



Power Quality

Paralleles Laden von E-Mobilen

Auswirkungen auf die Netze

Im letzten Sommer wurden an der Technischen Hochschule Bingen (THB) an zehn Ladestellen E-Mobile parallel geladen. Unter anderem war von Interesse, Ladeströme und deren Auswirkung auf das THB-Netz zu messen; Taktfrequenzen und deren Verteilung im Netz zu ermitteln und Netz-Unsymmetrien zu bewerten.

Die Auswertung ergab, dass Normverletzungen in geringem Maße aufgetreten sind, d.h. die Stromqualität hat sich in den letzten Jahren verbessert, dass bei der Spannungsqualität in Zukunft genauer hingeschaut werden muss und dass die Ladeelektronik verbessert werden sollte.

Sonderdruck

Einleitung

Die Studie »Power Quality in der Elektromobilität« aus dem Jahre 2013 ergab, dass rund ein Viertel aller in diesem Projekt gemessenen E-Mobile unzulässige Oberschwingungsströme während der Ladevorgänge erzeugten [1].

Heutzutage hat die Ladetechnik in den E-Fahrzeugen deutlich an Qualität zugenommen. Grenzwertüberschreitungen sind wesentlich geringer geworden. Die weiterhin am häufigsten auftretende, nicht eingehaltene Anschlussbedingung ist die Unsymmetrie beim einphasigen Laden von Elektrofahrzeugen. Zum Teil werden hier einphasige Ladeleistungen bis zu 7 kW erreicht.

Bei Serien-E-Mobilen treten fast keine Normverletzungen auf, außer wenn die Ladeelektronik defekt ist. Die größten Oberschwingungsströme treten bei umgebauten E-Mobilen auf. Diese entstehen, wenn einfache Gleichrichterschaltungen aus Dioden mit kapazitiver bzw. induktiver Glättung im DC-Kreis eingesetzt werden.

Mit der Bewertung nach den VDN-Technischen Regeln werden alle in einer Anlage relevanten Oberschwingungserzeuger bezüglich der am gemeinsamen Netzanschlusspunkt zu erwartenden Emissionen zusammengefasst. Dabei werden zum einen die einzelnen Oberschwingungsströme als auch die Gesamtheit aller Stromharmonischen über den Verzerrungsfaktor der Grundschwingung THD betrachtet.

Zum Messen der Ströme und Spannungen während der Ladevorgänge werden Power Quality Analytoren und Störschreiber der Firma A. Eberle aus Nürnberg eingesetzt. Die Abtastfrequenz der PQ-Box 200 liegt bei 40,96 kHz, so dass Frequenzen von DC bis 20 kHz erfasst werden.

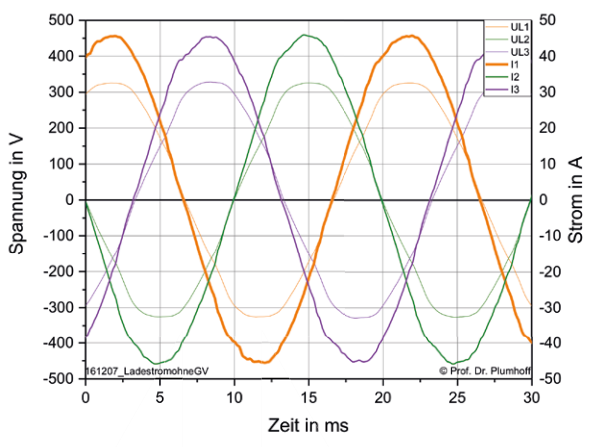


Bild 1: Ladestromverlauf ohne Grenzüberschreitung (32,4 A)

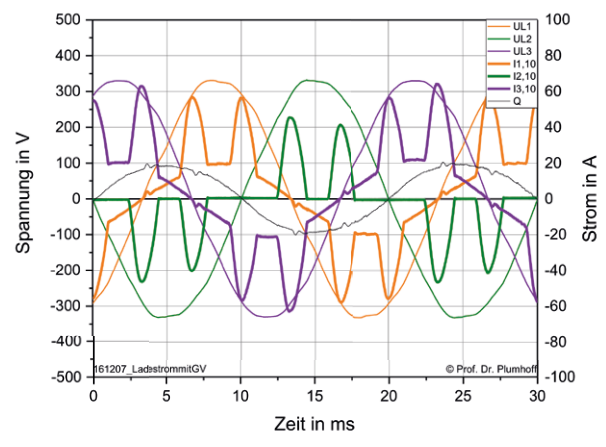


Bild 2: Ladestrom mit kapazitiver Glättung (Umbau)

