

Analyse von Dämpfungs- und Diversitätseffekten bei Oberschwingungen mittels Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrizen

M. Sc. Anke Fröbel, Prof. Dr.-Ing. Ralf Vick, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

1 Einleitung

Mit der Verdrängung konventioneller linearer Lasten im Energieversorgungssystem durch mehr und mehr nichtlineare, Oberschwingungserzeugende Betriebsmittel steigt das gesamte Oberschwingungslevel an. Da Oberschwingungseffekte wie Neutralleiterüberlastung, Fehlfunktionen von Schutzeinrichtungen, Betriebsmittelausfälle und zusätzliche Verluste ungewollt sind, ist es notwendig, die Oberschwingungsbelastung im System zu bewerten. Konventionelle Methoden, die in Oberschwingungsstudien zum Einsatz kommen, nehmen üblicherweise eine unverzerrte Spannungsform an den Klemmen der entsprechenden nichtlinearen Last an und betrachten die resultierenden Oberschwingungsströme, die ins System zurückwirken. Da diese Ströme durch die Netzimpedanzen fließen, verursachen sie Oberschwingungsspannungsabfälle, die wiederum die Klemmenspannungen anderer linearer und nichtlinearer Betriebsmittel verzerren. Zur Vereinfachung werden diese Wechselwirkungseffekte üblicherweise vernachlässigt. Wenn mehrere nichtlineare Lasten die gleiche Netzimpedanz teilen, treten zudem Effekte auf, die als Dämpfung und Diversität bekannt sind [1].

Im Folgenden werden verschiedene Methoden diskutiert, die diese Effekte berücksichtigen. Basierend auf Labormessungen werden die Oberschwingungsströme sowohl von einzelnen Oberschwingungserzeugern als auch Kombinationen dieser analysiert. LED Lampen dienen dabei als Testobjekte. Nach der Bewertung der Eingangsströme in Abhängigkeit des Oberschwingungsgehaltes der Klemmenspannung wird für ausgewählte Lampen ein Modell, das auf Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrizen basiert und Wechselwirkungseffekte berücksichtigt, abgeleitet. Die Methode wurde ursprünglich in [2] vorgeschlagen, in [3] erweitert und in [4] erneut aufgegriffen. Die Matrizen einzelner Lampen werden kombiniert um das Verhalten parallel geschalteter Lampen zu prognostizieren. Dabei werden auch Dämpfungs- und Diversitätseffekte berücksichtigt.

2 Oberschwingungsanalyse kleiner, nichtlinearer Lasten

2.1 Dämpfungs- und Diversitätseffekte

Der Anteil der Oberschwingungen im Eingangsstrom einer nichtlinearen Last hängt unter anderem vom Oberschwingungsgehalt in der Versorgungsspannung ab. Sowohl die Amplituden als auch die Phasenwinkel der Oberschwingungsströme variieren mit dem Grad der Spannungsverzerrung. Die daraus resultierenden Effekte führen häufig zur Reduktion des Gesamtoberschwingungsgehaltes der Ströme. Das bedeutet, dass die Oberschwingungsströme für eine Summe von Lasten in der Regel kleiner sind als die algebraische Summe der jeweiligen Oberschwingungsströme der einzelnen Lasten. Das Gesamtoberschwingungslevel wird dadurch herabgesetzt. In [1] werden zwei Faktoren für die Quantifizierung dieser Phänomene eingeführt. Für eine bestimmte Summe von n gleichartigen nichtlinearen Lasten, die die gleiche Netzimpedanz teilen, ist der Dämpfungsfaktor (engl.: *attenuation factor*) $AF_{h,n}$ der resultierenden Oberschwingungsströme der h -ten Ordnung definiert als

$$AF_{h,n} = \frac{|I_{h,n}|}{n \cdot |I_{h,1}|}, \quad (1)$$

wobei $I_{h,n}$ der h -te Oberschwingungsstrom von n Lasten in Betrieb und $I_{h,1}$ der h -te Oberschwingungsstrom einer Last in Betrieb ist.

