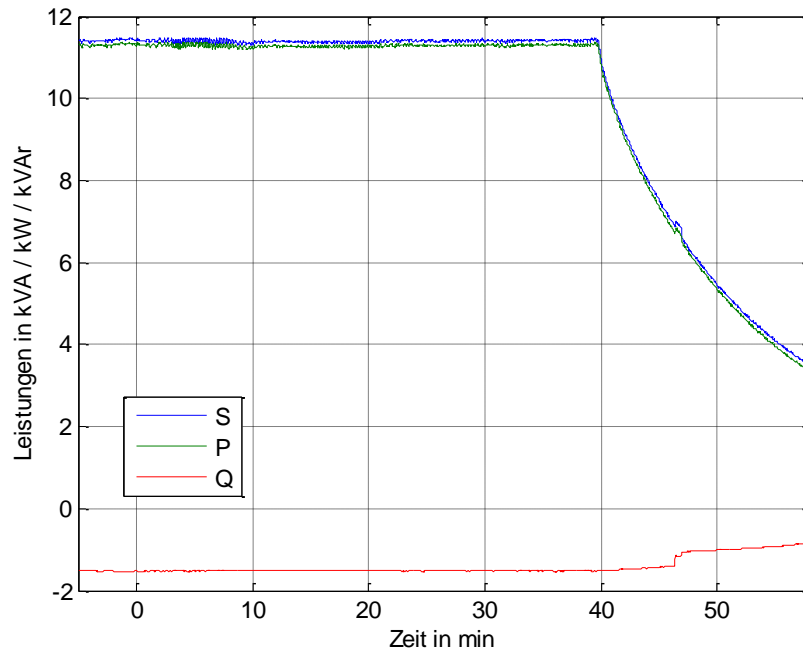


Abbildung 10.17 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug I

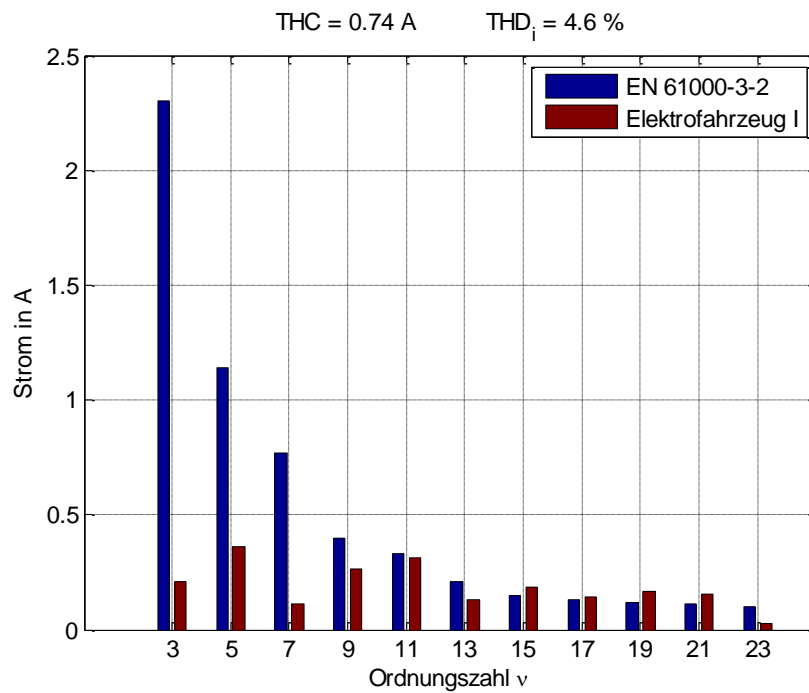


Abbildung 10.18 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV I mit den Grenzwerten aus [11]