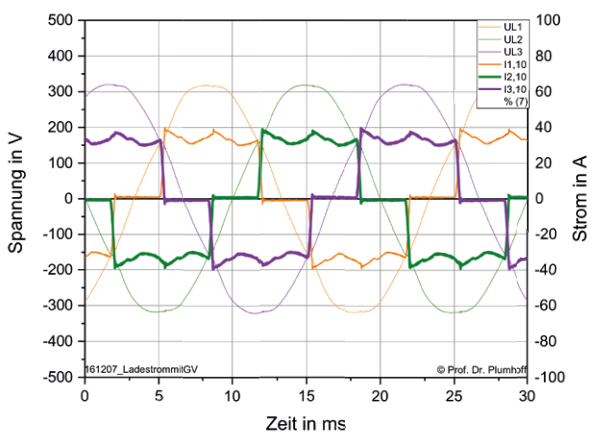


Bild 3: Ladestrom mit induktiver Glättung (Umbau)

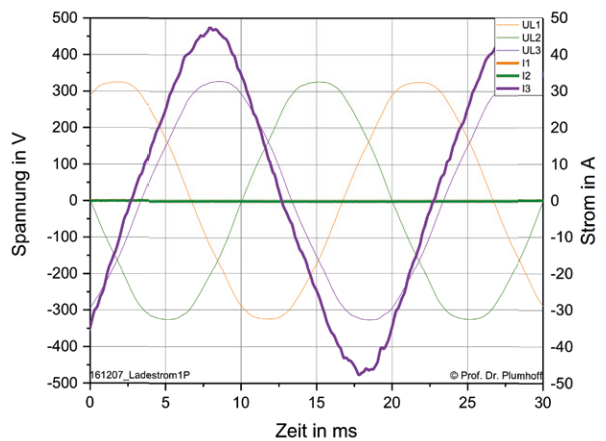


Bild 4: Unsymmetrische Ladeströme - einphasig



Stromqualität

Die Ladestellen 1 bis 8 sind CEE-Steckdosen 32 A, von denen die ersten vier nach ca. 30 m zusammengeführt sind. An den Ladestellen 9 und 10 sind Verteiler 63 A angeschlossen, so dass dort per Schuko, CEE oder Typ-2-Anschluss geladen werden kann. Alle Ladevorgänge bis auf zwei sind so, dass gemäß der D-A-CH-CZ-Richtlinie keine Grenzwertverletzungen auftreten. Das heißt, alle serienmäßig gebauten E-Mobile und die meisten umgebauten E-Mobile zeigen im Stromverlauf keine Grenzwertverletzungen.

In den Bildern 1 bis 4 sind verschiedene Ladeströme von E-Mobilen dargestellt, normgerechte sowie grenzwertüberschreitenden Verläufe sind zu sehen; einmal handelt sich um eine einfache kapazitive Glättung, einmal um eine einfache induktive Glättung. Die nebenstehende Tabelle 1 zeigt die Auswertung der beiden grenzwertüberschreitenden Stromverläufe. Der erste Strom mit einfacher kapazitiver Glättung zeigt den erwarteten THD-Wert von 118 %; der zweite Strom mit einfacher induktiver Glättung bringt den erwarteten THD-Wert von 30 %.

Harmonische	1. Kapazitive Glättung		2. Induktive Glättung	
	DACH-CZ	Ladestrom	DACH-CZ	Ladestrom
H1		26,2 A		27,0 A
H3	3,0	2,1 A	2,0	0,4 A
H5	7,6	11,0 A	5,0	4,9 A
H7	5,0	8,7 A	3,3	5,0 A
H11	2,5	4,9 A	1,7	2,7 A
H13	2,0	3,0 A	1,3	2,5 A
H17	1,0	0,8 A	0,7	1,8 A
H19	0,8	1,1 A	0,5	1,5 A
H21	0,5	0,2 A	0,3	0,2 A
H23	0,5	0,8 A	0,3	1,2 A
H25	0,5	0,5 A	0,3	1,1 A
THD	31,6	118 %	20,8	30 %

