

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.



AUF EINEN BLICK

NETZRÜCKWIRKUNGEN Elektrofahrzeuge erzeugen im Einschaltmoment eine deutliche Spannungstransiente, was für andere Verbraucher störend wirken könnte

HARMONISCHE Alle Serienhersteller haben die Grenzwerte der Stromharmonischen bis zur 50. Ordnungszahl nicht verletzt

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 hingesehen werden muss und dass die Ladeelektronik verbessert werden sollte.

Die Studie »Power Quality in der Elektromobilität« aus dem Jahre 2013 ergab, dass rund ein Viertel aller in diesem Projekt gemessenen E-Mobile unzulässige Ober-

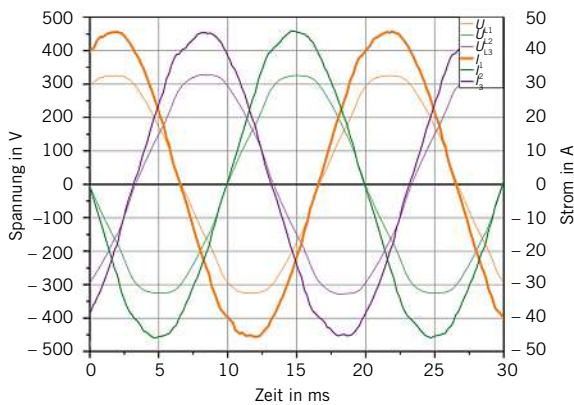


Bild 1: Ladestromverlauf ohne Grenzverletzung (32,4 A)

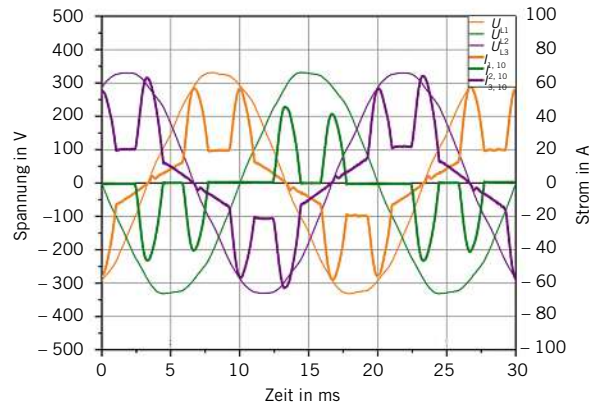


Bild 2: Ladestrom mit kapazitiver Glättung (Umbau)

Quelle: Plumhoff (alle)

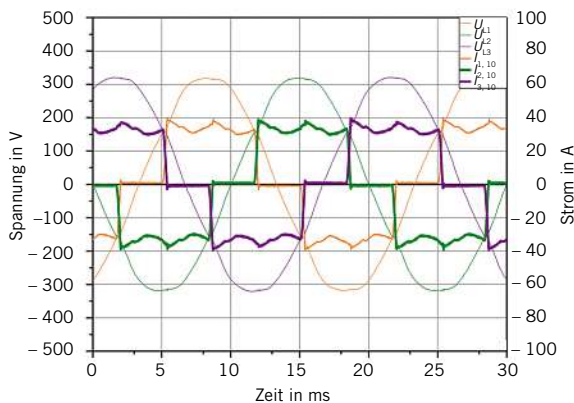


Bild 3: Ladestrom mit induktiver Glättung (Umbau)

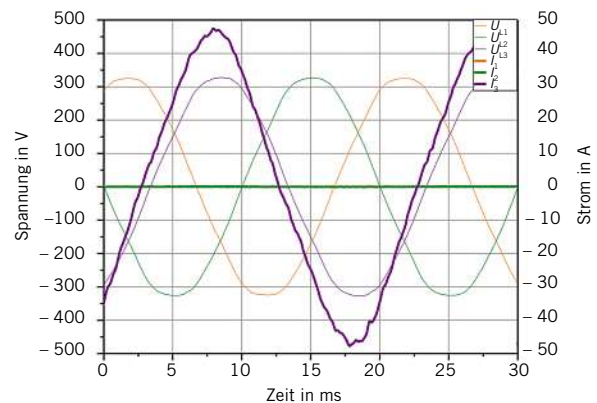


Bild 4: Unsymmetrische Ladeströme – einphasig

schwingungsströme während der Ladevorgänge erzeugen [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 40,96kHz, so dass Frequenzen von DC bis 20kHz erfasst werden.

Bewertung der Stromqualität

Die Ladestellen 1 bis 8 sind CEE-Steckdosen 32A, von denen die ersten vier nach ca. 30m zusammengeführt sind. An den Ladestellen 9 und 10 sind Verteiler 63A 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 grenzwertüberschreitende Verläufe sind zu sehen. Einmal handelt es sich um eine einfache kapazitive Glättung, einmal um eine einfache induktive Glättung.

