

iENERGY 2.0 – IFEA Teilbericht 1/2

Analyse der Ladevorgänge ausgewählter Elektrofahrzeuge

Im Auftrag der FFG gefördert durch den
Klima und Energiefonds

Projekt Nr.: 2012-34
März 2016

TU Graz

Institut für Elektrische Anlagen

Inffeldgasse 18

A-8010 Graz

Institutsvorstand:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Lothar Fickert

Projektleiter:

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. Lothar Fickert (IFEA)

Dipl.-Ing. Dr. techn. Ernst Schmutzner (IFEA)

Wissenschaftliche Ausarbeitung:

Dipl.-Ing. Thomas Wieland (IFEA)

Dipl.-Ing. Thomas Höhn (IFEA)

März 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel / Methode	4
2	Einleitung	4
3	Grundlagen	5
3.1	Beladung eines Akkumulators	5
3.2	Ladeinfrastruktur.....	7
3.3	Normative Regelungen – Spannung, Strom und Oberschwingungen	8
4	Ergebnisse der Analyse von Ladevorgängen	11
4.1	Messaufbau	11
4.2	EV 1 – Peugeot 106 electric	14
4.3	EV 2 – Peugeot iOn	18
4.4	EV 3 – Peugeot e-VIVACITY Scooter	22
4.5	Vergleich der vermessenen Fahrzeuge	26
4.6	Netzimpedanz.....	29
5	Diskussion und Ausblick	33
6	Literaturverzeichnis	35

1 Ziel / Methode

Die vorliegende Untersuchung stellt ein Teilprojekt mit wissenschaftlicher Begleitung durch das Institut für Elektrische Anlagen der TU Graz im Rahmen des seitens der der FFG (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft) geförderten Projekts „iENERGY 2.0¹ – the power of a vision!“ dar.

Da der Verkehrssektor einen relativ großen Teil zu den Treibgasemissionen beiträgt, wird durch umweltpolitische Maßnahmen in Österreich versucht, eine große Anzahl an Elektrofahrzeugen (210.000 Elektroautos inkl. Hybrid) bis zum Jahr 2020 in Österreich zu integrieren [1]. Im Rahmen dieser wissenschaftlichen Untersuchung wird versucht, ein tiefgehendes Verständnis für die elektrische Beladung eines Elektroautos den Projektbeteiligten zu vermitteln. Zusätzlich werden die Netzurückwirkungen sowie das Verhalten bei der elektrischen Beladung von unterschiedlichen Elektrofahrzeugen auf das elektrische Netz untersucht und miteinander verglichen.

Die Aufzeichnung der Oberschwingungen und des charakteristischen Ladeleistungsverlaufes während der elektrischen Beladung des Elektrofahrzeuges erfolgt mittels eines hochauflösenden Messsystems (Dewetron DEWE-3010). Es werden die elektrischen Parameter (Strom, Spannung, Leistung) bei der Beladung unterschiedlicher Elektrofahrzeuge aufgezeichnet, ausgewertet und miteinander verglichen.

2 Einleitung

Aktuell befinden sich lt. Statistik Austria [2] in Österreich insgesamt 15 232 Elektro- und Hybridfahrzeuge (Stand 2014). Davon sind 3 038 ausschließlich elektrisch betrieben (reine Elektrofahrzeuge), zusätzlich gibt es 12 194 Hybridfahrzeuge [2]. Im Vergleich zu Österreich versucht die Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr bis 2020 insgesamt 1 000 000 elektrisch betriebene Fahrzeuge zu integrieren [1].

Die zuvor aufgezeigten politischen Ziele in Österreich sowie in den Nachbarländern haben zur Folge, dass eine große Anzahl an elektrischen Verbrauchern (Stromtankstellen) mit einer relativ hohen Ladeleistung – um die Beladungszeiten der Elektroautos möglichst gering zu halten – in das elektrische Energiesystem integriert werden müssen.

Dies führt zu verstärkten Forschungsaktivitäten bzgl. der Auswirkungen bei einer zukünftigen Integration von einer Vielzahl an Elektrofahrzeugen [3]. Dabei wird im vorliegenden Bericht das Augenmerk auf das Verhalten bei der elektrischen Beladung des Elektrofahrzeuges und den damit verbundenen Rückwirkungen auf das elektrische Netz untersucht [3].

In der Tabelle 1 wird der aktuelle Fahrzeugbestand (KFZ Allg.) in Österreich lt. Statistik Austria [2] (Stand 2013) auf die lt. Umweltbundesamt geplante Anzahl von 209.333

¹ Energie Steiermark (Konsortialführer), Energieregion Weiz-Gleisdorf GmbH, TU Graz, Weizer Energie- Innovations- Zentrum GmbH, Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, BM Leitner Planung & Bauaufsicht Gesellschaft mbH (alle Projektpartner)

Elektrofahrzeuge inkl. Hybridfahrzeuge auf die Steiermark und den Bezirk Weiz umgerechnet.

Tabelle 1: Hochrechnung Anzahl Elektroautos in der Steiermark und Weiz lt. Fahrzeugbestand (KFZ-Allg.) im Jahre 2020

	Österreich	Steiermark	Bezirk Weiz
KFG –Allg.	6.384.791 (100 %)	998.139 (15,6 %)	84.616 (1,3 %)
Elektroautos inkl. Hybrid	209.333 (100 %) geplant	32.725 (15,6%) Hochrechnung	2.722 (1,3 %) Hochrechnung

Gemäß dieser Hochrechnung würde sich im Jahre 2020 eine Anzahl von 2 722 Elektroautos inkl. Hybridantrieb lt. dem aktuellen Fahrzeugbestand (KFZ-Allg.) im Bezirk Weiz befinden.

3 Grundlagen

Im Folgenden werden die Grundlagen² zur Beladung eines Akkumulators bzw. die am Markt befindlichen Steckertypen und die notwendigen Ladeleistungen seitens der Stromtankstellen zusammenfassend dargestellt. Zusätzlich werden die normativen Grenzwerte für die elektrische Spannung lt. ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] sowie die zulässigen Spannungsüberschwingungen und Stromüberschwingungen erläutert.

3.1 Beladung eines Akkumulators

Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der am Markt befindlichen Akkumulatoren (Lithium-Ionen Li-Ion, Nickel-Cadmium NiCd, Blei Pb, etc.) werden unterschiedliche Verfahren zur Beladung der Akkumulatoren angewendet, um einerseits eine hohe Lebensdauer und andererseits eine möglichst schnelle und effektive Beladung zu erreichen. In der Literatur wird die Beladung des Akkumulators in zwei Phasen a) Konstantstrom-Ladephase (I-Phase) und b) Konstantspannungs-Ladephase (U-Phase), siehe Abbildung 1, unterteilt [5], [6].

Zu Beginn in der Phase 1 der Beladung wird ein konstanter Strom eingepreßt, um möglichst schnell Energie in den Akkumulator zu laden. Aufgrund entsprechender chemischer Prozesse im Akkumulator folgt ein Anstieg der Spannung $u_{\text{Akku}}(t)$ (siehe Abbildung 1 bzw. Abbildung 2)

In der Phase 2 wird die Spannung konstant gehalten, um die maximale Klemmenspannung des Akkumulators nicht zu überschreiten und den Akkumulator nicht zu beschädigen. Durch das Konstanthalten der Ladespannung $u_{\text{Ladespg}}(t)$ ergibt sich näherungsweise ein nach einer

² Grundlagen dieser Arbeit wurden in Rahmen einer studentischen Projektarbeit von Herrn D. Herbst erarbeitet.

Exponentialfunktion abklingender Stromverlauf $i_{\text{Ladestrom}}(t)$. Das zuvor theoretisch beschriebene Ladeverfahren wird in der folgenden Abbildung 1 illustriert.

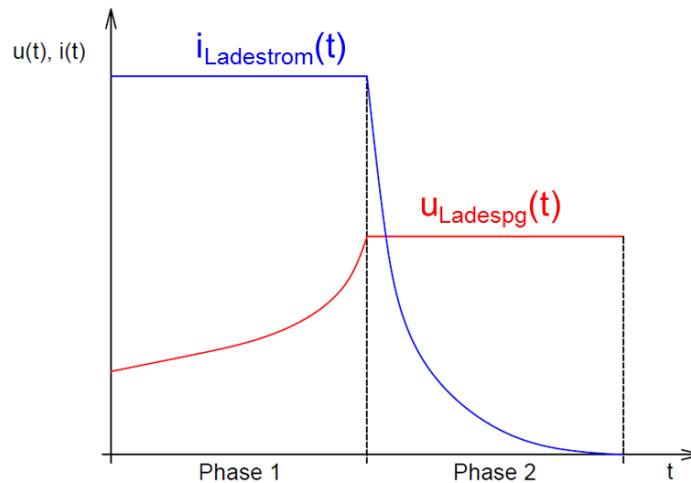


Abbildung 1: Zeitlicher Verlauf des IU-Ladeverfahrens

Die in Abbildung 1 dargestellte Konstantstrom-Ladephase (Phase 1) wird ca. bis zu einer geladenen Energie von 80 %, bezogen auf die Nennkapazität C_N , durchgeführt. Die restlichen 20 % bezogen auf die Nennkapazität C_N werden in der Konstantspannungs-Ladephase (Phase 2) geladen.

In der folgenden Abbildung 2 ist das vereinfachte einphasige Ersatzschaltbild der Beladung eines Akkumulators bestehend aus dem elektrischen Netz, dem Laderegler und dem Akkumulator dargestellt. Das elektrische Netz wird vereinfacht als Spannungsquelle mit einem integrierten Innenwiderstand, der Laderegler mittels eines Gleichrichters dargestellt. Der Gleichrichter wird verwendet, um aus der Wechselspannung die Lade-Gleichspannung $u_{\text{Ladespg}}(t)$ zu generieren. Der Akkumulator besteht aus einer Gleichspannungssenke $u_{\text{Akku}}(t)$ mit dem zugehörigen Innenwiderstand R_i .

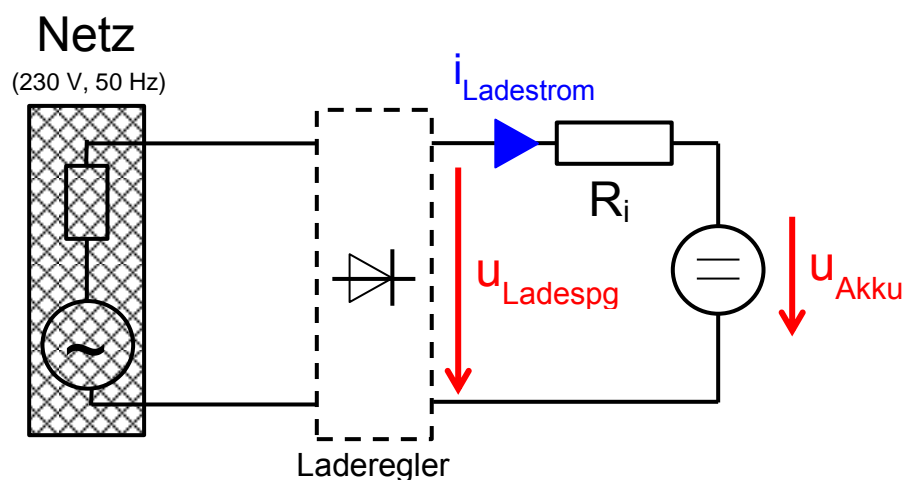


Abbildung 2: Vereinfachtes Ersatzschaltbild – elektrische Beladung eines Akkumulators

Im Gleichrichter sind die unterschiedlichen Ladephasen (Phase 1 und Phase 2) zur Beladung des Akkumulators implementiert, um eine lange Lebensdauer und eine effiziente und effektive Beladung zu ermöglichen.

3.2 Ladeinfrastruktur

Die Ladeinfrastruktur ist aufgrund der zur Zeit relativ geringen Reichweite der Elektrofahrzeuge (durchschnittlich 100 km bis 120 km je Vollladung) ein wichtiges Thema für eine erfolgreiche Integration der Elektromobilität.

Die Beladung des Elektroautos erfolgt mittels unterschiedlichen genormten Steckverbindern (siehe Tabelle 3). Derzeit wird der Steckertyp-2 (Typ 2) am häufigsten verwendet. Weiters werden je nach Beladeleistung seitens der elektrischen Ladestation zwischen langsamer Beladung, beschleunigter Beladung und schneller Beladung unterschieden.

In der folgenden Tabelle 2 werden die unterschiedlichen Beladungsarten (AC Wechselstrom bzw. DC Gleichstrom) und die Ladeleistungen (3,7 kW – 50 kW) aufgelistet. Das in Tabelle 2 angeführte Beispiel einer Beladung eines Akkumulators mit einer Nennkapazität von 30 kWh mit der Konstant-Strombeladung – bis zu einem Füllstand (SOC – **State Of Charge**) – bei unterschiedlichen Ladeleistungen verdeutlicht die Wichtigkeit einer ausreichenden Ladeinfrastruktur. In dieser Betrachtung werden der Einfachheit keine Verluste miteinbezogen.
























Tabelle 2: Beladungsarten (1-phasig/3-phasig, AC/DC) sowie beispielhafter Beladedauer – Akkumulatorkapazität 30 kWh [7]

Ladestation	Anschlussart	Ladung	Beladeleistung	Beladedauer (0 – 80 % SOC, 30 kWh)
langsame Beladung	1-phasig	AC	3,7 kW	6 h 29 min
beschleunigte Beladung	3-phasig	AC	11 kW / 22 kW	2 h 10 min / 1 h 05 min
schnelle Beladung	3-phasig	DC	50 kW (CHAdeMO)	28 min

Das angeführte Beispiel zeigt bei einer langsamen Beladung (1-phasig, AC, CE-Steckdose, 3,7 kW) eine Beladedauer von 6 h 29 min, bei einer leistungsstärkeren Ladeinfrastruktur mit Verwendung der Schnellladung dauert diese Beladung hingegen nur 28 min. Bei der Ladestation CHAdeMO (**CH**A**rg**e **de** **MO**ve) handelt es sich um eine in Japan entwickelte Schnellladestation basierend auf einer Gleichstrombeladung [8].