Tabelle 1: Harmonische Ströme und THDI – E-Mobile mit Grenzwertverletzungen

1.) Kurzschlussleistung am AP 5487 kVA; Anschlussleistung 22 kVA

2.) Kurzschlussleistung am AP 2385 kVA; Anschlussleistung 22 kVA

Das Bild 5 zeigt den Ladestrom eines E-Mobils, das einphasig mit ca. 7 kW lädt. Es ist bekannt, dass es einzelne EVUs gibt, die damit kein Problem haben, dass aber auch ein Anschluss eines solch unsymmetrischen Verbrauchers (größer als 4,6 kVA) abgelehnt wird.

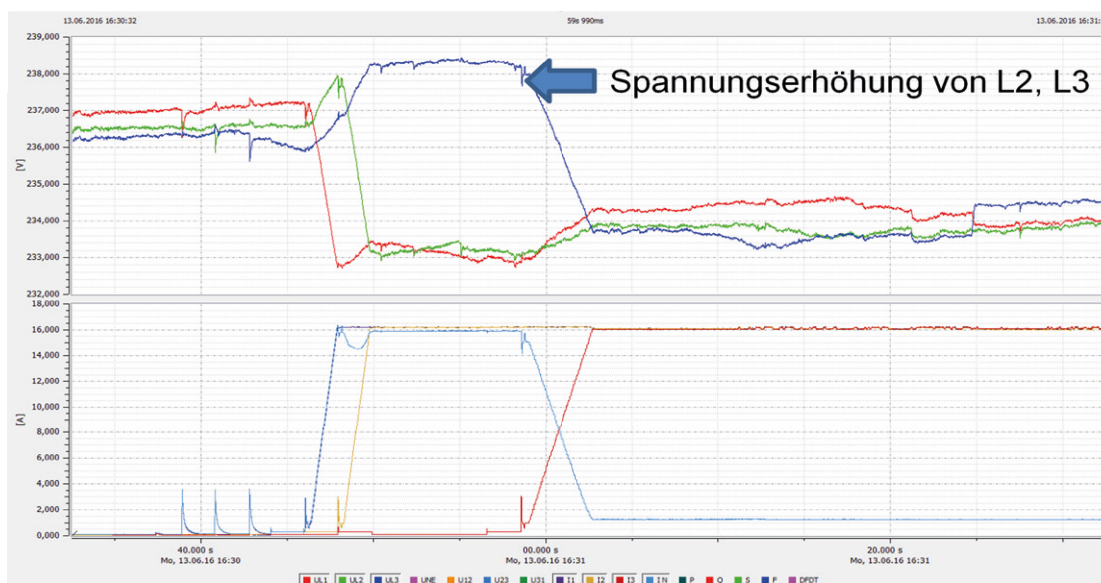


Bild 5: Effektivwert Beginn Ladevorgang (Bsp. Mercedes B-Klasse)