Analog ist der Diversitätsfaktor (engl.: *diversity factor*) $DF_{h,n}$ entsprechend Formel (2) definiert als das Verhältnis der vektoriellen Summe zur algebraischen Summe des h -ten Oberschwingungsstromes, der durch die i -te Last hervorgerufen wird. Er quantifiziert die partielle Auslöschung der Oberschwingungsströme aufgrund der Phasendifferenz der Ströme gleicher Oberschwingungsordnung, die durch unterschiedliche Lasten hervorgerufen werden.

$$DF_{h,n} = \frac{\left| \sum_{i=1}^n I_h^i \right|}{\sum_{i=1}^n |I_h^i|} \quad (2)$$

Verschiedene Fallstudien, z.B. beschrieben in [5], [6] und [7] zeigen, dass diese Effekte für Systeme mit einer hohen Anzahl an Oberschwingungsquellen nicht ignoriert werden können. Es besteht das Risiko, den Gesamtoberschwingungsgehalt zu überschätzen und damit die Kosten zur Reduktion des Oberschwingungsproblems.

2.2 Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrizen

Kleine, nichtlineare Lasten können mit Hilfe so genannter Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrizen (engl. *frequency coupling admittance matrices* bzw. *crossed frequency admittance matrices*) modelliert werden. Die Methode wurde zuerst in [2] vorgestellt, dann u.a. in [3] und [4] aufgegriffen und weiterentwickelt. Ein nichtlineares Betriebsmittel wird dabei durch eine äquivalente Norton-Admittanz-Matrix \underline{Y} abgebildet. Die Matrixelemente Y_{kj} verknüpfen Oberschwingungsströme einer bestimmten Ordnung (k) und Oberschwingungsspannungen einer anderen Ordnung (j). Oberschwingungseingangsströme eines bestimmten Betriebsmittels hängen von den jeweils vorhandenen Oberschwingungsspannungen in der Klemmenspannung ab und können entsprechend (3) berechnet werden.

$$\underline{I} = \underline{Y} \cdot \underline{V} \quad (3a)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2N} \\ Y_{31} & Y_{32} & \cdots & Y_{3N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{M1} & Y_{M2} & \cdots & Y_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix} \quad (3b)$$

Um die notwendigen Parameter der Admittanz-Matrix zu bestimmen, werden nacheinander kleine Oberschwingungsverzerrungen an den Klemmen erzeugt und die resultierenden Ströme gemessen. Zunächst wird die Last mit einer so genannten Grundspannung versorgt. Diese kann rein sinusförmig sein, aber auch bereits Oberschwingungen enthalten. Schrittweise wird diese konstante Grundspannung mit einer variablen Oberschwingung überlagert. Das Modell kann für stationäre, passive Lasten verwendet werden und bedeutet eine Linearisierung des Verhaltens der Last um einen Arbeitspunkt. Veränderungen der Oberschwingungsströme werden ausschließlich als Folge der Veränderung von anliegenden Oberschwingungsspannungen gesehen. Daher kann die Admittanz-Matrix spaltenweise berechnet werden. Nicht nur Amplitude und Frequenz sondern auch die Phase der angewendeten Spannungsverzerrungen können frei gewählt werden. Wenn die Phase zwischen 0 und 2π variiert wird, verändert sich das zugehörige Matrix-Element idealerweise in Form einer doppelt kreisförmigen Ortskurve [3]. Daher wird in [3] die Implementierung einer phasenabhängigen Admittanz in Form einer tensor-basierten Frequenz-Kopplungs-Matrix vorgeschlagen, die rechentechnisch effizient ist. Die Elemente jedes Tensors können theoretisch mit nur zwei Admittanz-Punkten bestimmt werden. Zur Reduktion der Effekte durch Rauschen und Messunsicherheiten ist es jedoch empfehlenswerd, die Zahl der Messpunkte zu erhöhen.