In Tabelle 3 [9] sind die am Markt befindlichen unterschiedlichen Beladungssysteme mit den zugehörigen Steckverbindern inklusive technischer Kennwerte für die Beladung der Elektrofahrzeuge gegenübergestellt.

Tabelle 3: Aktuell verfügbare Steckdosen zur Beladung der Elektrofahrzeuge (elektrische Kennwerte, Ladedauer, Kommunikation) [9]

					
Spannung	230 V	230 V	400 V	500 V	500 V
Strom	10 A – 16 A	16 A – 32 A	16 A – 63 A	125 A	125 A
Phase	1ph AC	1ph AC	3ph AC	DC	DC
Leistung	2 - 3,7 kW	3,7 - 7,4 kW	11 - 22 kW	50 kW	50 kW
Ladedauer	8 - 10 h	3 - 5 h	<1 - 3 h	ca. 20 min	ca. 20 min
Verwendung	keine Kommunikation	Kommunikation mit Fahrzeug			
					
					
					

Hervorzugeben aus Tabelle 3 ist, dass die einzelnen Steckertypen (bis auf die Schukosteckdose) mit den jeweiligen Elektroautos kommunizieren können, um eine schnelle Beladung des Elektroautos zu ermöglichen.

3.3 Normative Regelungen – Spannung, Strom und Oberschwingungen

Die Merkmale der Spannung im öffentlichen Niederspannungsnetz wird durch die europäische Norm ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] geregelt. In dieser wird eine maximale Abweichung der Spannung unter normalen Betriebsbedingungen zwischen + 10 % bzw. - 15 % (10-Minuten-Mittelwerte des Effektivwertes) bezogen auf die Nennspannung U_N für die gesamte Beobachtungsdauer (100 % der Zeit) angegeben. In 95 % der Zeit (Beobachtungsdauer) ergeben sich Abweichungen von + 10 % bzw. - 10 % bezogen auf die Nennspannung U_N .

Spannungsüberschwingungen

Der Gesamtgehalt der Oberschwingungen (THD – **T**otal **H**armonic **D**istortion) in der elektrischen Versorgungsspannung (THD_U – **T**otal **H**armonic **D**istortion **V**oltage) muss lt. ÖVE/ÖNORM EN 50160 unter 8 % liegen. Dabei wird die Summe einzelner Effektivwerte der harmonischen Oberschwingungsanteile OS_h gebildet und auf den Effektivwert der Grundschwingung GS bezogen, siehe Gleichung (1) beschrieben:

$$THD_U = \sum_{h=2}^{40} \frac{OS_h}{GS} \leq 8 \% \quad (1)$$

Neben dem Gesamtüberschwingungsgehalt THD_U werden Grenzwerte für die einzelnen Oberschwingungen OS_h bezogen auf die Grundschwingung GS lt. ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] in Prozent festgelegt. Die Tabelle 4 zeigt die normativ festgelegten relativen Spannungsamplituden U_h einzelner Ordnungen im öffentlichen Netz auf.

Tabelle 4: Grenzwerte der Oberschwingungsspannungen bis zur 24. Ordnung lt. ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4]

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Keine Vielfachen von 3		Vielfache von 3			
Ordnung h	Relative Spannungsamplitude U_h	Ordnung h	Relative Spannungsamplitude U_h	Ordnung h	Relative Spannungsamplitude U_h
5	6,0 %	3	5,0 %	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 %				

Anmerkung:
Für die Oberschwingungen oberhalb der 25. Ordnung werden keine Werte angegeben, da sie gewöhnlich niedriger, allerdings wegen Resonanzerscheinungen weitgehend unvorhersehbar sind.

Wie aus der Tabelle 4 ersichtlich ist, beträgt beispielsweise die 5. Oberschwingung 6 % bezogen auf die Grundschwingung. Die einzelnen Anteile der verschiedenen Oberschwingungen dürfen nicht betragsmäßig addiert, sondern müssen vektoriell nach Betrag und Phase geometrisch addiert werden. Dadurch ist es möglich, dass sich einzelne Oberschwingungen je nach Phasenlage und Betrag in weiterer Folge verringern bzw. auslöschen können [10].

Stromüberschwingungen

Die Stromüberschwingungen werden gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] mittels des gesamten Oberschwingungsstromes THC (Total Harmonic Current), in Gleichung (2) dargestellt, berechnet.

$$THC = \sqrt{\sum_{n=2}^{40} I_n^2} \quad (2)$$

Der gesamte Oberschwingungsgehalt THC wird durch die quadratische Summe aus den Strom-Effektivwerten einzelner Harmonischen und der anschließenden Wurzel gebildet. Aufgrund fehlender Grenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] wird dieses Kriterium lediglich an zwei verschiedenen Betrachtungszeitpunkten während der durchgeführten Messungen herangezogen und die gemessenen Oberschwingungsströme THC miteinander verglichen.

Die einzelnen Stromüberschwingungen werden gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] für unterschiedliche Geräte- bzw. Verbrauchertypen klassifiziert. In der folgenden Tabelle 5 sind die einzelnen Überschwingungsstromgrenzen für unterschiedliche Überschwingungsordnungen der Geräteklasse A dargestellt. Da in dieser Norm die Elektrofahrzeuge nicht explizit aufgeführt sind, ist die Geräteklasse A heranzuziehen.

Tabelle 5: Grenzwerte der Überschwingungsströme – Geräteklasse A ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11]

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





Die Beladedauer der Elektrofahrzeuge liegt zwischen einer halben Stunde und über 6 Stunden, somit sind gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] für die Messung die Effektivwerte der Grundschwingungen sowie der Überschwingungen in einem 2,5-Minuten-Intervall heranzuziehen.

Wie aus Tabelle 5 ersichtlich ist, nehmen für höhere Ordnungen die zulässigen Ströme der einzelnen Überschwingungen ab.

4 Ergebnisse der Analyse von Ladevorgängen

In dieser Untersuchung werden die in Tabelle 6 dargestellten Elektrofahrzeuge hinsichtlich des elektrischen Verhaltens bei der Beladung des Elektrofahrzeuges und deren Rückwirkungen auf das elektrische Netz untersucht. Zusätzlich sind in dieser Tabelle die technischen Daten der untersuchten Elektrofahrzeuge dargestellt.

Tabelle 6: Analyse folgender Elektrofahrzeuge (Peugeot 106 electric [12], iOn [13], e-VIVACITY [14] [15]; SMART fortwo electric drive [16], [17])

	EV 1	EV 2	EV 3	EV 4
Fahrzeug:				
	Peugeot 106 electric	Peugeot iOn	Peugeot e-VIVACITY	SMART fortwo electric drive
Ladung:	230 V 1-phasig	230 V 1-phasig/ 400 V 3-phasig	230 V 1-phasig	230 V 1-phasig/ 400 V 3-phasig
Akku-kapazität:	14,0 kWh	16,0 kWh	2,0 kWh	17,6 kWh
Akku-Typ:	Ni-Cd Akku	Li-Io Akku	Li-Io Akku	Li-Io Akku

Die Analysen werden an den unterschiedlichen Elektrofahrzeugen an zufällig ausgewählten Tagen durchgeführt. Als Ladestandort dient eine an der Technischen Universität, Inffeldgasse 18 installierte elektrische Stromtankstelle.

Bei den Messungen der unterschiedlichen Elektrofahrzeuge werden jeweils die Verläufe der folgenden elektrotechnischen Parameter aufgenommen:

- Strom
- Spannung
- Wirkleistung (P), Scheinleistung (S) und Blindleistung (Q)
- Oberschwingungen (Spannung und Strom)

4.1 Messaufbau

Im Folgenden wird der Messaufbau erläutert, die verwendeten Methoden zur Analyse der Ladevorgänge dargelegt sowie die elektrotechnischen Messgrößen (Strom, Spannung, Leistung) näher beschrieben.

Zur Beladung der Elektrofahrzeuge wird die elektrische Stromtankstelle (Fabrikat Schrack Technik) auf der Technischen Universität Graz (Inffeldgasse 18) in Kombination mit einer Messverteilerbox und einem portablen, hochpräzisen, mehrkanaligen Messgerät DEWE-

3010 (Dewetron GmbH) [18] zur Spannungs-, Strom- bzw. Leistungsmessung verwendet. Die von der Fa. Schrack verwendete elektrische Stromtankstelle in der Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Stromtankstelle der Fa. Schrack, Inffeldgasse 18 in Graz

Die Abbildung 4 zeigt den prinzipiellen einphasigen Messaufbau mit dem Elektrofahrzeug, dem Messgerät (Dewetron DEWE-3010) und dem Unterverteiler (UNV E Inffeldgasse 18, Laborgeschoß).

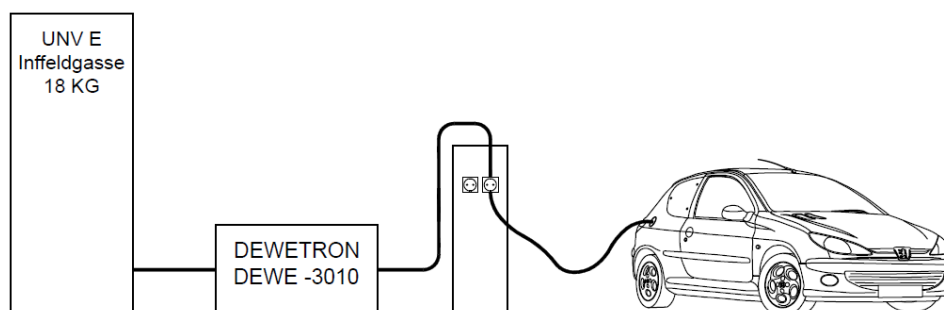


Abbildung 4: Prinzipieller einphasiger Messaufbau zur Beladung der Elektrofahrzeuge

Der detaillierte Stromlaufplan in der Abbildung 5 beinhaltet zusätzlich die verwendeten Schutzgeräte sowie die einzelnen Punkte der Spannungs- und der Strommessung. Der Messverteiler beinhaltet insgesamt 6 Bananenbuchsen (L1, L2, L3, 3xN, PE) zum Abgriff der Spannungen sowie zwei Schukosteckdosen, die zur Versorgung mehrerer Messgeräte verwendet werden könnten.

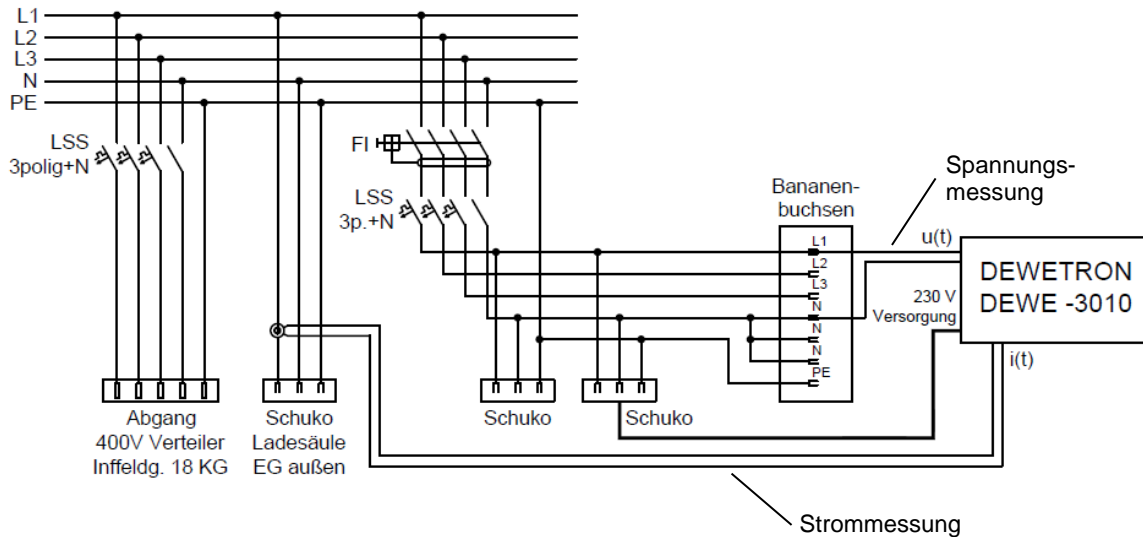


Abbildung 5: Stromlaufplan des Messaufbaus zur Beladung der Elektrofahrzeuge

Wie aus Abbildung 5 ersichtlich ist, wird die Spannung direkt abgegriffen und die Strommessung mittels einer Strommesszange durchgeführt. Die Versorgung des hochpräzisen Messgerätes (Dewetron, DEWE-3010) wird über einen eigens abgesicherten Abgang durchgeführt. Die Messdatenaufzeichnung der einzelnen Kanäle (Strom-, Spannungskanäle) erfolgt mit einer Abtastfrequenz von 10 kHz, gespeichert werden 1-Sekunden gemittelte Effektivwerte. Die Auswertung ist angelehnt an die EN 50160 [4] und betrachtet Oberschwingungen bis zur 25. Ordnung.

In der folgenden technischen Auswertung werden die einzelnen Ladephasen vor, während und nach der Beladung des Elektroautos unterschieden.

Die Abbildung 19 zeigt die unterschiedlichen Ladephasen (0 bis 3) während des Messvorganges in anschaulicher Form.

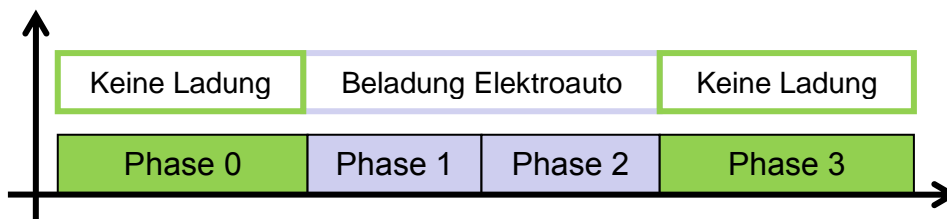


Abbildung 6: Unterschiedliche Ladephasen 0, 1, 2 und 3 innerhalb des Messvorganges

In den Ladephasen 0 und 3 wird keine Ladung durchgeführt. Diese Phasen werden genutzt, um zusätzlich die Oberschwingungsbelastung vor und nach der Beladung des Elektroautos zu erfassen. In den Ladephasen 1 und 2 wird die Beladung des Elektroautos durchgeführt.