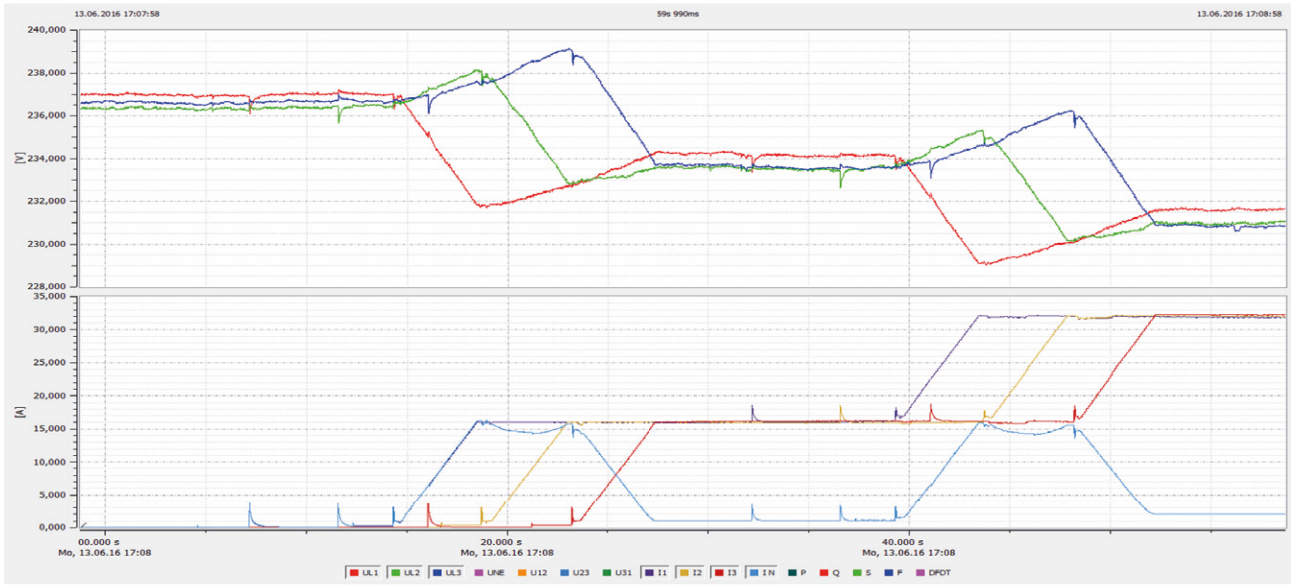


Bild 6: Start Ladevorgang – zeitlich versetzte Phasen

Standardmäßig beginnen die Ladeströme mit allen am Ladevorgang beteiligten Phasen gleichzeitig. Einige Serienfahrzeuge sind so aufgebaut, dass eine Phase nach der anderen zugeschaltet wird (Bild 6).

Das E-Mobil lädt zunächst mit 16 A und nach kurzer Zeit erst mit 32 A stufenweise. Durch die die starke Unsymmetrie wird der Neutraleiter kurzzeitig mit dem Phasenstrom belastet und erhöht die Neutraleiter-Erde-Spannung und erhöht somit auch Spannung der nichtbelasteten Phasen leicht.

Unter den 50 E-Mobilen, die an diesem Nachmittag geladen werden, befinden sich zwei, deren Ladeelektronik fehlerhaft arbeitete (Bild 7). Da stellt sich die Frage, ob die Elektronik selbst so einen Fehler meldet oder ob es eine regelmäßig Überprüfung gibt bzw. geben sollte.

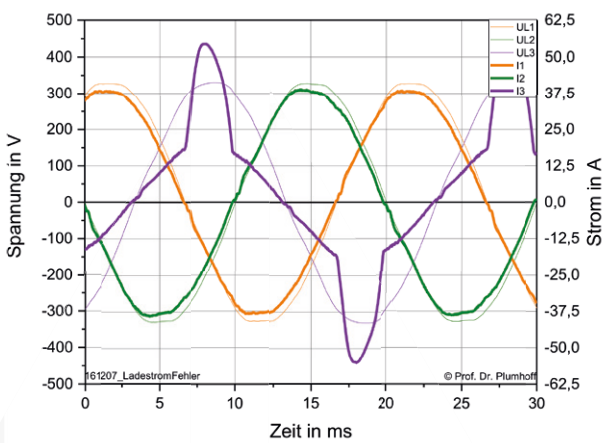


Bild 7: Fehlerhafter Ladestrom

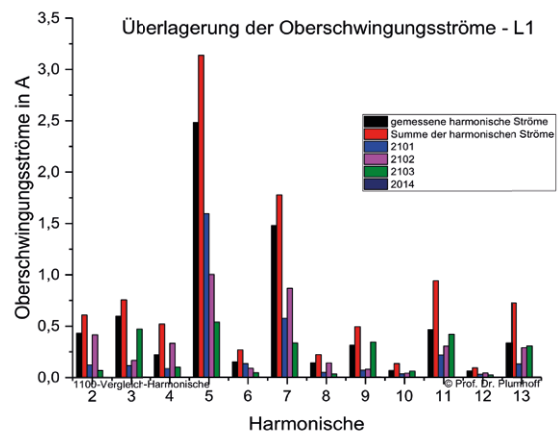


Bild 8: Oberschwingungsströme und deren Addition: 4 verschiedene E-Mobile, betragsmäßige und gemessene Addition



Oberschwingungen – Ströme

Die ersten vier Messpunkte (2101 bis 2104) werden nach ca. 30 m in einem Anschluss (I100) zusammengeführt. Die Ströme der Messpunkte 2101 bis 2104 werden im Messpunkt I100 als Summe gemessen. In dem betrachteten Zeitpunkt ist der Strom an der Messstelle 2104 gleich Null. Die Ströme an den Messstellen 2101, 2102, 2103 und I100 sind im Bild 8 im Oberschwingungsspektrum dargestellt.