Abgesehen vom zeitlichen Aufwand für die Messungen ist das Modell simpel, da es die nichtlineare Last als "Black Box" betrachtet. Detaillierte Kenntnisse über die Betriebsprinzipien oder das Schaltungsdesign der Last sind nicht erforderlich. Es erlaubt die Betrachtung von Wechselwirkungseffekten, die auftreten, wenn mehrere nichtlineare Lasten im Netz vorhanden sind und die Oberschwingungsspannungen, die aufgrund der auftretenden Oberschwingungsströme an den Netzimpedanzen abfallen, die Klemmenspannung anderer Betriebsmittel stören.

3 Oberschwingungsströme von LED Lampen

3.1 Messaufbau und Vorgehensweise

Um Dämpfungs- und Diversitätseffekte nichtlinearer Lasten zu untersuchen, werden verschiedene, kommerziell verfügbare LED Lampen unterschiedlicher Hersteller getestet. Ihre Nennleistungen liegen zwischen 3W und 8W. Alle Lampen sind nicht dimmbar und haben integrierte Gleichrichterschaltungen. Zur Messung der Eingangsströme wird der Messaufbau entsprechend Abbildung 1 verwendet.

Eine programmierbare TESEQ NSG 1007-45 dient als Spannungsquelle. Sie erlaubt Messungen sowohl bei nahezu idealer sinusförmiger Spannung mit Nennparametern (z.B. 230V/50Hz) als auch bei individuell vorgegebenen Spannungsverzerrungen.

Verschiedene Testbedingungen werden in MATLAB in einem automatisierten Prozess erstellt und per RS-232 Schnittstelle und SCPI Protokoll an die Quelle gesendet. Zur Datenerfassung werden eine Tektronix Stromzange TCP0030, ein Differentialtastkopf Testec TT-SI und ein Tektronix DPO3014 Oszilloskop verwendet. Die gewonnenen Daten werden mit MATLAB ausgewertet. Für die Transformation der gemessenen Strom- und Spannungsverläufe vom Zeitbereich in den Frequenzbereich wird FFT eingesetzt.

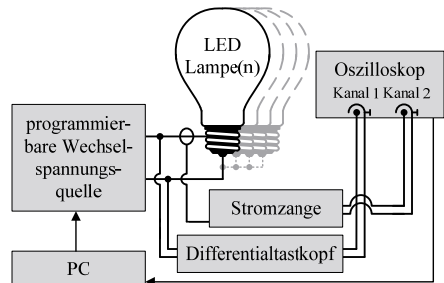


Abbildung 1: Messaufbau

3.2 Einzelne Lampen

Um den Einfluss unterschiedlicher Klemmenspannungen zu untersuchen, wird jede Lampe für drei Fälle getestet. Zunächst wird nur die Grundspannung mit 230V Effektivwert und 50Hz angelegt. Anschließend wird eine Oberschwingung dritter Ordnung mit 5% der Amplitude der Grundschwingung überlagert, einmal mit 0° Phasenverschiebung gegenüber der Grundschwingung und einmal mit 60°. Der erste Fall resultiert in eine abgeflachte, jedoch breitere Form der Spannungskurve im Vergleich zur reinen Sinus-schwingung, der zweite Fall bedeutet einen Anstieg der Gesamtamplitude und eine steilere Form. Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen die zugehörigen Ströme jeweils für eine 5W und eine 8W Lampe. Bei der 5W Lampe führt die Überlagerung mit der dritten Oberschwingung deutlich zu einer Verringerung der Amplitude des Stromes und einer längeren Leitungsdauer. Die zusätzliche Phasenverschiebung von 60° resultiert hauptsächlich in eine Verschiebung der Leitungsperiode entlang der Zeitachse. Im Fall der unverzerrten Klemmenspannung erreicht der Strom bei etwa 4ms sein Maximum. Im Fall der Verzerrung mit der dritten Oberschwingung mit einer Phasenverschiebung von 60° beginnt der Strom bei 4ms gerade erst zu fließen.