In der Ladephase 1 wird das Elektrofahrzeug mit einem konstanten Strom beladen (Konstantstrom-Ladephase) und in der Ladephase 2 wird die Ladespannung konstant gehalten (Konstantspannungs-Ladephase).

4.2 EV 1 – Peugeot 106 electric

Strom- & Spannungsverlauf

Die Abbildung 7 zeigt a) den Strom- und in b) den Spannungsverlauf auf der AC-Seite bei der Beladung des Elektroautos (Peugeot 106 electric). Die Beladung erfolgt von 18:35 Uhr bis 23:00 Uhr. Die Ladephase **1** bezeichnet die Konstantstrom-Ladephase und die Ladephase **2** die Konstantspannungs-Ladephase.

Die Ladephasen **0** und **3** charakterisieren den Zeitraum vor und nach Durchführung der Beladung.

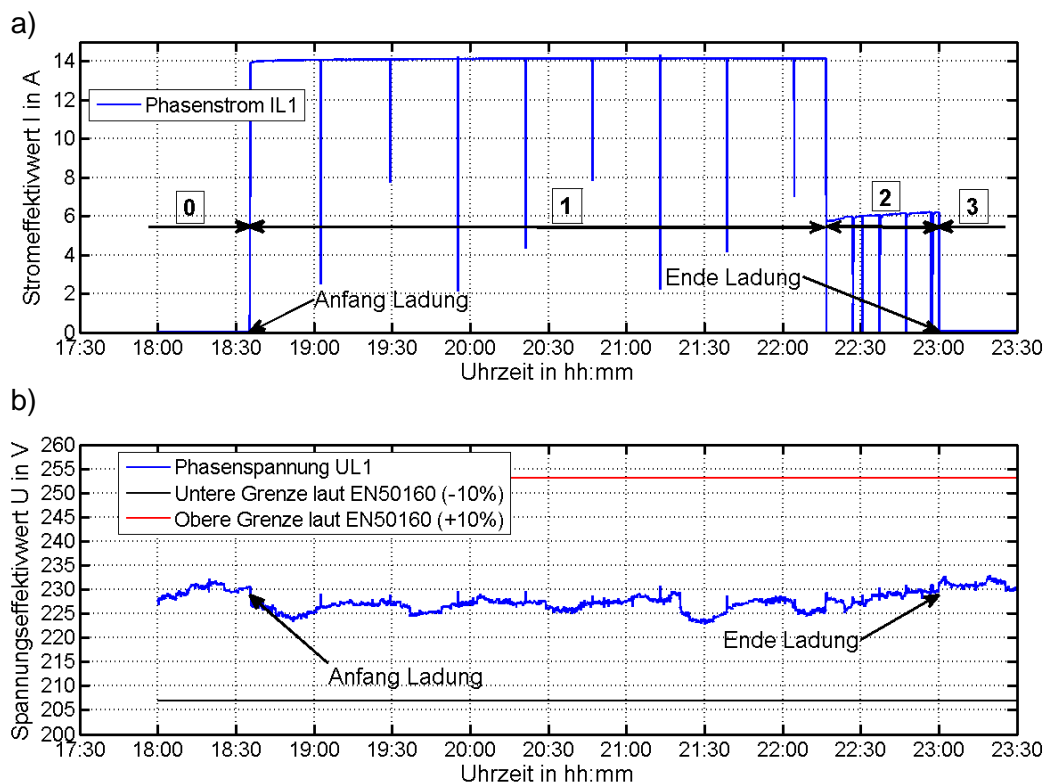


Abbildung 7: Strom- & Spannungsverlauf – Beladung Peugeot 106 electric

Der in Abbildung 7 dargestellte Spannungsverlauf zeigt, dass sich die Versorgungsspannung gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] innerhalb der vorgegebenen Grenzen von $\pm 10\%$ für 95 % des betrachteten Zeitraumes befindet. Die laut Theorie vorhandene Konstantstrom-Ladephase **1** (14,1 A, 20:30 Uhr) ist ersichtlich, die Konstantspannungs-Ladephase **2** (6,1 A um 22:45 Uhr) ist nicht ersichtlich. Dies hängt damit zusammen, dass der Laderegler wahrscheinlich als zweistufiges System mit jeweils zwei verschiedenen Ladeströmen implementiert ist. Zusätzlich ist im Stromverlauf in regelmäßigen Abständen im Bereich von 20 bis 30 Minuten ein Absinken des elektrischen Beladungsstromes ersichtlich. Dieses Verfahren findet häufig Anwendung, um zu gewissen Zeitpunkten die aktuelle Ladespannung und somit den aktuellen Ladezustand (SOC) des Akkumulators zu messen.

Leistungsverlauf

In der folgenden Abbildung 8 sind die unterschiedlichen Leistungsverläufe (Wirk-, Blind- und Scheinleistung) sowie der zugehörige Leistungsfaktor während des Beladevorganges des Elektrofahrzeuges ersichtlich.

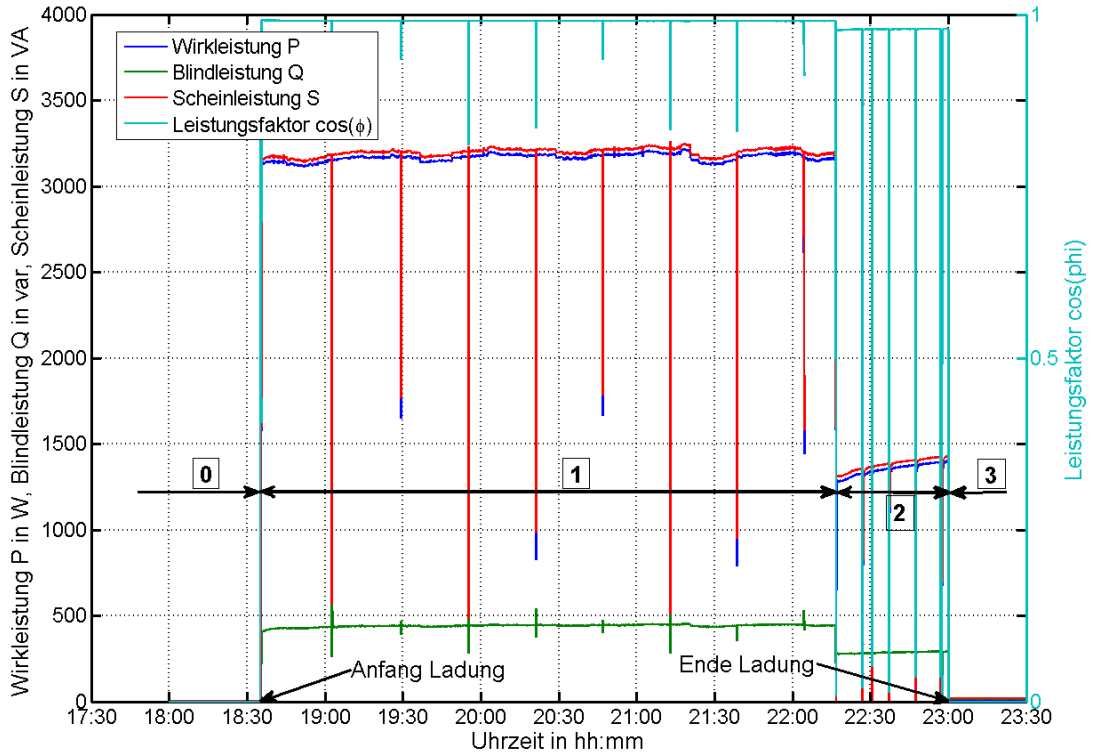


Abbildung 8: Leistungsverlauf – Beladung Peugeot 106 electric

Die einzelnen Leistungsverläufe, in der Abbildung 8 dargestellt, zeigen ein ähnliches Verhalten wie der in der Abbildung 7 dargestellte Stromverlauf. Der Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ ist während der beiden Ladephasen 1 und 2 im Bereich von $\cos \varphi = 0,99-0,98$ (kapazitiv).

Die ermittelten durchschnittlichen Werte für Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie für den Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ der einzelnen Ladephasen (1 und 2) sind in Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7: Durchschnittliche Leistungswerte (Wirk-, Blind-, Scheinleistung, Leistungsfaktor) – Beladung Peugeot 106 electric – Ladephase 1 und 2

	Ladephase 1 (20:30 Uhr)	Ladephase 2 (22:45 Uhr)
Wirkleistung P in W	3164	1396
Blindleistung Q in var	440	288
Scheinleistung S in VA	3196	1403
Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$	0,99	0,98

Energieverlauf

In der Abbildung 9 ist die kumulierte Energie aus dem öffentlichen Netz während der Beladung des Elektrofahrzeuges dargestellt. Zusätzlich werden die Verluste in dem Laderegler in dieser Betrachtung mitgemessen.

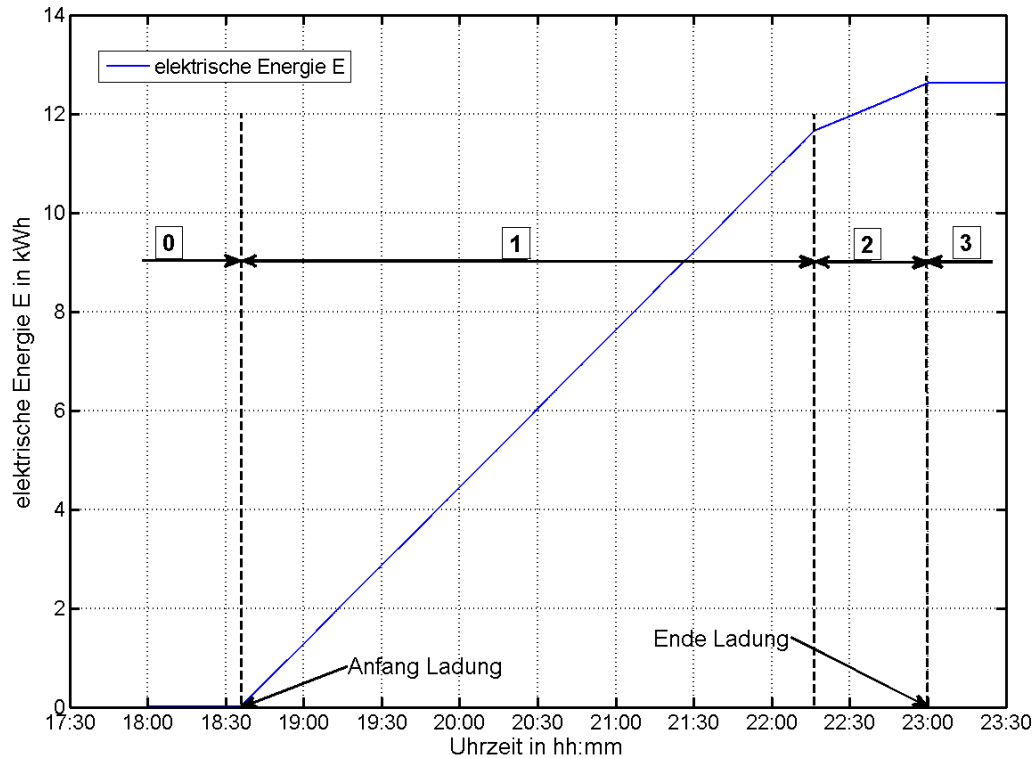


Abbildung 9: Kumulierte Energie – Beladung Peugeot 106 electric

In der Abbildung 9 ist während der Ladephase 1 (Konstantstrom-Ladephase, 18:35 – 22:16 Uhr) sowie in der Ladephase 2 (Konstantstrom-Ladephase, 22:16 Uhr bis 23:00 Uhr) ein linearer Anstieg ersichtlich. Aufgrund der reduzierten Ladeleistung besitzt die Ladephase 2 eine geringere Steigung als in der Ladephase 1.

Die Tabelle 8 stellt die Ladedauer und den Energieanteil der unterschiedlichen Ladephasen 1 und 2 gemeinsam. Laut Theorie werden in der Ladephase 1 bis zu 80 % der Energie geladen und in der Ladephase 2 die restlichen 20 % [6], [3]. Dies passt relativ gut überein, wenn man in Betracht zieht, dass der Akkumulator des Elektroautos eine noch vorhandene Restkapazität enthält.

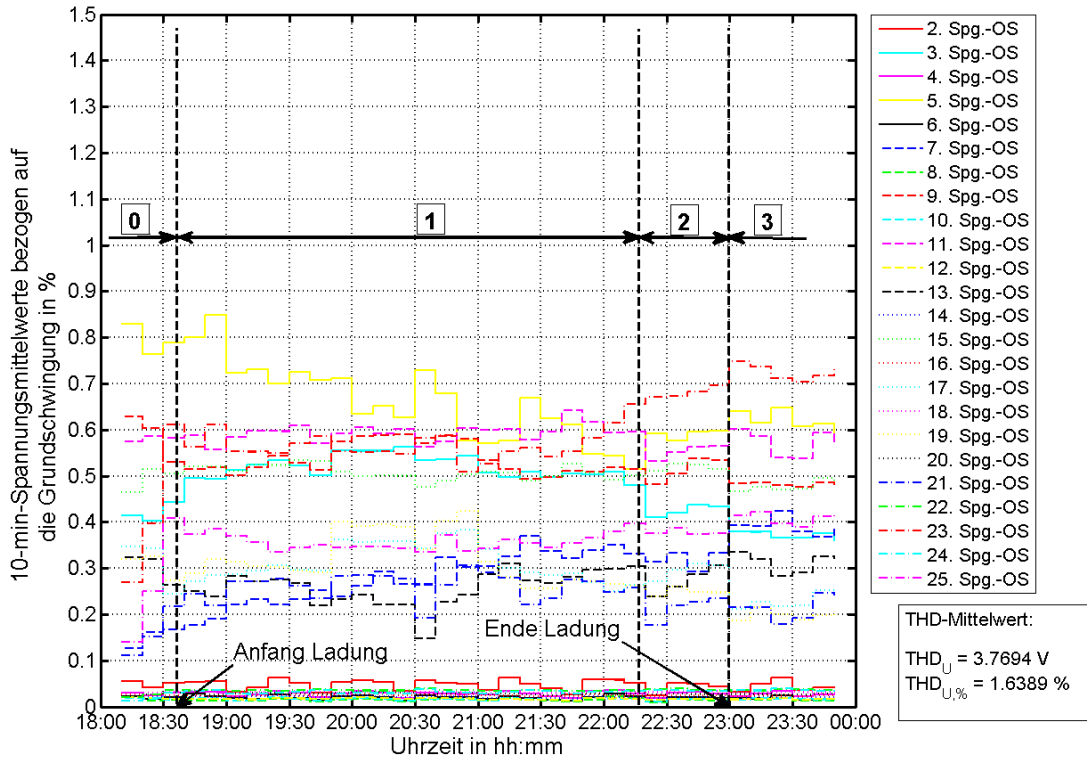
Tabelle 8: Ladedauer, geladene Energie – Beladung Peugeot 106 electric – Ladephase 1 und 2

	Ladephase 1	Ladephase 2	Summe
Dauer	03:41 h	00:43 h	04:24 h
Zeit-Anteil	83,7 %	16,3 %	100 %
Energie	11,64 kWh	0,97 kWh	12,61 kWh
Energie-Anteil	92,3 %	7,7 %	100 %

Wie in Tabelle 8 dargestellt, beträgt die Ladedauer die Ladephase 2 lediglich 16 %, bezogen auf die gesamte Beladedauer. In dieser Zeit werden jedoch nur ca. 8 % der Energie, bezogen auf die gesamte geladene Energie, nachgeladen.