In Rot ist die arithmetische Summe der drei Ströme und in Schwarz die gemessene Summe der drei Ströme dargestellt. Da diese beiden Werte nicht gleich sind, haben die einzelnen Oberschwingungsströme unterschiedliche Phasenlagen, d.h. sie eliminieren sich zum Teil.

Supraharmonische – Spannungen

Die Ladeelektronik von E-Fahrzeugen emittiert in das Netz auch Schaltfrequenzen (Bild 9, 10). Hier gab es sehr deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Herstellern.

Die Störaussendung von Schaltfrequenzen der unterschiedlichen Hersteller sollte während der Messkampagne untersucht werden. Jedoch erwies sich diese Untersuchung als problematisch. Obwohl jedes Fahrzeug an einer separaten Zuleitung und CEE-Dose angeschlossen war, konnte man immer alle Schaltfrequenzen der benachbarten Fahrzeuge im momentan gemessenen Fahrzeug in der Spannung und auch sehr deutlich im Strom erkennen.

Somit stellt jedes Fahrzeug mit seiner Elektronik für die supraharmonischen Frequenzen eine Störquelle dar und nimmt diese Störpegel auf. Hierdurch ist es nicht mehr so leicht möglich, über den Strom an einer Messstelle eindeutig den Verursacher dieser Supraharmonischen zu ermitteln. Es ist auch bekannt, dass sich Fahrzeuge gegenseitig so stören können, dass der Ladevorgang abgebrochen wird.

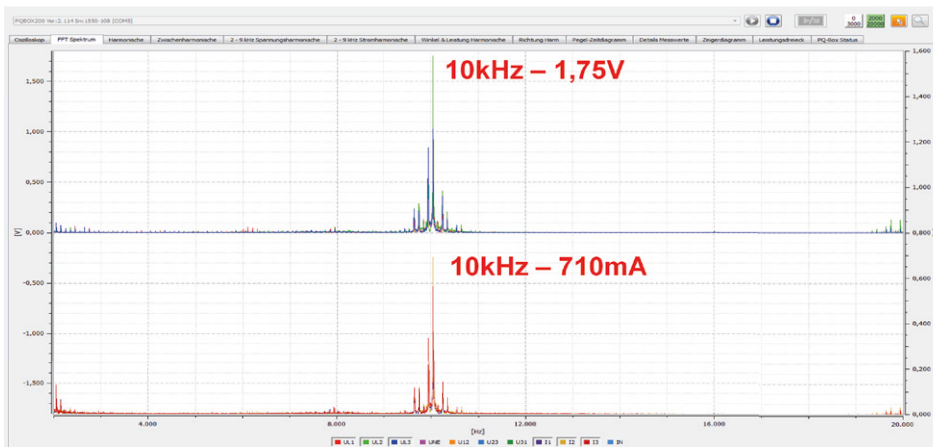


Bild 9: Bsp. Spektralanalyse von Spannungen und Strömen bis 20 kHz:
Das E-Mobil zeigt eine Taktfrequenz von 10 kHz

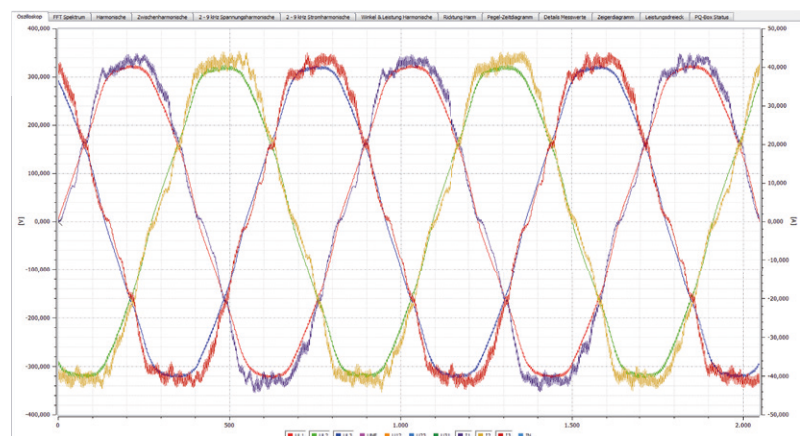


Bild 10: Oszilloskopbild von Strom und Spannung: Man erkennt sehr deutlich die Schaltfrequenzen von 10 kHz auf dem Sinus