Die Amplitudenspektren, die in Abbildung 4 zu sehen sind, zeigen, dass die abgeflachte Spannung zu einer signifikanten Verringerung der Oberschwingungsströme führt, abgesehen von der dritten Ordnung. Wie in Abbildung 3 zu sehen ist, variieren die Ströme der 8W Lampe mehr in ihrer Form, nicht so sehr in ihrer Amplitude. Da die Leitungsdauer länger ist als bei der 5W Lampe, ist der Gesamtüberschwingungsgehalt geringer. Jedoch führt der zweite Messfall zu einem Anstieg aller Oberschwingungsströme abgesehen von dem dritten Ordnung. Nicht nur die Amplituden, auch die Phasenwinkel variieren signifikant, wie aus Abbildung 6 und Abbildung 7 ersichtlich. Bei mehreren Lasten dieses Typs, verteilt in einem Energieversorgungsnetz, kann von einem hohen Diversitätsfaktor ausgegangen werden.

3.3 Parallelbetrieb mehrerer Lampen

Im nächsten Schritt werden verschiedene Kombinationen der Lampen in Parallelschaltung betrieben und für die gleichen Spannungen getestet wie zuvor die einzelnen Lampen. Abbildung 8 bis Abbildung 13 zeigen einige der Ergebnisse.

Aus dem Vergleich von Abbildung 5 und Abbildung 10 wird ersichtlich: wenn zwei gleichartige Lampen von jeweils 8W parallel betrieben werden, entsprechen die Amplituden der Oberschwingungen des Gesamtstromes dem jeweils doppelten Wert der einzelnen Lampe. Die Phasenspektren sind, abgesehen von Messungenauigkeiten, die gleichen, wie bei den einzelnen Lampen (Abbildung 7).

Abbildung 9 zeigt die Verläufe im Zeitbereich für eine Parallelschaltung von fünf verschiedenen Lampen mit Nennleistungen zwischen 3W und 8W. Es ist erkennbar, dass sich die verschiedenen Leitungsperioden addieren. Da jede Lampe einen anderen Gleichrichterkreis nutzt, werden im Gesamtstrom zu unterschiedlichen Zeiten Stromspitzen hervorgerufen. Der resultierende Strom gleicht einem sinusförmigen mehr als die Eingangsströme der einzelnen Lampen. Nichtsdestotrotz ist der Oberschwingungsgehalt, insbesondere der dritten Oberschwingungen noch signifikant. Jedoch fällt die Einhüllende der Amplitudenspektren der Parallelschaltung deutlich schneller ab, als z.B. die Einhüllende der Amplitudenspektren der einzelnen 5W Lampe. Die Spektren der Parallelschaltung bestätigen die Aussage aus [1], dass Diversitätseffekte den Gesamtgehalt an Oberschwingungsströmen reduzieren kann. Die individuellen Gleichrichterkreise verursachen Oberschwingungen der gleichen Ordnung, jedoch mit unterschiedlichen Phasenwinkeln. Abbildung 12 zeigt die Oberschwingungsströme der fünften Ordnung für jede einzelne Lampe sowie für die Parallelschaltung der gleichen Lampen. Die Ströme der 4W und der 5W Lampe löschen sich gegenseitig nahezu völlig aus, da ihre Amplituden fast gleich, ihre Phasenverschiebung zueinander jedoch nahe 180° ist. Der Einfluss der 5W Lampe wird hauptsächlich durch die fünfte Oberschwingung der 6W Lampe reduziert, die um etwa 90° phasenverschoben ist.