Spannungsüberschwingungen

In der Abbildung 10 sind die einzelnen Verläufe der harmonischen Oberschwingungen der elektrischen Spannung (2-20. Spg.-OS) in den unterschiedlichen Ladephasen (0 bis 3) dargestellt.



**Abbildung 10: Spannungsüberschwingungen unterschiedlicher Ladephasen (0 bis 3)
– Beladung Peugeot 106 electric**

Die Abbildung 10 zeigt, dass sich die einzelnen Spannungsharmonischen unterhalb der gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] festgelegten Grenzen (siehe Tabelle 4) befinden. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Ladephasen (1 und 2) und den Nichtladephasen (0 und 3) ersichtlich.

Die Tabelle 9 zeigt den lt. Gleichung (1) berechneten Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung THD_U in den einzelnen Ladephasen (0 bis 3).

Tabelle 9: Gesamtüberschwingungsgehalt THD_U – Beladung Peugeot 106 electric – Ladephase 0 bis 3

$THD_U(0)$	1,54 %
$THD_U(1)$	1,55 %
$THD_U(2)$	1,52 %
$THD_U(3)$	1,56 %

Die Grenzen für den Überschwingungsgehalt werden, wie in Tabelle 9 dargestellt, gemäß Spannungsqualitätsnorm ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] von 8 % eingehalten.

4.3 EV 2 – Peugeot iOn

Strom- & Spannungsverlauf

Die Abbildung 11 zeigt a) den Strom- und b) den Spannungsverlauf bei der Beladung auf der AC-Seite des Elektroautos (Peugeot iOn). Die Beladung erfolgt von 16:27 Uhr bis 21:00 Uhr. Die Ladephase **1** bezeichnet die Konstantstrom-Ladephase und Ladephase **2** die Konstantspannungs-Ladephase. Die Ladephase **0** und **3** charakterisieren den Zeitraum vor und nach Durchführung der Beladung.

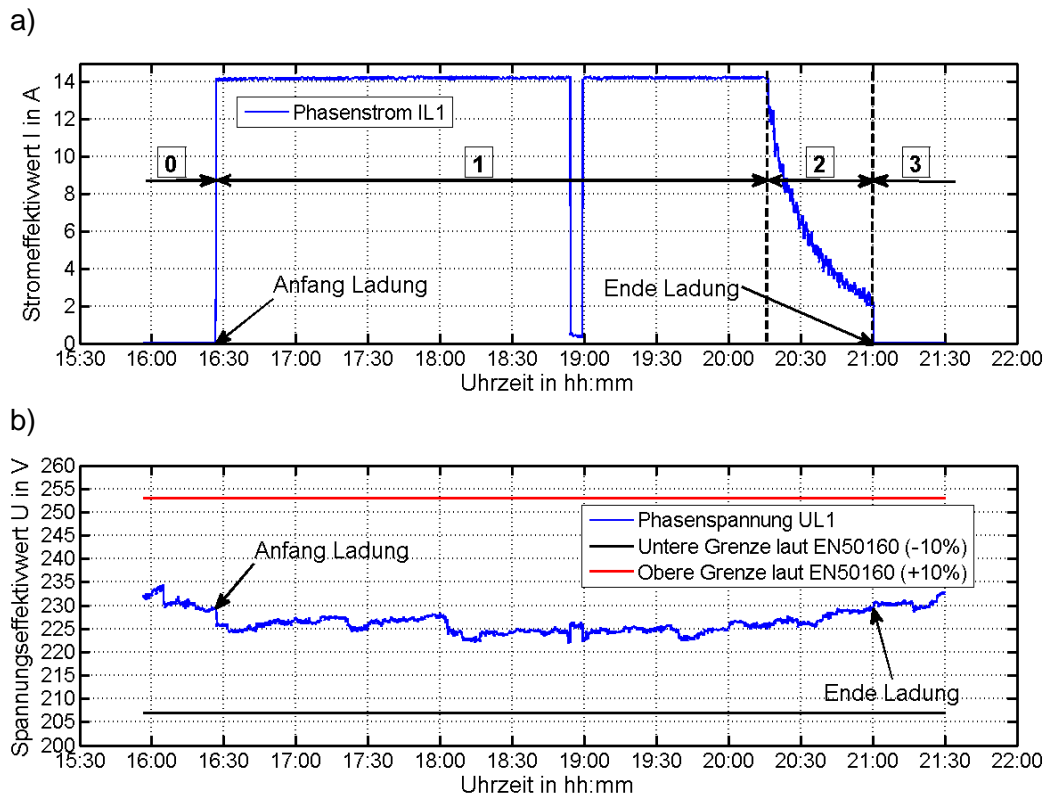


Abbildung 11: Strom- & Spannungsverlauf – Beladung Peugeot iOn

Der in Abbildung 11 dargestellte Spannungsverlauf zeigt, dass sich die Versorgungsspannung lt. ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] innerhalb der vorgegebenen Grenzen von $\pm 10\%$ für 95 % des betrachteten Zeitraumes befindet. Die laut Theorie vorhandene Konstantstrom-Ladephase **1** (14,3 A, 17:30 Uhr) ist ersichtlich, die Konstantspannungs-Ladephase **2** (6,3 A um 20:30 Uhr) besitzt einen näherungsweise exponentiellen abklingenden Stromverlauf. In der Ladephase 1 (Konstantstrom-Ladephase) ist in der Abbildung 11 um 18:50 Uhr für eine Dauer von ca. 10 Minuten ein auffälliger Stromrückgang auf ca. 200 mA ersichtlich. Dieses Verhalten wurde bei mehreren Ladegängen des untersuchten Elektrofahrzeuges festgestellt. Es handelt sich somit nicht um einen einmalig beobachteten Effekt.

Leistungsverlauf

In der folgenden Abbildung 12 sind die unterschiedlichen Leistungsverläufe (Wirk-, Blind- und Scheinleistung) sowie der zugehörige Leistungsfaktor während des Beladevorganges des Elektrofahrzeuges ersichtlich.

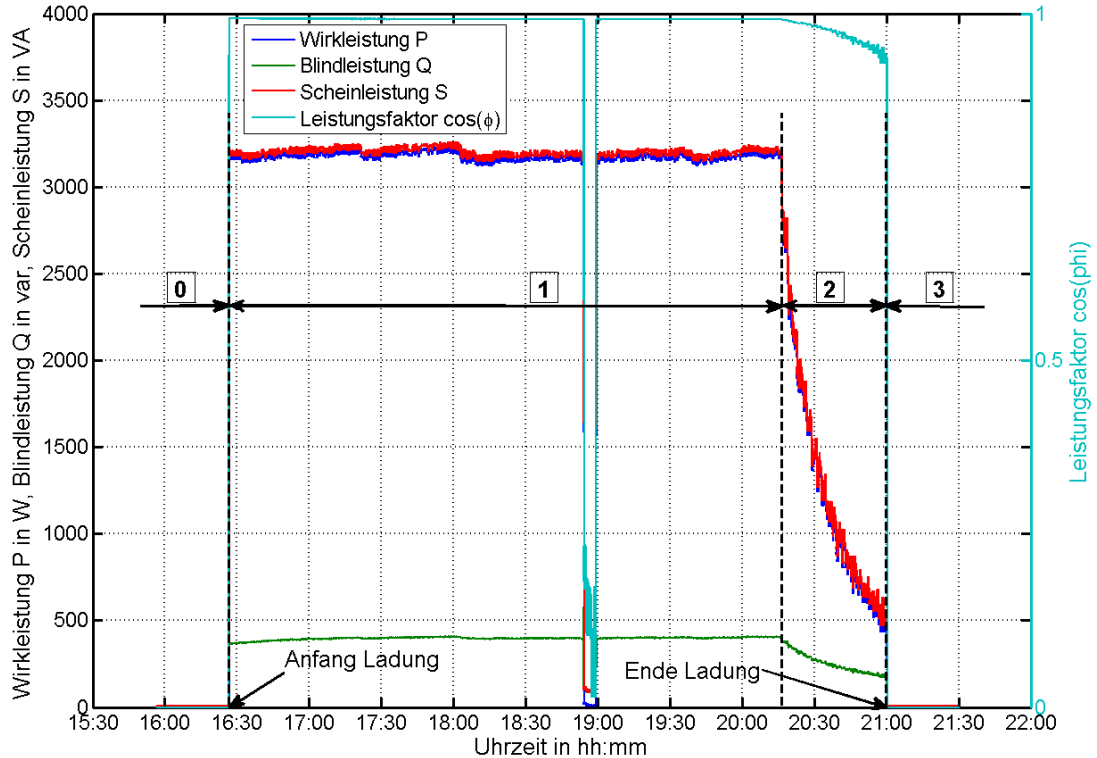


Abbildung 12: Leistungsverlauf – Beladung Peugeot iOn

Die einzelnen Leistungsverläufe, in der Abbildung 12 dargestellt, zeigen ein ähnliches Verhalten wie der in der Abbildung 11 dargestellte Stromverlauf. Der Leistungsfaktor während der Ladephase 1 beträgt $\cos(\varphi) = 0,99$ (kapazitiv) und nimmt im Verlauf der Ladephase 2 leicht ab.

Die ermittelten durchschnittlichen Werte für Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie für den Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ der einzelnen Ladephasen (1 und 2) sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Durchschnittliche Leistungswerte (Wirk-, Blind-, Scheinleistung, Leistungsfaktor) – Beladung Peugeot iOn – Ladephase 1 und 2

	Ladephase 1 (17:30 Uhr)	Ladephase 2 (20:30 Uhr)
Wirkleistung P in W	3175	1405
Blindleistung Q in var	400	275
Scheinleistung S in VA	3224	1469
Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$	0,99	0,98

Energieverlauf

In der Abbildung 13 ist die kumulierte Energie aus dem öffentlichen Netz während der Beladung des Elektrofahrzeuges dargestellt. Zusätzlich werden die Verluste in dem Laderegler in dieser Betrachtung mitgemessen.

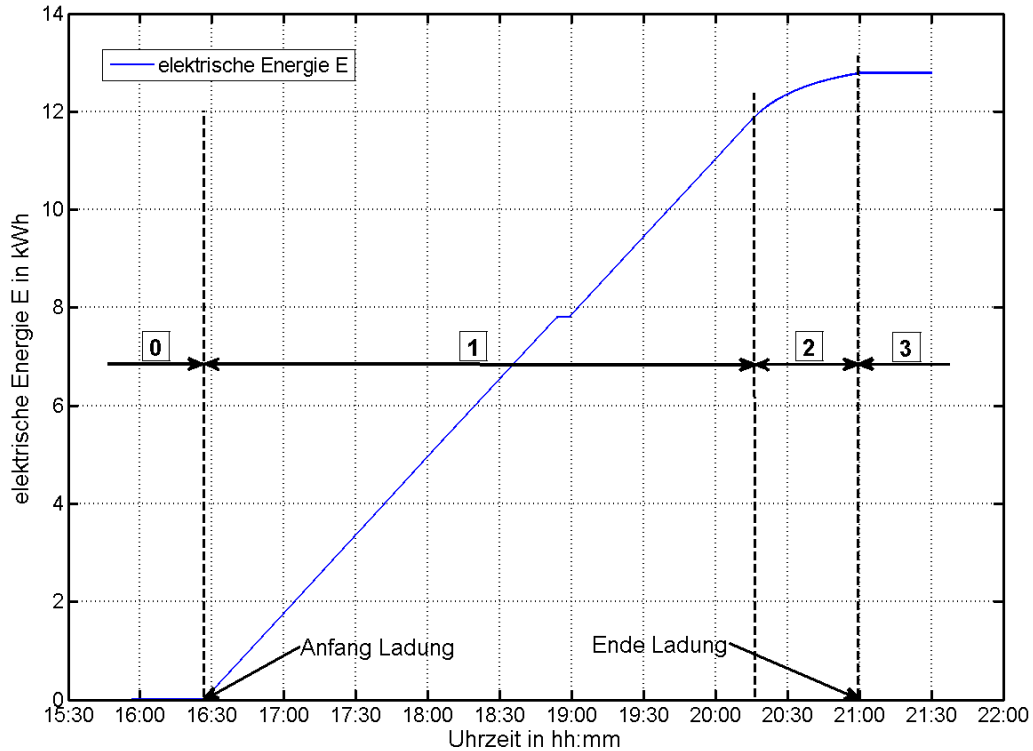


Abbildung 13: Kumulierte Energie – Beladung Peugeot iOn

In der Abbildung 13 ist während der Ladephase 1 (Konstantstrom-Ladephase, 16:27 Uhr bis 20:16 Uhr) ein linearer Anstieg der geladenen Energie ersichtlich. In der Ladephase 2 (Konstantstrom-Ladephase, 20:16 Uhr bis 21:00 Uhr) ist ein näherungsweise exponentieller Anstieg ersichtlich. Aufgrund der reduzierten Ladephase besitzt die Ladephase 2 eine geringere Steigung als in der Ladephase 1. Zusätzlich ist gegen 19:00 Uhr die kurze Ladeunterbrechung (kurzeitiger Rückgang des Ladestromes) im kumulierten Energieverlauf ersichtlich.