Ausbreitung von Supraharmonischen im Netz

In Bild 11 und 12 ist deutlich zu erkennen, dass vom E-Fahrzeug bis zum Transformator die Pegelhöhe der Supraharmonischen abnimmt. Und zwar nehmen die Pegel bei höheren Frequenzen stärker ab als bei den niedrigeren Frequenzen. Somit sind am Transformator 8kHz mit dem höchsten Wert zu erkennen, während in der Verteilung noch die 10 kHz überwiegen.

Aktuell gibt es keine Grenzwerte für die Störaussendung von E-Mobilen im Frequenzbereich 2,5 kHz bis 150 kHz. Auch für das öffentliche Netz ist dieser Bereich nicht geregelt. Es gibt aber aktuell Bestrebungen in den Normgremien, diese Lücke mit Verträglichkeitspegeln zu schließen. Für E-Mobile gelten aktuell die Normen IEC 61000-3-2 (Klasse A) bis 16 A und IEC 61000-3-12 (unsymmetrische Geräte $R_{scc} = 33$) für 16 A bis 75 A.

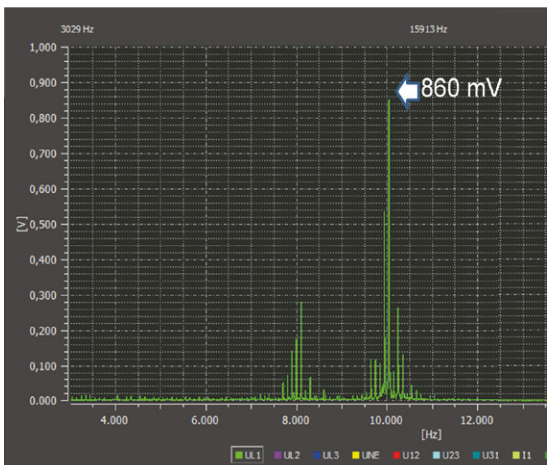


Bild 11: Pegelhöhe und Taktfrequenzen an der Unterverteilung UV III

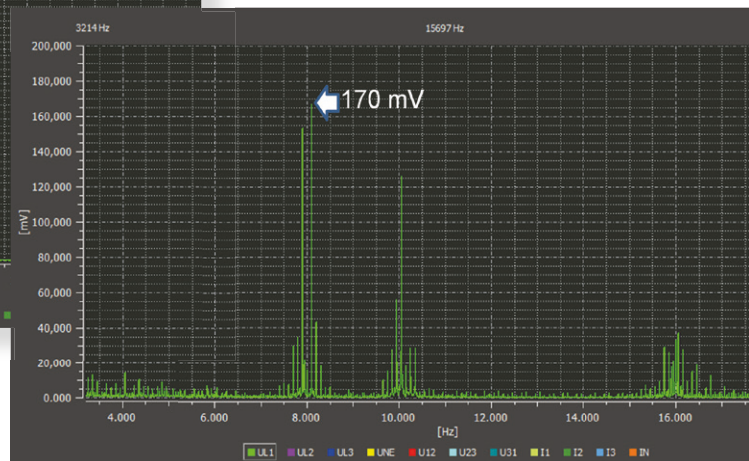


Bild 12: Pegelhöhe der Schaltfrequenzen direkt am Transformator der TH-Bingen

Transiente Einschaltspitzen

Nahezu alle E-Mobile erzeugen im Einschaltmoment eine Strom- und Spannungstransiente im Netz (Bild 13). Die größte Spannungstransiente betrug 400 V und wurde mit 1 MHz Abtastfrequenz ermittelt. Der größte Einschaltstrompeak lag bei 150 A.