Die nebenstehende **Tabelle 1** zeigt die Auswertung der beiden grenzwertüberschrei-

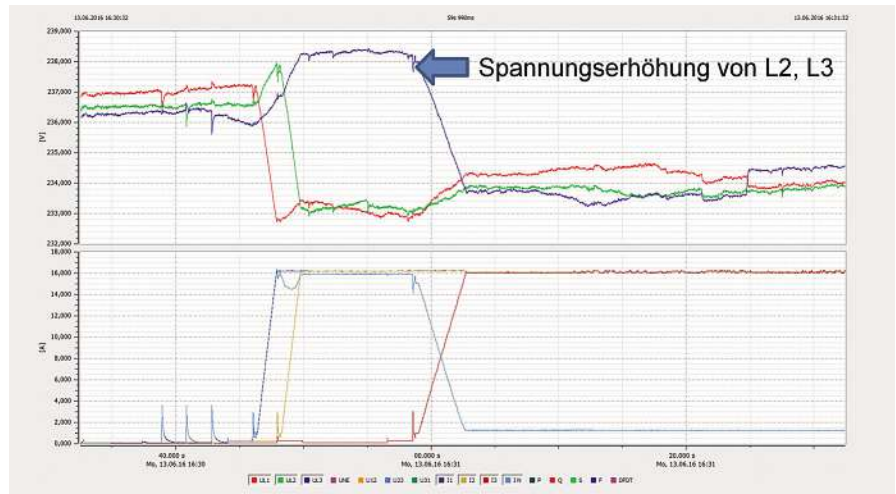


Bild 5: Effektivwert Beginn Ladevorgang

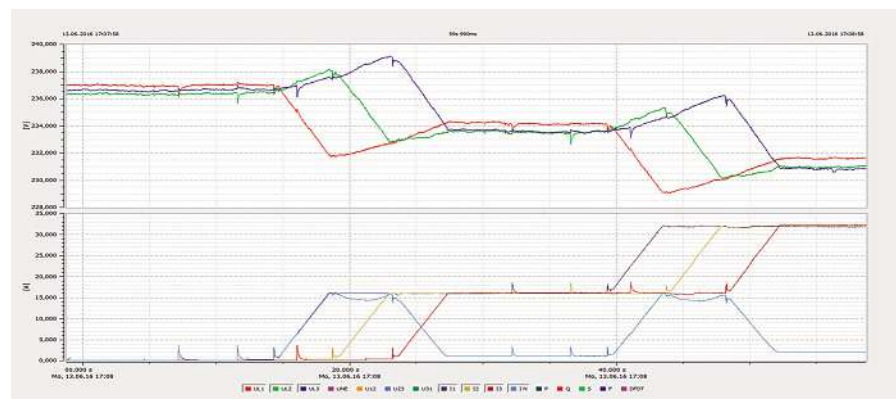


Bild 6: Start Ladevorgang – zeitlich versetzte Phasen

tenden 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

Harmonische	1. Kapazitive Glättung		2. Induktive Glättung	
	DACH-CZ	Ladestrom	DACH-CZ	Ladestrom
H1		26,2 A		27,0 A
H3	3	2,1 A	2	0,4 A
H5	7,6	11,0 A	5	4,9 A
H7	5	8,7 A	3,3	5,0 A
H11	2,5	4,9 A	1,7	2,7 A
H13	2	3,0 A	1,3	2,5 A
H17	1	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