Elektrofahrzeug J

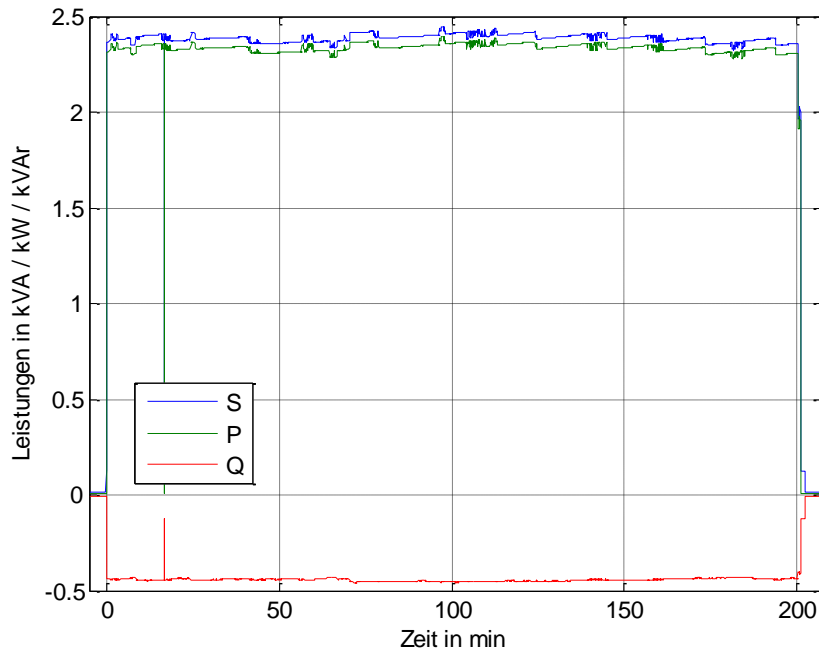


Abbildung 10.19 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug J

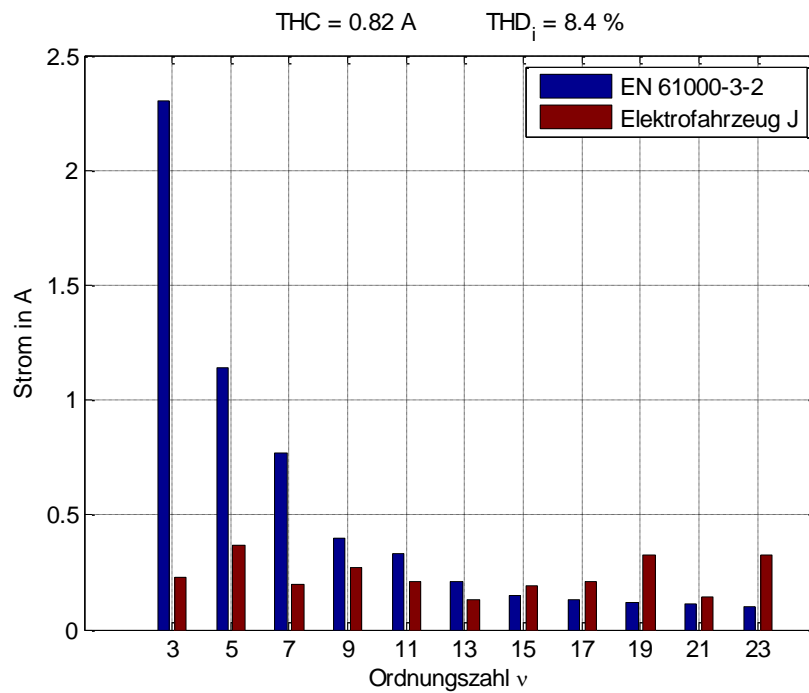


Abbildung 10.20 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV J mit den Grenzwerten aus [11]