Die Tabelle 11 fasst die Ladedauer und den Energieanteil der unterschiedlichen Ladephasen 1 und 2 zusammen. Laut Theorie werden in der Ladephase 1 bis zu 80 % der Energie geladen und in der Ladephase 2 die restlichen 20 % [6], [3]. Dies passt relativ gut überein, wenn man in Betracht nimmt, dass der Akkumulator des Elektroautos eine noch vorhandene Restkapazität enthält.

Tabelle 11: Ladedauer, geladene Energie – Beladung Peugeot iOn – Ladephase 1 und 2

	Ladephase 1	Ladephase2	Summe
Dauer	03:50 h	00:44 h	04:34 h
Zeit-Anteil	83,9 %	16,1 %	100 %
Energie	12,11 kWh	1,10 kWh	13,21 kWh
Energie-Anteil	91,7 %	8,3 %	100 %

Wie in Tabelle 11 dargestellt, beträgt die Ladedauer der Ladephase 2 lediglich 16 % bezogen auf die gesamte Beladedauer. In dieser Zeit werden jedoch nur ca. 8 % der Energie bezogen auf die gesamt geladene Energie nachgeladen.

Spannungsüberschwingungen

In der Abbildung 14 sind die einzelnen Verläufe der harmonischen Oberschwingungen der elektrischen Spannung (2-20 Spg.-OS) in den unterschiedlichen Ladephasen (0 bis 3) dargestellt.

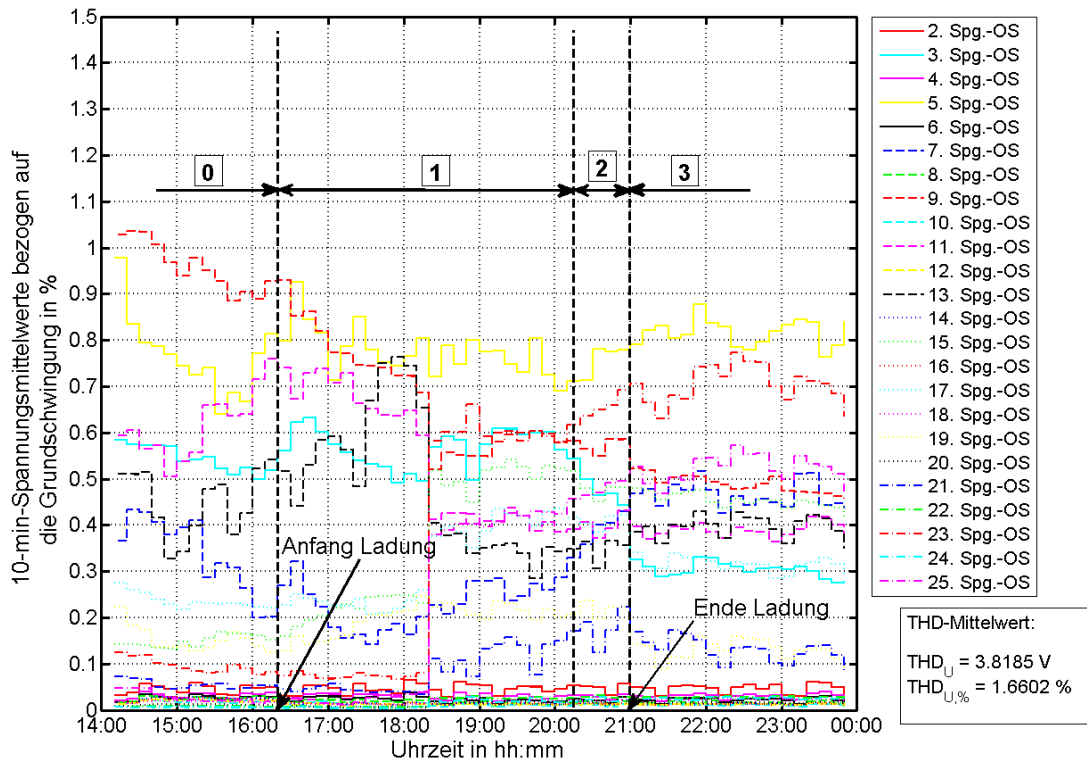


Abbildung 14: Spannungsüberschwingungen unterschiedlicher Ladephasen (0 bis 3) – Beladung Peugeot iOn

Die Abbildung 14 zeigt, dass sich die einzelnen Harmonischen unterhalb der gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] festgelegten Grenzen befinden. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Ladephasen (1 und 2) und den Nichtladephasen (0 und 3) ersichtlich.

Die Tabelle 12 zeigt den lt. Gleichung (1) berechneten Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung THD_U in den einzelnen Ladephasen (0 bis 3).

Tabelle 12: Gesamtüberschwingungsgehalt THD_U – Beladung Peugeot iOn – Ladephase 0 bis 3

$THD_U(0)$	1,59 %
$THD_U(1)$	1,52 %
$THD_U(2)$	1,63 %
$THD_U(3)$	1,63 %

Die Grenze für den Oberschwingungsgehalt werden, wie in Tabelle 12 dargestellt, lt. der Spannungsqualitätsnorm ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] von 8 % eingehalten.

4.4 EV 3 – Peugeot e-VIVACITY Scooter

Strom- & Spannungsverlauf

Die Abbildung 15 zeigt a) den Strom- und b) den Spannungsverlauf bei der Beladung des Elektrofahrzeuges (Peugeot e-VIVACITY Scooter). Die Beladung erfolgte von 08:05 Uhr bis 12:26 Uhr. Die Ladephase **1** bezeichnet die Konstantstrom-Ladephase und Ladephase **2** die Konstantspannungs-Ladephase. Die Ladephase **0** und **3** charakterisieren den Zeitraum vor und nach Durchführung der Beladung.

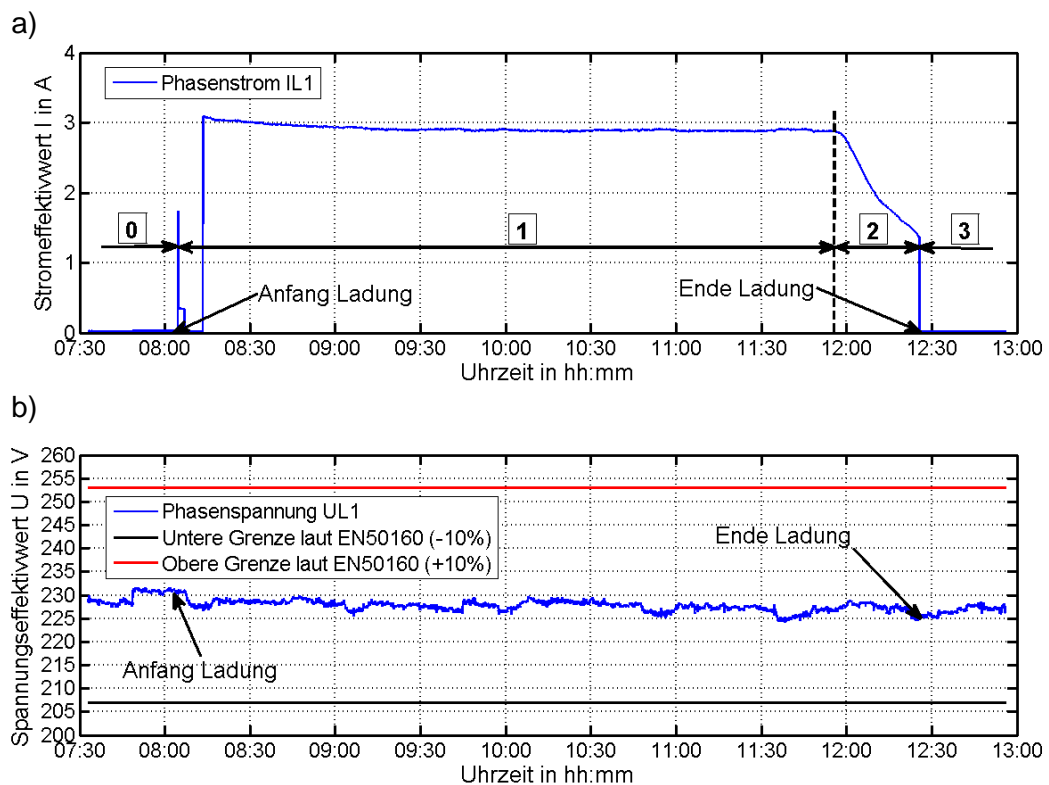


Abbildung 15: Strom- & Spannungsverlauf – Beladung Peugeot e-VIVACITY

Der in Abbildung 15 dargestellte Spannungsverlauf zeigt, dass sich die Versorgungsspannung lt. ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] innerhalb der vorgegebenen Grenzen von $\pm 10\%$ für 95 % des betrachteten Zeitraumes befindet. Die laut Theorie vorhandene Konstantstrom-Ladephase **1** (2,9 A, 10:00 Uhr) ist ersichtlich, die Konstantspannungs-Ladephase **2** (1,8 A um 12:15 Uhr) zeigt einen näherungsweise exponentiellen abklingenden Stromverlauf. Zu Beginn der Beladung zeigt sich ein kurzer Ladestromimpuls (08:15 Uhr), dieser wird jedoch schnell reduziert, erst 10 Minuten später wird die Hauptladung durchgeführt.

Leistungsverlauf

In der folgenden Abbildung 16 sind die unterschiedlichen Leistungsverläufe (gesamte Wirk-, gesamte Blind- und gesamte Scheinleistung) sowie der zugehörige Leistungsfaktor λ während des Beladevorganges des Elektrofahrzeuges ersichtlich.

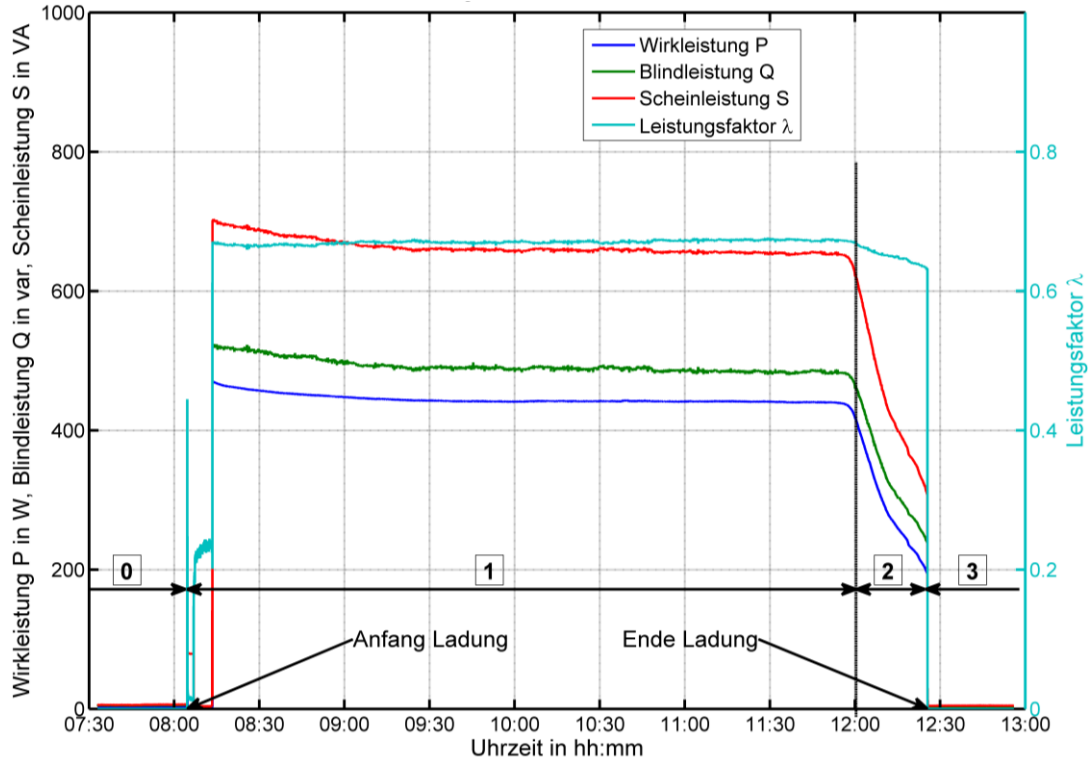


Abbildung 16: Leistungsverlauf – Beladung Peugeot e-VIVACITY

Die einzelnen Leistungsverläufe, in der Abbildung 16 dargestellt, zeigen ein ähnliches Verhalten wie der in der Abbildung 15 dargestellte Stromverlauf.

Der Leistungsfaktor λ setzt sich aus der Wirkleistung der Grundschiwingung P_{H1} sowie aus der Gesamtscheinleistung S_{Gesamt} zusammen und ist in der Gleichung (3) definiert. Der Leistungsfaktor der Grundschiwingung $\cos(\varphi)$ berechnet sich aus der Wirkleistung der Grundschiwingung P_1 bezogen auf die Scheinleistung der Grundschiwingung S_1 und ist in Gleichung (4) ersichtlich [19].

$$\text{Leistungsfaktor } \lambda_{\text{Gesamt}} = \frac{P_{H1}}{S_{\text{Gesamt}}} \quad (3)$$

$$\text{Leistungsfaktor } \cos(\varphi_{H1}) = \frac{P_{H1}}{S_{H1}} \quad (4)$$

Der Leistungsfaktor λ ist während der beiden Ladephasen 1 und 2 im Bereich von $\lambda = 0,65$ (induktiv). Der Leistungsfaktor der Grundschiwingung $\cos \varphi$ liegt im Bereich von $\cos \varphi = 0,99$ (induktiv).