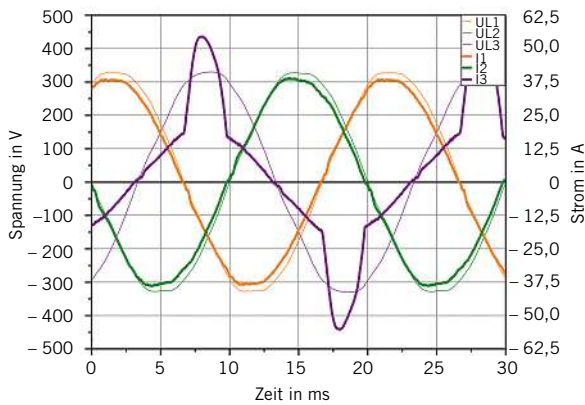


Bild 7: Fehlerhafter Ladestrom

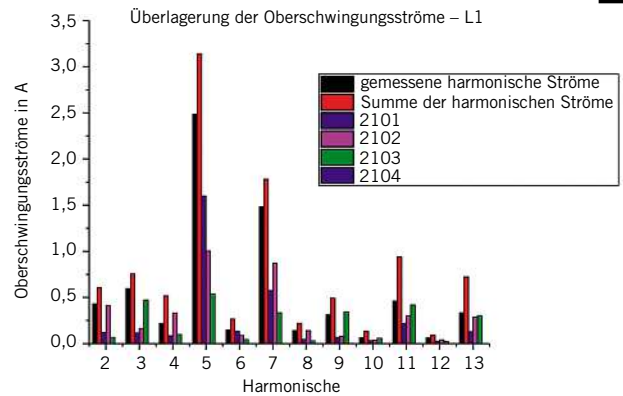


Bild 8: Oberschwingungsströme und deren Addition: 4 verschiedene E-Mobile, betragsmäßige Addition und gemessene »Addition«

Das Bild 4 zeigt den Ladestrom eines E-Mobils, das einphasig mit ca. 7kW 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 4,6kVA) abgelehnt wird.

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 5, 6**).

Das E-Mobil lädt zunächst mit 16A und nach kurzer Zeit erst mit 32A stufenweise. Durch die starke Unsymmetrie wird der Neutralleiter kurzzeitig mit dem Phasenstrom belastet und erhöht die Neutralleiter-Erdespannung und somit auch die 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.

Oberschwingungen - Ströme

Die ersten vier Messpunkte (2101 bis 2104) werden nach ca. 30m in einem Anschluss (1100) zusammengeführt. Die Ströme der Messpunkte 2101 bis 2104 werden im Messpunkt 1100 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 1100 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.

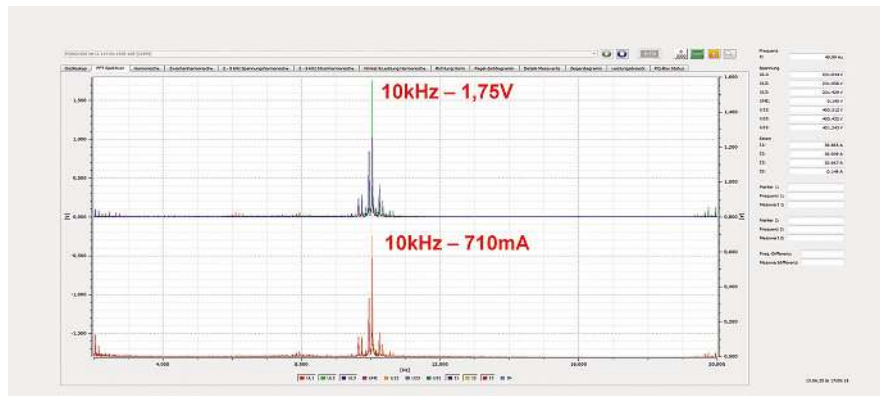


Bild 9: Beispiel Spektralanalyse von Spannungen und Strömen bis 20kHz: Das E-Mobil zeigt eine Taktfrequenz von 10kHz

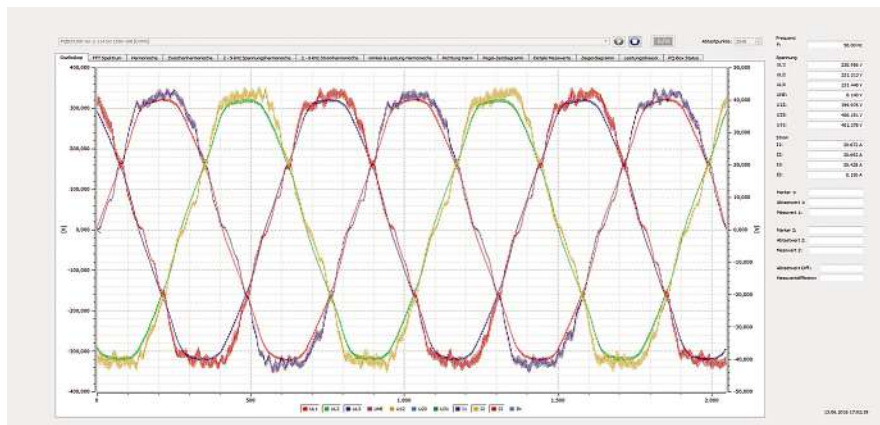


Bild 10: Oszilloskopbild von Strom und Spannung: Man erkennt sehr deutlich die Schaltfrequenzen von 10kHz auf dem Sinus