4 Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrizen

4.1 Einzelne Lampen

Für jede Lampe werden mehrere Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrizen erstellt. Die Gleichungen (4) und (5) zeigen zwei Beispiele für eine 8W Lampe. In beiden Fällen ist die Grundspannung eine rein sinusförmige mit 230V Effektivwert und 50Hz. Im ersten Fall wird eine Verzerrung mit Oberschwingungsspannungen bis zur elften Ordnung (550Hz) mit einer Amplitude von 5% der Grundschwingung und einer Phasenverschiebung von 0° gegenüber der Grundschwingung verursacht. Im zweiten Fall beträgt die Phasenverschiebung für alle Spannungsharmonischen 60° .

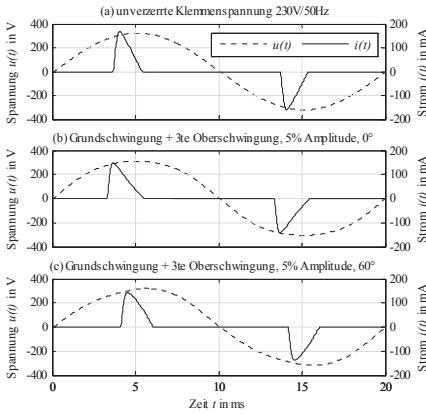


Abbildung 2: Eingangsströme einer 5W Lampe für verschiedene Klemmspannungen

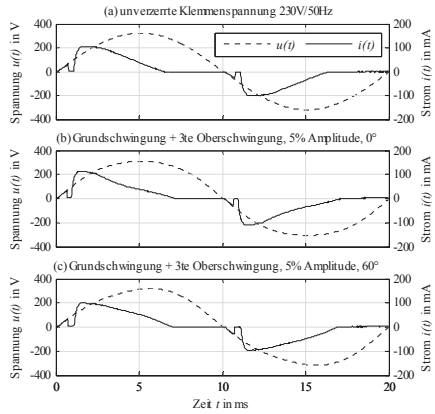


Abbildung 3: Eingangsströme einer 8W Lampe für verschiedene Klemmspannungen

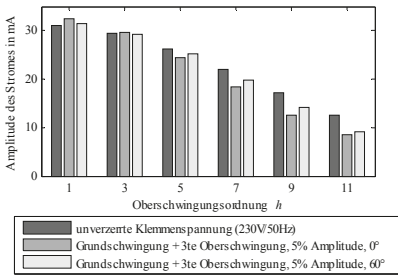


Abbildung 4: Amplitudenspektren der Eingangsströme einer 5W Lampe für verschiedene Klemmspannungen

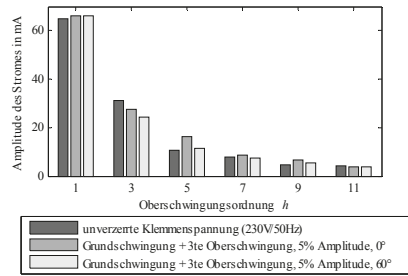


Abbildung 5: Amplitudenspektren der Eingangsströme einer 8W Lampe für verschiedene Klemmspannungen

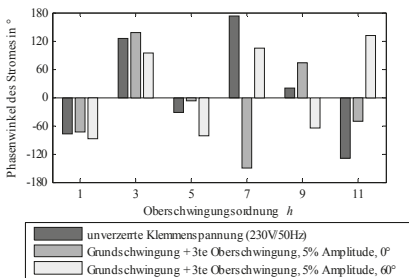


Abbildung 6: Phasenspektren der Eingangsströme einer 5W Lampe für verschiedene Klemmspannungen

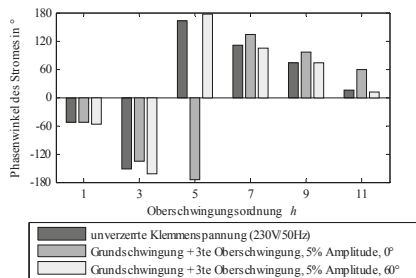


Abbildung 7: Phasenspektren der Eingangsströme einer 8W Lampe für verschiedene Klemmspannungen

Alle Matrizen werden auf die ungeraden Oberschwungungen reduziert, da der Einfluss der geradzahigen Oberschwungungen vergleichsweise gering ist. Jede Spalte einer Admittanz-Matrix spiegelt den Einfluss der entsprechenden Spannungsharmonischen wieder. Da die Grundschwungung konstant gehalten wird, ist die erste Spalte identisch. Alle übrigen Spalten verdeutlichen die hohe Nichtlinearität der Lampen.