Die ermittelten durchschnittlichen Werte für Wirk-, Blind- und Scheinleistung (Gesamt inkl. aller Oberschwingungen bzw. für die Grundschiwingung) sowie der Leistungsfaktor λ und der Leistungsfaktor $\cos(\varphi)$ für die Grundschiwingung der einzelnen Ladephasen (1 und 2) sind in Tabelle 13 zusammengefasst.

Tabelle 13: Durchschnittliche Leistungswerte (Wirk-, Blind-, Scheinleistung, Leistungsfaktor) Gesamt (inkl. aller Oberschwingungen) sowie der Grundschiwingung (H1 Grundschiwingung)–Beladung Peugeot e-VIVACITY – Ladephase 1 und 2

	Ladephase 1 (10:00 Uhr)	Ladephase 2 (12:15 Uhr)
Wirkleistung P_{Gesamt} bzw. P_{H1} in W	441 / 441	256 / 256
Blindleistung Q_{Gesamt} bzw. Q_{H1} in var	489 / 34	302 / 17
Scheinleistung S_{Gesamt} bzw. S_{H1} in VA	655 / 443	398 / 258
Leistungsfaktor λ_{Gesamt} bzw. Leistungsfaktor $\cos \varphi_{H1}$	0,67 / 0,99	0,64 / 0,99

Energieverlauf

In der Abbildung 17 ist die kumulierte Energie während der Beladung des Elektrofahrzeuges aus dem öffentlichen Netz dargestellt. Zusätzlich werden die Verluste im Laderegler in dieser Betrachtung mitgemessen.

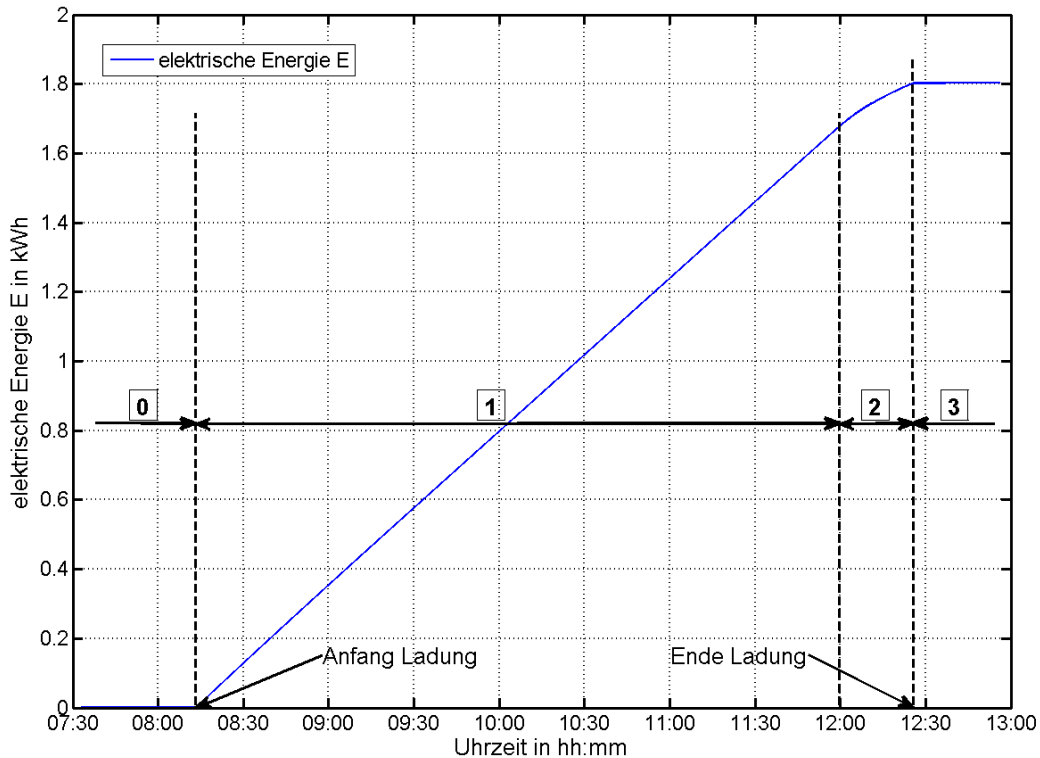


Abbildung 17: Kumulierte Energie – Beladung Peugeot e-VIVACITY

In der Abbildung 17 ist während der Ladephase 1 (Konstantstrom-Ladephase, 08:05 Uhr bis 11:59 Uhr) ein linearer Anstieg der geladenen Energie ersichtlich. In der Ladephase 2 (Konstantstrom-Ladephase, 11:59 Uhr bis 12:26 Uhr) ist ein näherungsweise exponentieller Anstieg ersichtlich. Aufgrund der reduzierten Ladephase besitzt die Ladephase 2 eine geringere Steigung als die Ladephase 1.

Die Tabelle 14 fasst die Ladedauer und den Energieanteil der unterschiedlichen Ladephasen 1 und 2 zusammen. Laut Theorie werden in der Ladephase 1 bis zu 80 % der Energie geladen und in der Ladephase 2 die restlichen 20 % [6], [3]. Dies passt relativ gut

überein, wenn man in Betracht nimmt, dass der Akkumulator des Elektroautos eine noch vorhandene Restkapazität vor dem Beladevorgang enthält.

Tabelle 14: Ladedauer, geladene Energie – Beladung Peugeot e-VIVACITY – Ladephase 1 und 2

	Ladephase 1	Ladephase 2	Summe
Dauer	03:41 h	00:31 h	04:12 h
Zeit-Anteil	90,8 %	9,2 %	100 %
Energie	1,64 kWh	0,17 kWh	1,81 kWh
Energie-Anteil	90,6 %	9,4 %	100 %

Wie in Tabelle 14 dargestellt, beträgt die Ladedauer der Ladephase 2 lediglich 9 % bezogen auf die gesamte Beladedauer. In dieser Zeit werden 9 % der Energie bezogen auf die gesamt geladene Energie nachgeladen.

Spannungsüberschwingungen

In der Abbildung 18 sind die einzelnen Verläufe der harmonischen Oberschwingungen der elektrischen Spannung (2-20 Spg.-OS) in den unterschiedlichen Ladephasen (0 bis 3) dargestellt.

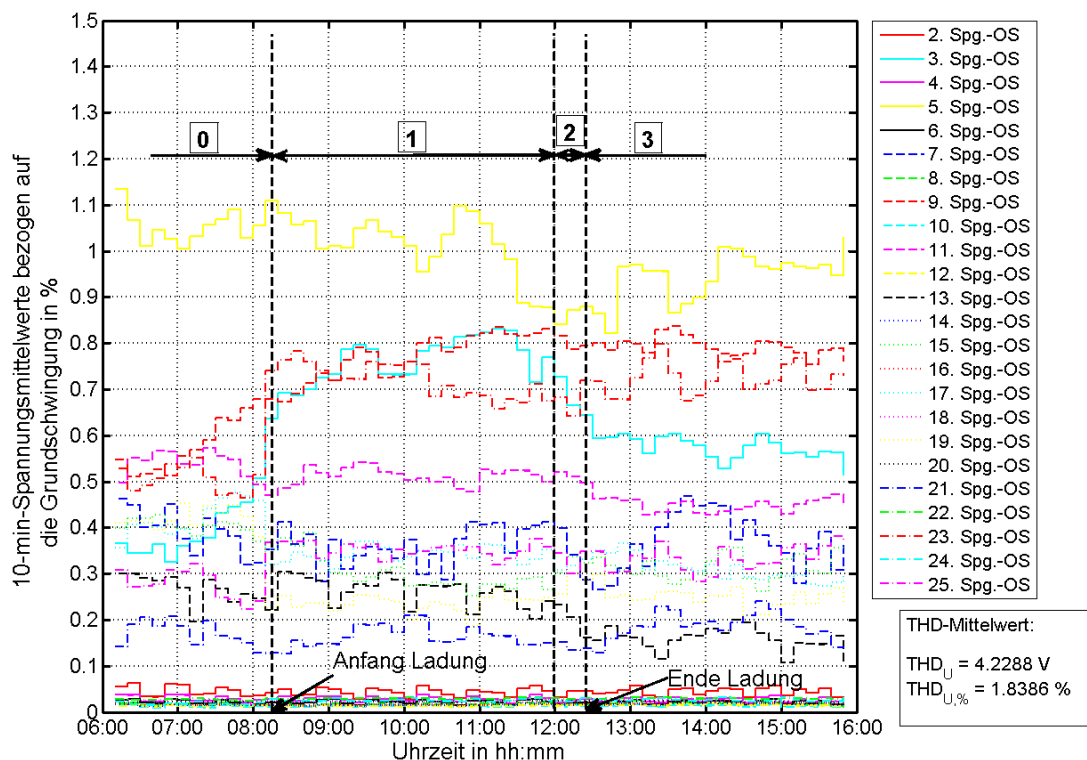


Abbildung 18: Spannungsüberschwingungen unterschiedlicher Ladephasen (0 bis 3) – Beladung Peugeot e-VIVACITY

Die Abbildung 18 zeigt, dass sich die einzelnen Harmonischen unterhalb der lt. ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] festgelegten Grenzen befinden. Es ist kein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Ladephasen (1 und 2) und den Nichtladephasen (0 und 3) ersichtlich.

Die Tabelle 15 zeigt den lt. Gleichung (1) berechneten Gesamtüberschwingungsgehalt der Spannung THD_U in den einzelnen Ladephasen (0 bis 3).

Tabelle 15: Gesamtüberschwingungsgehalt THD_U – Beladung Peugeot e-VIVACITY Ladephase 0 bis 3

$THD_U(0)$	1,73 %
$THD_U(1)$	1,88 %
$THD_U(2)$	1,78 %
$THD_U(3)$	1,75 %

Die Grenze für den Überschwingungsgehalt werden, wie in Tabelle 15 dargestellt, lt. der Spannungsqualitätsnorm ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4] von 8 % eingehalten.

4.5 Vergleich der vermessenen Fahrzeuge

Die bei der Beladung der Elektrofahrzeuge aufgezeichneten Messergebnisse (Überschwingungsgehalt, geladene Energie) werden zusammengefasst und einander gegenübergestellt. Zusätzlich wird aus den aufgezeichneten Messwerten auf die Netzimpedanz geschlossen und dies mit den theoretisch berechneten Werten lt. Ersatzschaltbild vergleichen.

Gesamtüberschwingungsgehalt Spannung THD_U

Die Abbildung 19 zeigt nochmals die unterschiedlichen Ladephasen (0 bis 3) während des Messvorganges in anschaulicher Form.

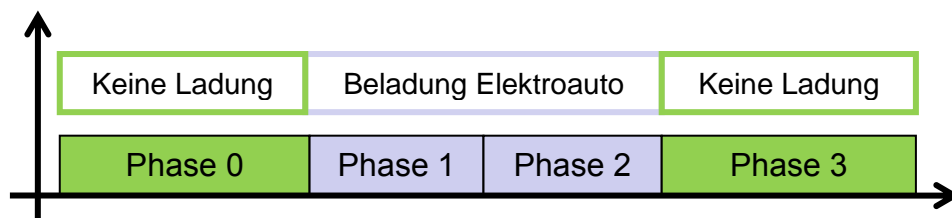


Abbildung 19: Unterschiedliche Ladephasen 0, 1, 2 und 3 innerhalb des Messvorganges

In den Ladephasen 0 und 3 wird keine Ladung durchgeführt. Diese Phasen werden genutzt, um die Überschwingungsbelastung vor und nach der Beladung des Elektroautos zu erfassen. In den Ladephasen 1 und 2 wird die Beladung des Elektroautos durchgeführt.

Die Tabelle 16 fasst die aufgezeichneten Messwerte des Überschwingungsgehalts der Spannung THD_U der unterschiedlichen Ladephasen 0 bis 3 zusammen. Aus den Phasen 0 und 3 wird ein Mittelwert gebildet, da sich der Überschwingungsgehalt der Spannung nach bzw. vor der Beladung ändern könnte. Dies wird ebenfalls bei den Ladephasen 1 und 2 durchgeführt, da sich diese Werte innerhalb dieses Zeitraumes nicht gravierend ändern.

Tabelle 16: Oberspannungsgehalt Spannung THD_U – Vergleich unterschiedlicher Elektrofahrzeuge in den Ladephasen 0, 1, 2 und 3

Fahrzeug	THD _U Phase 0	THD _U Phase 3	THD _U 0 & 3 Mittelwert	THD _U Phase 1	THD _U Phase 2	THD _U 1 & 2 Mittelwert	Tendenz
Peugeot 106 electric	1,54 %	1,56 %	1,55 %	1,55 %	1,53 %	1,54 %	→
Peugeot iOn	1,59 %	1,63 %	1,61 %	1,52 %	1,63 %	1,58 %	→
Peugeot e-VIVACITY	1,73 %	1,74 %	1,73 %	1,88 %	1,78 %	1,83 %	→
SMART fortwo electric drive	1,85 %	1,91 %	1,88 %	1,91 %	2,01 %	1,96 %	→

Legende: Änderung $\leq \pm 10\%$ →

Die gemessenen Oberschwingungen der Spannung THD_U befinden sich innerhalb der normativen Grenzen gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4]. Zusätzlich ist die berechnete Tendenz aus dem Mittelwert der Oberschwingungsgehalte der Ladephase (THD_U 0 & 3) und der Ladephase (THD_U 1 und 2) kleiner $\pm 10\%$.

Gesamter Oberschwingungsstrom THC

Die Tabelle 17 listet den berechneten Gesamtoberschwingungsstrom THC lt. Gleichung (2) der einzelnen gemessenen Elektrofahrzeuge der verschiedenen Ladephasen (1 und 2) auf.

Tabelle 17: Gesamter Oberschwingungsstrom THC – Vergleich unterschiedlicher Elektrofahrzeuge in den Ladephasen 0, 1, 2 und 3

Fahrzeug	THC Phase 0	THC Phase 3		THC Phase 1	THC Phase 2	Tendenz
Peugeot 106 electric	0,0 A	0,0 A	kein Stromfluss in Phase 0 und 3 möglich	0,914 A	0,508 A	↘
Peugeot iOn	0,0 A	0,0 A		1,085 A	0,746 A	↘
Peugeot e-VIVACITY	0,0 A	0,0 A		2,070 A	1,732 A	↘
SMART fortwo electric drive	0,0 A	0,0 A		0,677 A	0,735 A	→

Legende: Änderung $> +10\%$ → Änderung $> -10\%$ ↘ bzw. Änderung $< \pm 10\%$ →

Die Tabelle 17 zeigt eine Tendenz zwischen den beiden Ladephasen 1 und 2. Es ist in allen Messungen in der Ladephase 2 ein geringerer Oberschwingungsstrom ersichtlich. Die Änderungen (THC) sind bis auf jene Änderung, die bei dem SMART fortwo electric drive gemessen wurden, kleiner als 10%.