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

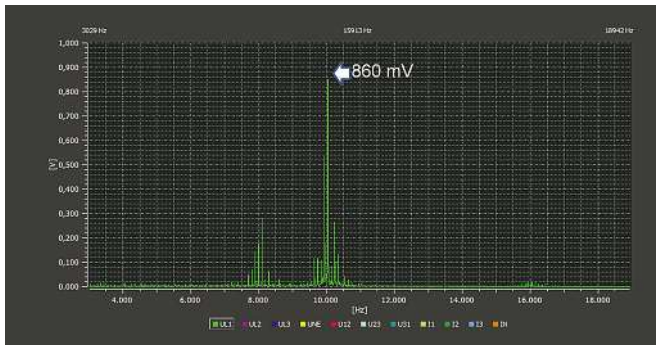


Bild 11: Pegelhöhe der Taktfrequenzen an der Unterverteilung UV III

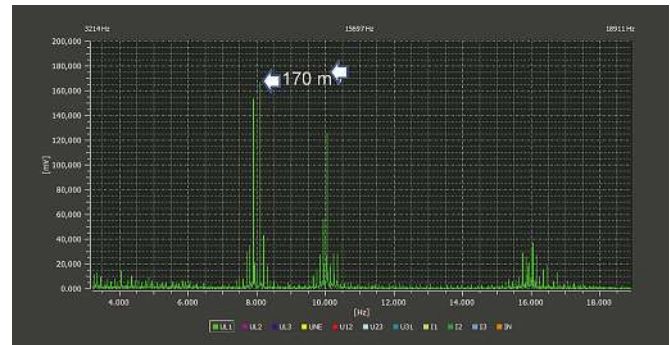


Bild 12: Pegelhöhe der Schaltfrequenzen direkt am Transformator der TH-Bingen

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 supraharmischen 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 Supraharmischen zu ermitteln. Es ist auch bekannt, dass sich Fahrzeuge gegenseitig so stören können, dass der Ladevorgang abgebrochen wird.

Ausbreitung von Supraharmischen im Netz

In **Bild 11 und 12** ist deutlich zu erkennen, dass vom E-Fahrzeug bis zum Transformator die Pegelhöhe der Supraharmischen 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 10kHz überwiegen.

Aktuell gibt es keine Grenzwerte für die Störaussendung von E-Mobilen im Frequenzbereich 2,5kHz bis 150kHz. 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 gilt seit 19.6.2017 die Norm IEC 61851-21-1: Klasse A bis 16A und unsymmetrische Geräte $R_{sce} = 33$ für 16A bis 75A.

Transiente Einschaltspitzen

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

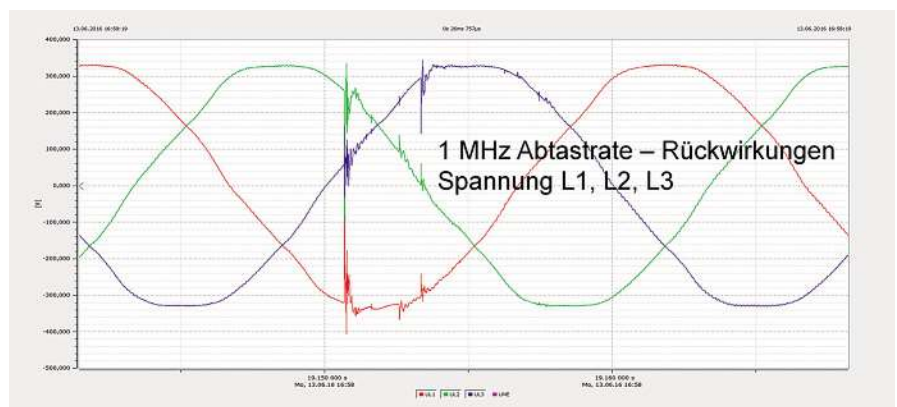


Bild 13: Spannungstransiente auf den drei Phasen

Zusammenfassung

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

Schaltfrequenzen werden von den Fahrzeugen sehr unterschiedlich stark erzeugt. Alle Fahrzeuge wirken aber wieder als Störquelle und »saugen« diese Supraharmischen 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.

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 $\leq 16A$ 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 $> 16A$ und $\leq 75A$ je Leiter, die zum Anschluss an öffentliche Niederspannungsnetze vorgesehen sind (IEC 61000-3-12:2011)



Fachbeitrag zum Thema

Netzurückwirkungen beim Laden von Elektrofahrzeugen, Beitragsreihe in »de« 8.2014, S. 46, »de« 9.2014 → S. 41 und »de« 10.2014 → S. 38

AUTOREN

Jürgen Blum
 A. Eberle GmbH & Co. KG

Prof. Dr.-Ing. Peter A. Plumhoff,
Timo Thomas,
 Elektrische Energietechnik, TH Bingen