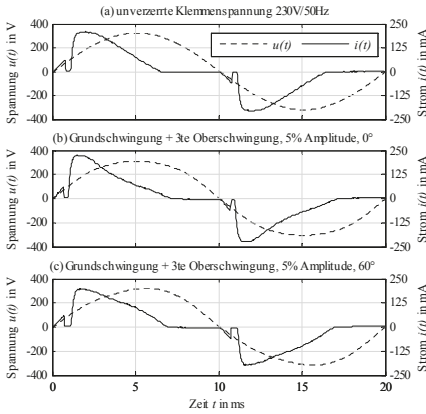


Abbildung 8: Eingangsströme zweier parallel betriebener 8W Lampen für verschiedene Klemmspannungen

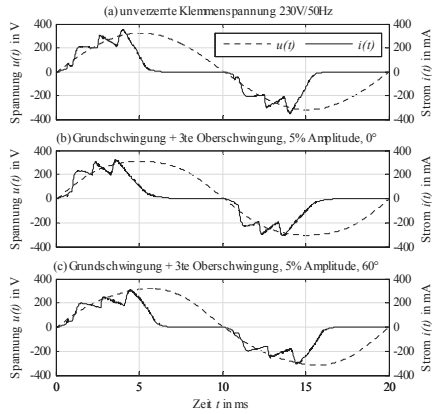


Abbildung 9: Eingangsströme bei Parallelbetrieb von 5 Lampen 3W - 8W für verschiedene Klemmspannungen

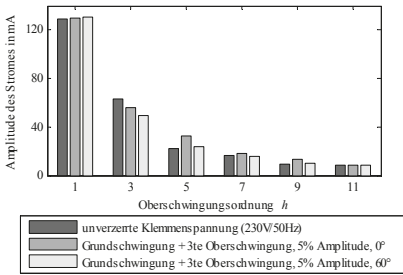


Abbildung 10: Amplitudenspektrum der Eingangsströme zweier parallel betriebener 8W Lampen für verschiedene Klemmspannungen

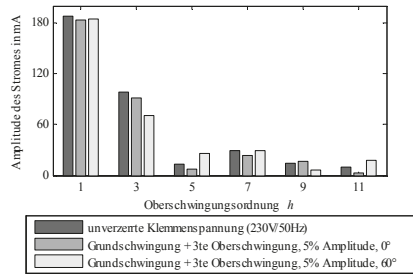


Abbildung 11: Amplitudenspektrum der Eingangsströme bei Parallelbetrieb von 5 Lampen 3W - 8W für verschiedene Klemmspannungen

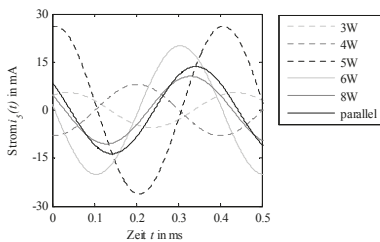


Abbildung 12: Oberschwungströme fünfter Ordnung für einzelne LED Lampen 3W-8W und für Parallel-schaltung der gleichen Lampen