Harmonische Oberschwingungsströme

Die harmonischen Oberschwingungsströme werden gemäß (ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11]) in den beiden Ladephasen (1 und 2) getrennt betrachtet.

In der Abbildung 20 sind die Oberschwingungsströme in der **Ladephase 1 (Konstantstrom-Ladephase)** bei der Beladung der unterschiedlichen Elektrofahrzeuge sowie die zulässigen Grenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] dargestellt.

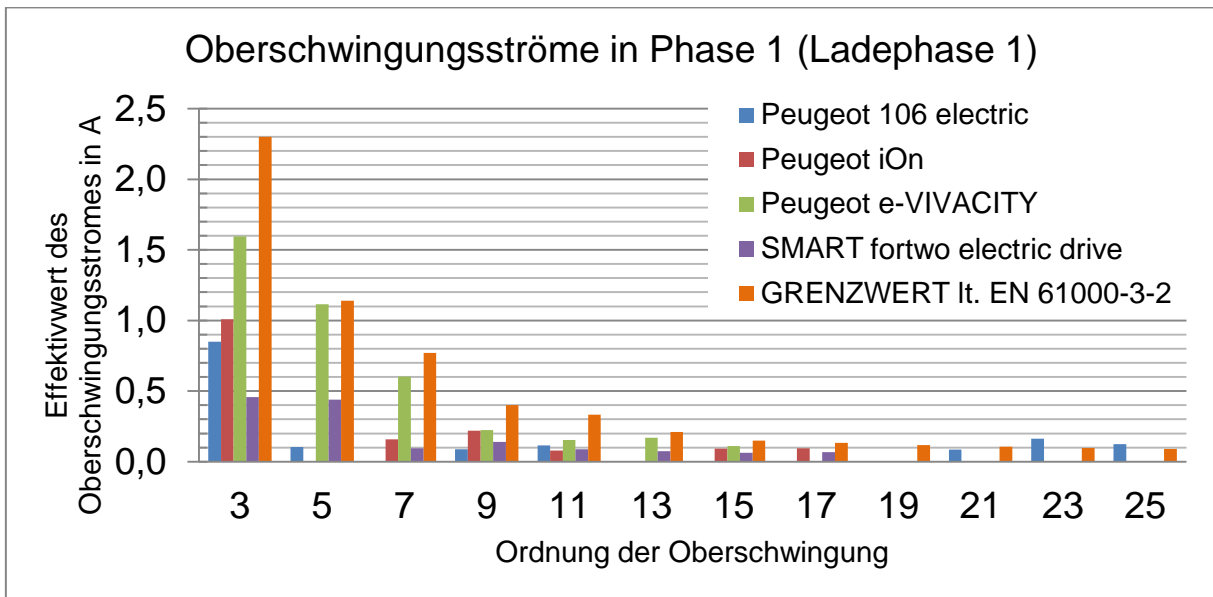


Abbildung 20: Oberschwingungsströme in der Phase 1 (Konstantstrom-Ladephase) – Beladung unterschiedlicher Elektrofahrzeuge

Wie aus der Abbildung 20 ersichtlich ist, werden bis auf die 23. und 25. Oberschwingung alle Grenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] eingehalten. Die 23. Oberschwingung (23. OS) bzw. 25. Oberschwingung (25. OS) überschreitet den Grenzwert mit einem Betrag von 0,106 A (23. OS) bzw. 0,086 A (25. OS) um 8 % (23. OS) bzw. 5 % (25. OS).

In der Abbildung 21 sind die Oberschwingungsströme bei der Beladung der Elektrofahrzeuge in der **Ladephase 2 (Konstantspannungs-Ladephase)** sowie zu zulässigen Grenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] dargestellt.

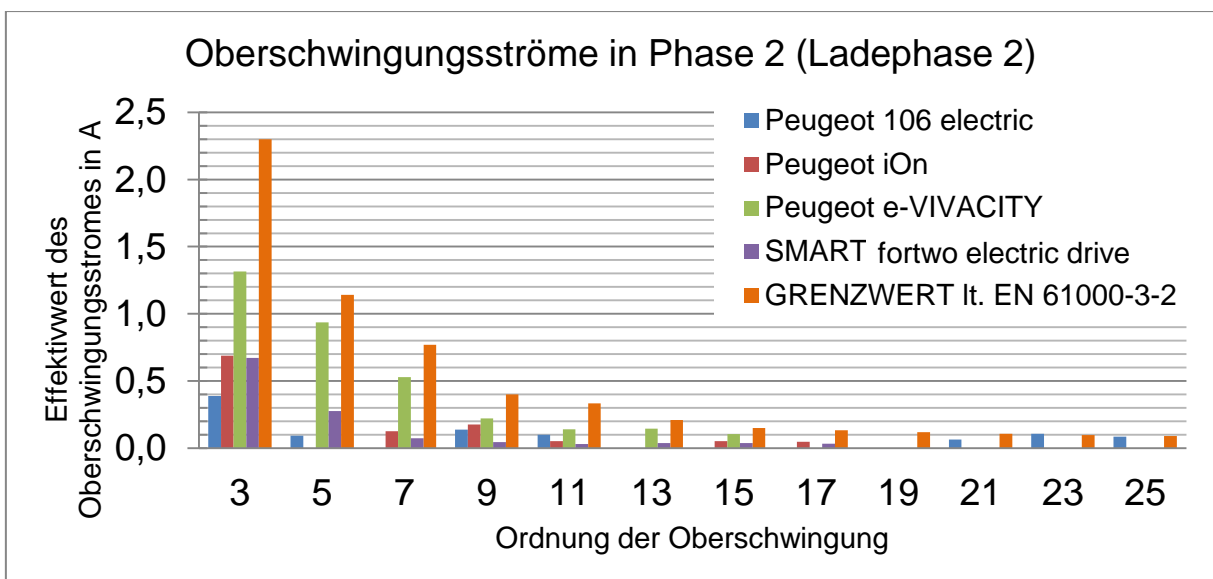


Abbildung 21: Oberschwingungsströme in der Phase 2 (Konstantspannungs-Ladephase) – Beladung unterschiedlicher Elektrofahrzeuge

In der Abbildung 21 werden bei den Beladungen in der Ladephase 2 (Konstantspannungs-Ladephase) die Grenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] eingehalten.

Vergleich der geladenen Energie der unterschiedlichen Elektrofahrzeuge

Die Tabelle 18 listet die gemessenen geladenen Energiemengen der unterschiedlichen Elektrofahrzeuge sowie die prozentuell auf die Akkumulatorkapazität C_N bezogenen geladenen Energien mit der Unterscheidung einzelner Ladephasen (1 und 2) auf.

Tabelle 18: Geladene Energiemengen unterschiedlicher Ladephasen (1 und 2) verschiedener Elektrofahrzeuge

Fahrzeug	Nennkapazität C_N in kWh	Geladene Energie in kWh			Gel. Energie bezogen auf C_N		
		Phase 1	Phase 2	Gesamt	Phase 1	Phase 2	Gesamt
Peugeot 106 electric	14,0	11,64	0,97	12,61	83,1%	7,0%	90,1%
Peugeot iOn	16,0	12,11	1,10	13,21	75,7%	6,9%	82,6%
Peugeot e-VIVACITY	2,0	1,64	0,17	1,80	82,0%	8,3%	90,2%
SMART fortwo electric drive	17,6	12,52	0,53	13,05	71,1%	3,0%	74,2%

Wie aus den einzelnen Messungen ersichtlich ist, wird in der Ladephase 1 zwischen 71 % bis 83 % der gesamt geladenen Energie geladen. Die passt relativ gut mit den Werten aus der Literatur [6], [3] überein, dabei wird die Ladephase 1 (Konstantstrom-Ladephase) bis zu einem SOC von 80 % durchgeführt. Zusätzlich ist aus der Tabelle 18 ersichtlich, dass die jeweiligen Elektrofahrzeuge nicht komplett entladen waren und somit noch eine Restladung vorhanden war.

4.6 Netzimpedanz

Bei Zuschaltung bzw. bei Abschaltung großer elektrischer Lasten ist, unter der Prämisse einer 50-Hz-Betrachtung, eine Spannungsänderung im elektrischen Energiesystem detektierbar. In der folgenden Abbildung 22 ist dieser Effekt einer Lastzuschaltung (Beginn der Beladung des Elektroautos) sowie eine daraus resultierende Verringerung der Versorgungsspannung ersichtlich.

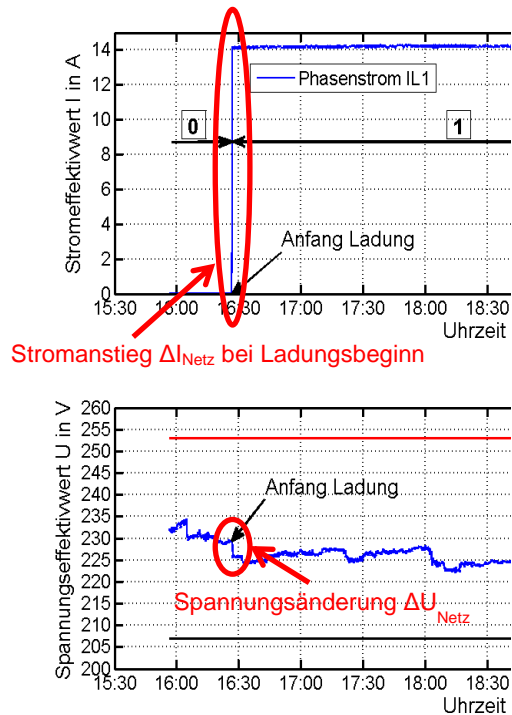


Abbildung 22: Spannungsänderung bei Zuschaltung einer großen Last (Beginn der Beladung des Elektrofahrzeuges)

Aus den gemessenen Änderungen der Spannung ΔU_{Netz} und der Änderung des Stromes ΔI_{Strom} , eruiert aus den durchgeführten Beladungen der Elektrofahrzeuge, kann unter der Prämisse einer 50-Hz-Betrachtung die Netzimpedanz Z_{Netz} (bestehend aus der Impedanz der Quelle, Transformator und der Leitung) ermittelt werden.

In der Abbildung 23 sind die einzelnen Komponenten a) Netz, b) Transformator, c) Leitung 1, d) Leitung 2, e) Laderegler sowie der f) Akkumulator des Elektrofahrzeuges in einfacher Form mittels eines einphasigen Ersatzschaltbildes dargestellt. Bei der Leitung 1 handelt es sich um die Zuleitung zu dem Unterverteiler im Laborgeschoß (siehe Kapitel 4.1). Die Leitung 2 versorgt die Stromtankstelle.

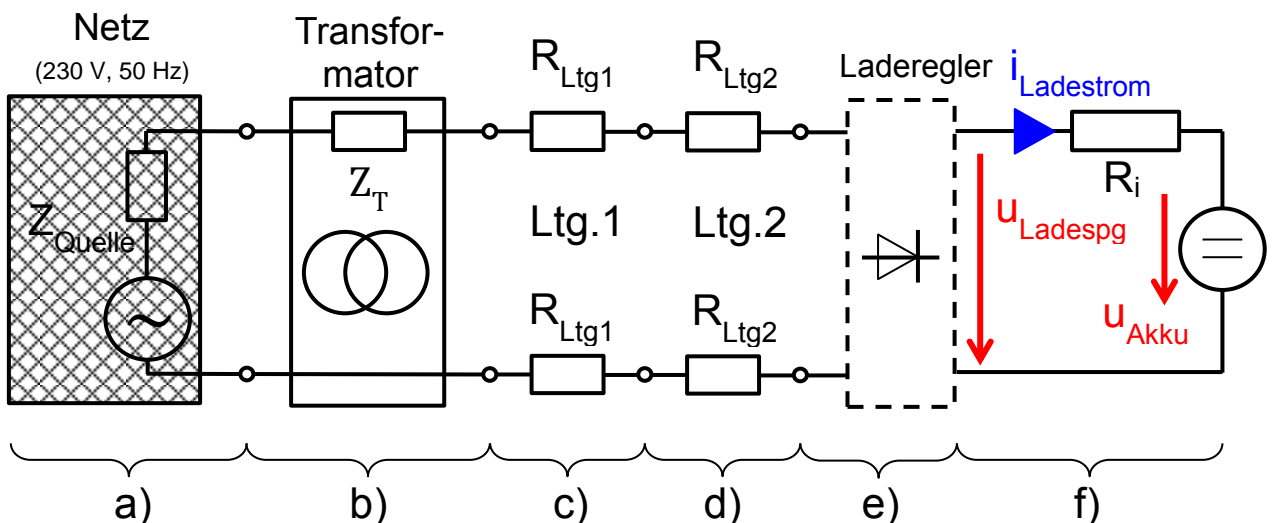


Abbildung 23: Vereinfachtes einphasiges Ersatzschaltbild der Komponenten (elektrisches Netz, Transformator, Leitungen, Laderegler, Akkumulator) zur Ermittlung der Teilimpedanzen

In der Abbildung 23 ist das elektrische Versorgungsnetz mit der zugehörigen Netzimpedanz Z_{Quelle} , der Transformatorimpedanz Z_{T} , den Leistungswiderständen R_{Ltg1} und R_{Ltg2} und dem Laderegler dargestellt. Der Akkumulator wird durch den Innenwiderstand R_i und bei der Beladung als Senke mit der Spannung u_{Akku} dargestellt.

Die folgende Auflistung zeigt die abgelesenen und berechneten charakteristischen Kennwerte der einzelnen Komponenten (siehe Abbildung 23). Es werden alle Impedanzen auf die Niederspannungsebene bezogen.