Elektrofahrzeug K

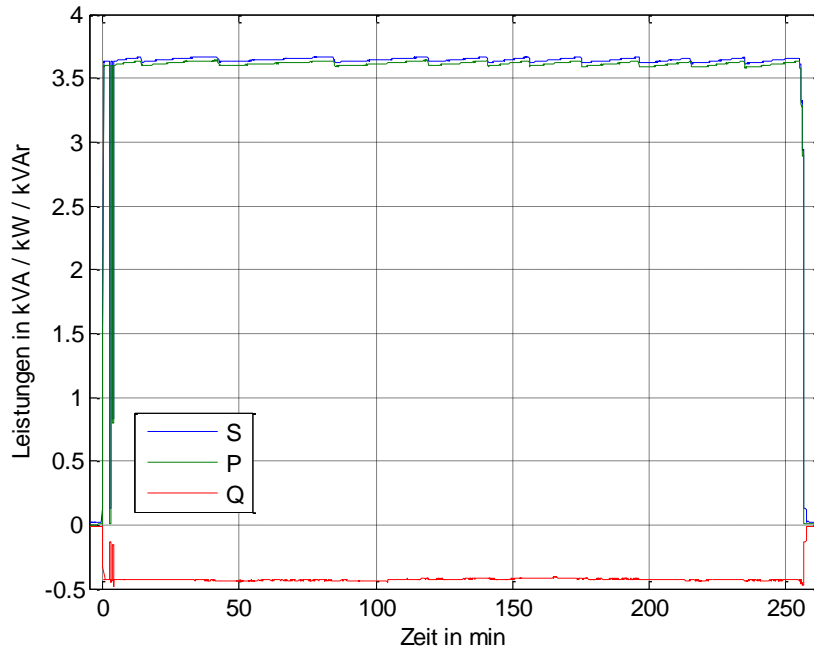


Abbildung 10.21 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug K

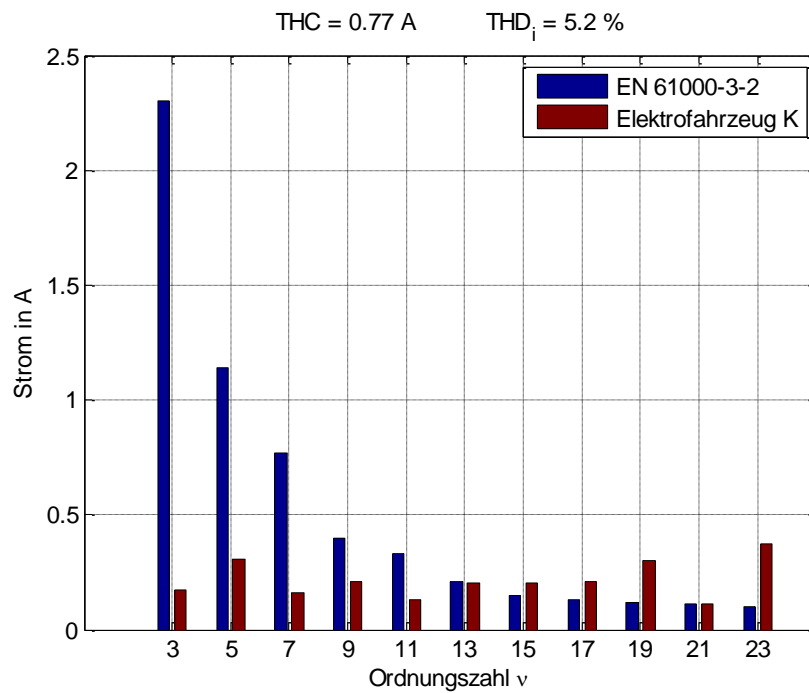


Abbildung 10.22 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV K mit den Grenzwerten aus [11]

Elektrofahrzeug L

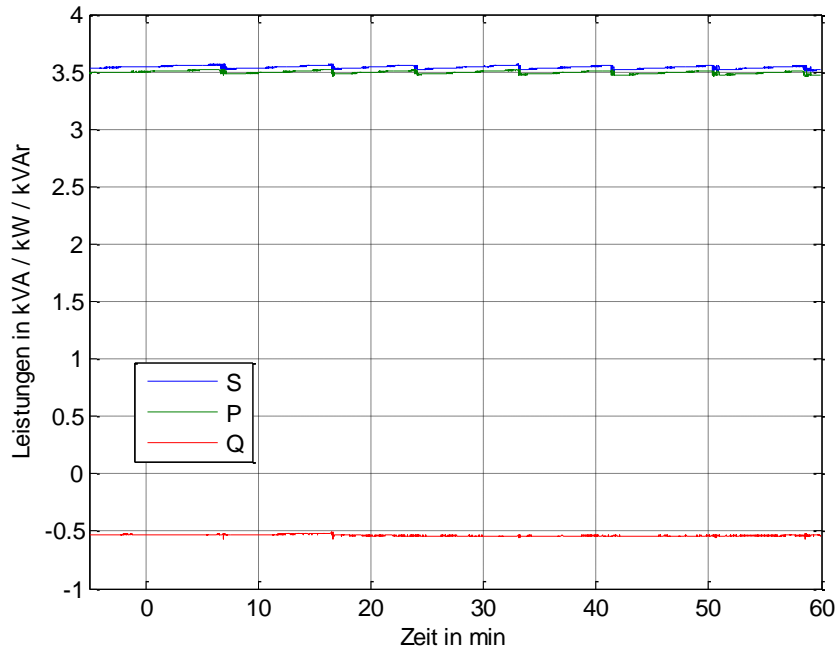


Abbildung 10.23 Ladeverlauf von Elektrofahrzeug L

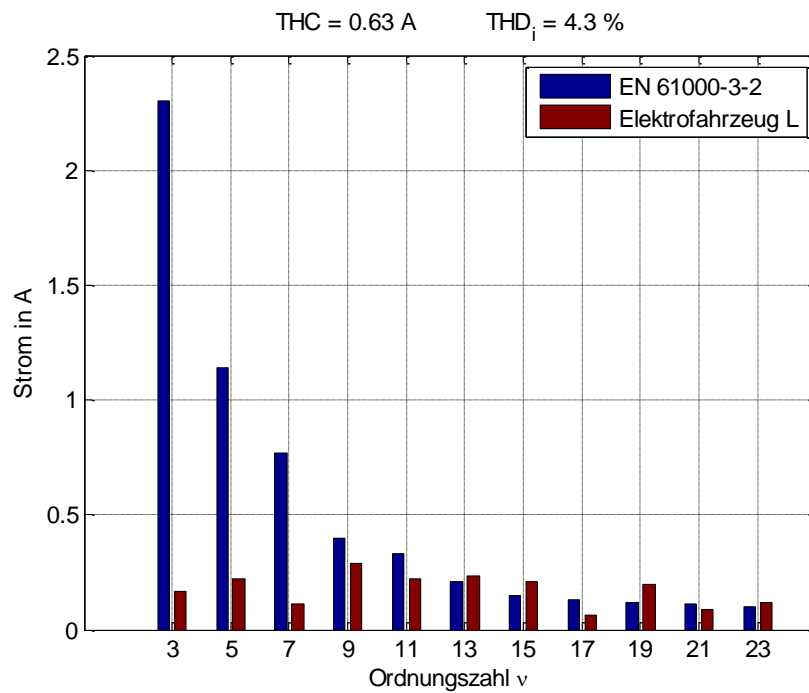


Abbildung 10.24 Vergleich der emittierten OS-Ströme von EV L mit den Grenzwerten aus [11]