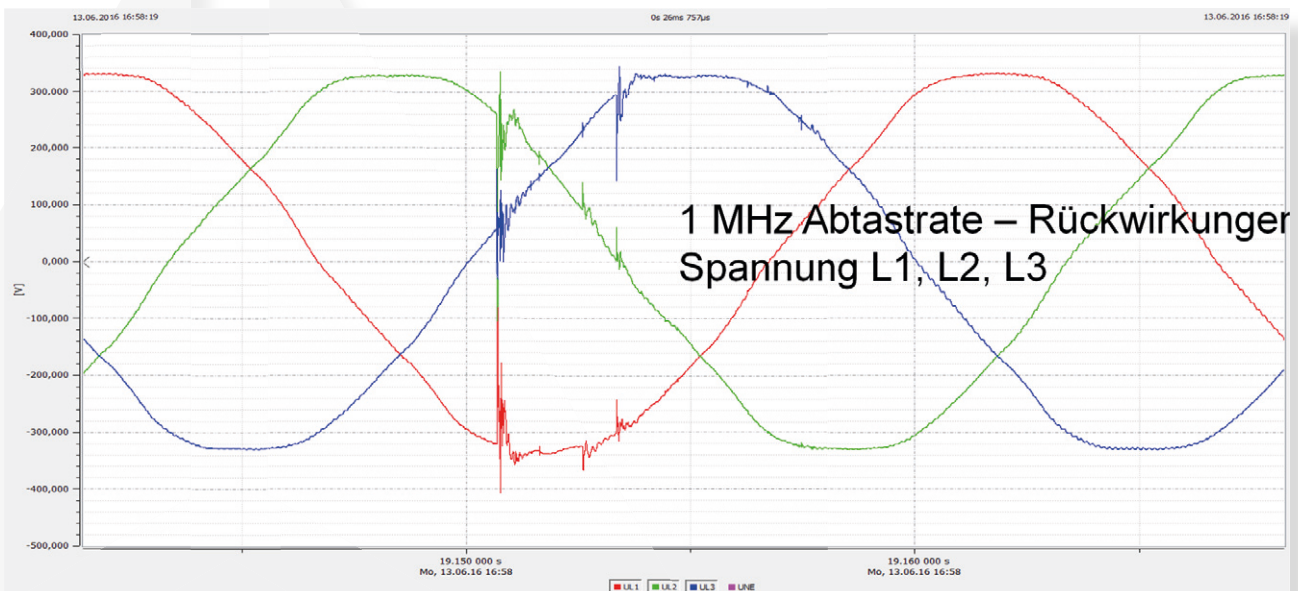


Bild 13: Spannungstransiente auf den drei Phasen



Zusammenfassung

Einige E-Mobile werden einphasig mit einer Leistung von deutlich mehr als 4,6 kVA geladen, in der Messkampagne mit bis zu 7,2 kVA.

Schaltfrequenzen werden von den Fahrzeugen sehr unterschiedlich stark erzeugt. Alle Fahrzeuge wirken aber wieder als Störquelle und »saugen« diese Supraharmonischen aus dem Netz ab. Alle Fahrzeuge erzeugen im Einschaltmoment eine deutliche Spannungstransiente. Dies könnte für andere Verbraucher störend wirken.

Die Stromharmonischen von verschiedenen E-Mobil-Herstellern addieren sich zwar im Netz, aber nicht so stark wie bei einer linearen Addition. Alle Serienhersteller haben die Grenzwerte der Stromharmonischen bis zur 50. Ordnungszahl nicht verletzt.

Jürgen Blum

Produktmanager Power Quality
A. Eberle GmbH & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Peter A. Plumhoff,

Timo Thomas,
Elektrische Energietechnik, TH Bingen

Literatur

- [1] Thomas, Timo; Plumhoff, Peter A.: Studie Power Quality in der Elektromobilität – Auswirkungen der Ladeinfrastruktur von Elektrofahrzeugen auf die Netzqualität. FH Bingen, 2013
- [2] VDN: Technische Regeln zur Beurteilung von Netzurückwirkungen. 2. Ausgabe 2007
- [3] DIN EN 61000-3-2 (VDE 0838-2):2015-03: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-2: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2014)
- [4] DIN EN 61000-3-12 (VDE 0838-12):2012-06: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) – Teil 3-12: Grenzwerte – Grenzwerte für Oberschwingungsströme, verursacht von Geräten und Einrichtungen mit einem Eingangsstrom > 16 A und ≤ 75 A je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind (IEC 61000-3-12:2011)

A. Eberle GmbH & Co. KG
Frankenstraße 160
D-90461 Nürnberg
Tel +49(0)911 628108-0
Fax +49(0)911 628108-99
info@a-eberle.de
www.a-eberle.de