Leitung 1:	Material Kupfer	$\rho_{\text{Cu}} = 0,01786 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	[20]
	Länge	$l_{\text{Ltg1}} = 100 \text{ m}$	(*)
	Querschnitt	$A_{\text{Ltg1}} = 16 \text{ mm}^2$	(**)
	Widerstand	$R_{\text{Ltg1}} = 0,112 \Omega$	
Leitung 2:	Material Kupfer	$\rho_{\text{Cu}} = 0,01786 \Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$	[20]
	Länge	$l_{\text{Ltg2}} = 40 \text{ m}$	(*)
	Querschnitt	$A_{\text{Ltg2}} = 2,5 \text{ mm}^2$	(*)
	Widerstand	$R_{\text{Ltg2}} = 0,286 \Omega$	
Transformator	Scheinleistung	$S_{\text{T}} = 315 \text{ kVA}$	[21]
	rel. KS-Spannung	$u_{\text{k}} = 5,8 \%$	[21]
	Kupferverluste	$P_{\text{Cu}} = 5 \text{ kW}$	(**)
	Nennspannung	$U_{\text{N}} = 400 \text{ V}$	(*)
Netz	a) Teilimpedanz	$Z_{\text{Tr,Ltg1,ESB}} = 0,25 \Omega$	
	b) Teilimpedanz	$Z_{\text{Tr,Ltg1+2,ESB}} = 0,83 \Omega$	

Legende: (*) geschätzt (**) Annahme

Die aus dem einphasigen ESB berechnete a) Teilimpedanz $Z_{\text{Tr,Ltg1,ESB}}$ bestehend aus der Transformatorimpedanz Z_{Tr} und der Leitungswiderstand R_{Ltg1} beträgt $0,25 \Omega$. Die berechnete b) Teilimpedanz $Z_{\text{Tr,Ltg1+2,ESB}}$ bestehend aus der Transformatorimpedanz Z_{Tr} , dem Leitungswiderstand R_{Ltg1} und dem Leitungswiderstand R_{Ltg2} beträgt $0,83 \Omega$.

Die Unterteilung der Teilimpedanzen $Z_{\text{Tr,Ltg1,ESB}}$ und $Z_{\text{Tr,Ltg1+2,ESB}}$ wird durchgeführt, da die Spannungs- und Strommessung am Unterverteiler im Laborgeschoss der Inffeldgasse 18 durchgeführt wurde. Dieser Standort wurde aus sicherheitstechnischen Überlegungen sowie aufgrund von Witterungseinflüssen zum Schutz des Messequipments gewählt.

Die Netzimpedanz Z_{Netz} (bestehend aus der Netzimpedanz Z_{Quelle} , dem Transformator Z_{T} und dem Leitungswiderstand R_{Ltg1}) ist messtechnisch erfassbar; dabei wird die Spannungsänderung ΔU_{Netz} und die Stromänderung ΔI_{Netz} vor (Zeitpunkt t_0) und nach (Zeitpunkt t_1) der Zuschaltung der Last ermittelt. Aus dem Quotienten der Änderungen kann somit die Netzimpedanz Z_{Netz} berechnet werden. Für überwiegend ohmsche Widerstände vereinfacht sich die Ausdruck; der Zusammenhang ist in diesem Fall in der Gleichung (5) dargestellt.

$$|Z_{Netz}| = \frac{\Delta U_{Netz}}{\Delta I_{Netz}} = \frac{(U_{t_0} - U_{t_1})}{(I_{t_0} - I_{t_1})} \quad (5)$$

Die Tabelle 19 listet die messtechnisch ermittelten Netzimpedanzen (berechnet aus den Spannungs- ΔU_{Netz} und Stromänderungen ΔI_{Netz} am Beginn der Beladung) bei den durchgeführten Beladungen der unterschiedlichen Elektrofahrzeuge auf. Als Vergleich wird die rechnerisch ermittelte Teilimpedanz $Z_{Tr,Ltg1,ESB}$ aus den Komponenten im Ersatzschaltbild (Transformator, Leitung 1) sowie die mittels dem Schleifenimpedanzmessgerät (Fluke 1654 B Multifunction Tester) gemessene Impedanz $Z_{Tr,Ltg1,Sch}$ (Stromtankstelle) dargestellt.

Tabelle 19: Messtechnisch und rechnerisch ermittelte Netzimpedanz lt. Ersatzschaltbild (ESB)

	Nennkapazität C_n in kWh	Spannungsänderung ΔU_{Netz} in V	Ladestrom ΔI_{Netz} in A	gemessene Teilimpedanz $ Z_{Netz} $ in Ω	berechnete Teilimpedanz $ Z_{Tr,Ltg1,ESB} $ in Ω	gemessene Teilimpedanz $ Z_{Tr,Ltg1,Sch} $ in Ω
		Beginn Ladung	Beginn Ladung	Beginn Ladung		
Peugeot 106 electric	14,0	3,45	13,91	0,25	0,25 Ω	0,37 Ω
Peugeot iOn	16,0	3,52	14,20	0,25		
Peugeot e-VIVACITY	2,0	0,78	3,09	0,25		
SMART fortwo electric drive	17,6	7,30	15,61	0,47		
Peugeot iOn Vollladung	16,0	3,43	14,13	0,24		

Die messtechnisch aus den Beladungen der Elektrofahrzeuge ermittelten Netzimpedanzen Z_{Netz} , aufgelistet in Tabelle 19, zeigen bis auf die Messung beim SMART fortwo electric drive ähnliche Ergebnisse wie die berechnete Netzimpedanz $Z_{Tr,Ltg1,ESB}$ lt. dem Ersatzschaltbild (Transformator, Leitung 1). Das Ergebnis mit dem Schleifenimpedanzmessgerät (Fluke 1654 B Multifunction Tester, Schleifenimpedanz $Z_{Tr,Ltg1,Sch}$) zeigt hier einen höheren Wert. Diese Abweichung kann auf vorhandene Übergangswiderstände einzelner Kontakte bei der Messung mittels dem Schleifenimpedanzmessgerät zurückgeführt werden.

Die direkt an der Stromtankstelle zusätzlich gemessene Schleifenimpedanz $Z_{Tr,Ltg1+2,Sch}$ gemessen mit dem Schleifenimpedanzmessgerät (Fluke 1654 B Multifunction Tester) zeigt eine Schleifenimpedanz $Z_{Tr,Ltg1+2,Sch}$ von 0,86 Ω . Im Vergleich dazu zeigt die Berechnung der Teilimpedanz mittels dem ESB eine Impedanz $Z_{Tr,Ltg1+2,ESB}$ von 0,83 Ω . Daraus ergibt sich eine Abweichung von lediglich 3,5 %, bezogen auf die gemessenen Schleifenimpedanz $Z_{Tr,Ltg1+2,Sch}$.

5 Diskussion und Ausblick

Ladeverfahren

Die bekannten Beladungsverfahren [6], [3] mit den speziellen Ladephasen 1 (Konstantstrom-Ladephase) und Ladephase 2 (Konstantspannungs-Ladephase) zur Beladung von Akkumulatoren bzw. der Elektrofahrzeuge sind in den durchgeführten Messungen erkennbar. Dabei werden in der relativ leistungsstärkeren Ladephase 1 zwischen 71 % bis 83 % der Energie geladen. Dies passt relativ gut mit den Werten aus der Literatur [6], [3] überein.

Netzurückwirkungen

Im Allgemeinen konnten durch die Beladung der unterschiedlichen Elektrofahrzeuge keine signifikanten Rückwirkungen auf das elektrische Netz festgestellt werden. Es zeigt sich, dass die Beladung einzelner Elektrofahrzeuge nur wenig bis keinen Einfluss auf das elektrische Netz besitzen.

Gesamtüberschwingungsgehalt Spannung THD_U

Die gemessenen Überschwingungen der Spannung THD_U befinden sich innerhalb normativer Grenzen gemäß ÖVE/ÖNORM EN 50160 [4]. Zusätzlich ist die berechnete Tendenz aus dem Mittelwert der Ladephase (0 und 3) und der Ladephase (1 und 2) kleiner 10 %.

Gesamter Oberschwingungsstrom THC

Bei den durchgeführten Messungen zeigt sich in der Ladephase 2 im Vergleich zur Ladephase 1 ein geringerer Gesamtüberschwingungsstrom THC. Dies lässt sich auf den geringeren Ladestrom in der Ladephase 2 zurückführen. Aufgrund fehlender normativ geregelter Grenzwerte des Gesamtüberschwingungsstroms THC wird dies nicht weiter verfolgt.

Harmonische Oberschwingungsströme

In der Ladephase 1 (Konstantstrom-Ladephase) werden die Grenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] einzelner Stromüberschwingungen höherer Ordnung, im Speziellen die 23.OS sowie die 25.OS um 8 % (23. OS) bzw. 5 % (25. OS) bei einem Elektroauto überschritten.

Im Vergleich dazu werden in der Ladephase 2 (Konstantspannungs-Ladephase) die einzelnen Grenzwerte gemäß ÖVE/ÖNORM EN 61000-3-2 [11] der unterschiedlichen Stromüberschwingungen eingehalten.

Netzimpedanz

Die messtechnische Ermittlung der Netzimpedanz Z_{Netz} , aufgelistet in Tabelle 19, zeigt die gleichen Ergebnisse wie die berechneten Werte der Impedanz $Z_{\text{Tr,Ltg1,ESB}}$ lt. dem einphasigen Ersatzschaltbild. Die berechnete Impedanz $Z_{\text{Tr,Ltg1+2,ESB}}$ lt. Ersatzschaltbild direkt an der Stromtankstelle weicht nur um 3,5 % von der gemessenen Schleifenimpedanz ab.

Ausblick

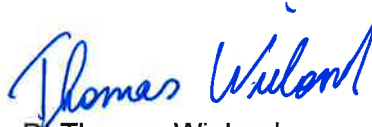
In weiterer Folge ist es erforderlich, dass die Versuche mit einer höheren Beladeleistung (beschleunigte bzw. schnelle Beladung) durchgeführt werden. In einem weiteren Schritt sollte die Beladung zeitgleich mit mehreren Elektroautos durchgeführt werden, um gegebenenfalls Überlagerungseffekte zu erkennen.

Graz, am 23.03.2016



Univ.-Prof. DI Dr. Lothar Fickert

Institutsvorstand



DI Thomas Wieland



DI Dr. Ernst Schmutzer

6 Literaturverzeichnis

- [1] T. Hanappi, S. Mühlbacher, U. Schuh et al., „Elektromobilität in Österreich - Determinanten für die Kaufentscheidung von alternativ betriebenen Fahrzeugen: Ein diskretes Entscheidungsexperiment,“ Wien, Österreich, 2012.
- [2] Statistik Austria, „Kraftfahrzeuge Bestand,“ Wien, Österreich, zuletzt besucht am 30.09.2014.
- [3] T. Wieland, M. Reiter, E. Schmutzner, L. Fickert, J. Fabian und R. Schmied, „Probabilistische Methode zur Modellierung des Ladeverhaltens von Elektroautos anhand real gemessener Daten elektrischer Ladestationen – Auslastungsanalysen von Ladestationen unter Berücksichtigung des Standorts zur Planung von elektrischen Stromnetzen,“ Springer Verlag, Wien, Österreich, 2014.
- [4] ÖVE/ÖNORM EN 50160, „Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen,“ Wien, Österreich, 2011.
- [5] K. Lipinski, „CCCV (constant current constant voltage), <http://www.itwissen.info/definition/lexikon/CCCV-constant-current-constant-voltage-IU-Verfahren.html>,“ Peterskirchen, Deutschland, zuletzt besucht am 01.03.2015.
- [6] D. Linden, T. B. Reddy, „Handbook of batteries,“ Third Edition, ISBN 0-07-135978-8, The McGraw-Hill Companies, Inc., New York, Vereinigte Staaten von Amerika, 2002.
- [7] T. Wieland, L. Fickert, E. Schmutzner, D. Herbst, „iEnergy 2.0 – Workshop; Analyse der Ladevorgänge von unterschiedlichen Elektroautos und anderen Auswirkungen auf das elektrische Stromnetz,“ Graz, Österreich, 30.10.2014.
- [8] CHAdeMO Association, <http://www.chademo.com/>, zuletzt besucht am: 19.01.2016.
- [9] Schrack Technik Energie GmbH, „Stromtankstellen, Elektromobilität - Der umweltfreundliche Weg in unsere Zukunft,“ Wien, Österreich, 2015.
- [10] J. Ferstl, L. Fickert, H. Renner, A. Abart und Ch. Elbe, „Charakteristik der Stromaufnahme und Netzrückwirkung von Energiesparlampen,“ Graz, Österreich, 2010.
- [11] EN 61000-3-2, „Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte,“ Wien, Österreich, 2010.
- [12] M. Wonurbist, „www.ciao.de/Peugeot_106_electric__Test_2883651,“ Deutschland, zuletzt besucht am 20.05.2015.
- [13] Peugeot Austria GmbH, „Preise Ausstattungen iOn,“ Wien, Österreich, 2014.

- [14] Peugeot Motorcycles Deutschland GmbH, „Technisches Datenblatt e-VIVACITY Elektrisch,“ Mörfelden-Walldorf, Deutschland, 2014.
- [15] Axel Springer Auto Verlag GmbH, „Elektro-Roller von Peugeot,“ Bildquelle, Hamburg, Deutschland, zuletzt abgerufen am: 07.03.2016.
- [16] Daimler AG, „Smart electric Preisliste,“ Stuttgart, Deutschland, 2013.
- [17] Daimler AG, „smart,“ Stuttgart, Deutschland, zuletzt abgerufen: 01.03.2016.
- [18] Dewetron GmbH, „<http://www.dewetron.com/de>,“ Grambach, Österreich, zuletzt besucht am 15.04.2015.
- [19] a-eberle, „Definitionen "Leistungsfaktor" und "Strom-Verzerrungsblindleistung",“ Inof-Brief Nr. 22, Nürnberg, Deutschland, 2013.
- [20] W. Friedrich, „Friedrich Tabellenbuch Elektrotechnik,“ Troisdorf, Deutschland, 2005.
- [21] W. Lick, „Auskunft Transformator, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement,“ Graz, Österreich, 2014.