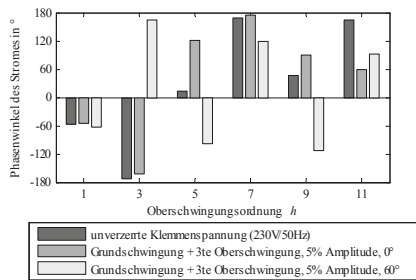


Abbildung 13: Phasenspektrum der Eingangsströme bei Parallelbetrieb von 5 Lampen 3W - 8W für verschiedene Klemmspannungen

$$\underline{Y}_{SW, 5\%, 0^\circ} = \begin{bmatrix} 0.1572+0.1263i & -0.2098+0.0177 & -0.0886-0.0104i & -0.0499-0.2350i & -0.1505-0.1210i & -0.0571-0.2288i \\ 0.0478-0.0841i & 0.2688+0.4877i & -0.1686-0.1077 & -0.0635+0.0713i & 0.0304-0.0412i & -0.1231+0.0409i \\ -0.0083-0.0316i & 0.2656-0.3653i & 0.1492+0.5375i & -0.5496-0.4014i & 0.0080-0.0801i & -0.1205-0.2614i \\ -0.0224-0.0097i & 0.0109-0.1781i & 0.2652-0.4310i & 0.2111+0.9958i & -0.6534-0.2629i & -0.0564+0.1291i \\ -0.0134+0.0033i & -0.1541-0.0745i & -0.0888-0.0157i & 0.2084-0.3897i & 0.3196+1.0925i & -0.7813-0.0164i \\ -0.0041+0.0122i & -0.1017-0.0328i & -0.1434-0.1090i & 0.0573+0.0029i & 0.3826-0.4886i & 0.7552-1.2698i \end{bmatrix} \mathbf{S} \quad (4)$$

$$\underline{Y}_{8W, 5\%, 60^\circ} = \begin{bmatrix} 0.1572+0.163i & -0.1882-0.2078i & -0.0540+0.0831i & -0.1669-0.2447i & -0.1473-0.1800i & -0.0929-0.1187i \\ 0.0478-0.0841i & -0.0803+0.4622i & -0.3115-0.2519i & 0.2183+0.1535i & -0.1025+0.0423i & -0.1506+0.1270i \\ -0.0083-0.0316i & -0.0068-0.1329i & 0.1034+0.6489i & -0.6289-0.0785i & -0.228+0.1626i & -0.1082-0.0380i \\ -0.0224-0.0097i & 0.0563+0.1223i & 0.2243-0.3210i & 0.4007+1.1564i & -0.4620-0.1209i & 0.1875+0.2271i \\ -0.0134+0.0033i & 0.0889+0.0937i & 0.0276-0.0108i & 0.5300-0.3936i & 0.7115+1.2549i & -0.4975-0.1134i \\ -0.0041+0.0122i & 0.1104-0.0670i & -0.0853-0.0811i & 0.2272-0.1776i & 0.4580-0.7084i & 0.8277+1.0174i \end{bmatrix} \quad (5)$$

Da die Eingangsströme für die verschiedenen Phasenverschiebungen der Oberschwingungsspannungen voneinander abweichen, verändern sich die Matrizen-Elemente nicht nur in der Amplitude, sondern auch in der Phasenlage. Um das Frequenz-Kopplungs-Modell angemessen zu parametrieren, ist es notwendig, eine passende Zahl von Arbeitspunkten auszuwählen, um ein Gleichgewicht zwischen Aufwand und Nutzen zu gewährleisten [4].

4.2 Parallelbetrieb mehrerer Lampen

Zur Verwendung von Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrix-Modellen für Oberschwingungsanalysen in größeren Netzwerken mit hohen Zahlen nichtlinearer Betriebsmittel ist es notwendig, zu untersuchen, inwiefern sie Dämpfungs- und Diversitätseffekte abbilden. Daher werden zwei 8W Lampen parallel geschaltet und unter den gleichen Bedingungen getestet, wie die einzelnen Lampen. Beispiele für Admittanz-Matrizen als Ergebnis der Messungen sind in Gleichung (6) und (8) gezeigt. Wiederum ist erkennbar, dass der Einfluss der Grundschwingung gleich bleibt und die erste Spalte in beiden Matrizen identisch ist, wohingegen die unterschiedlichen Phasenwinkel der Oberschwingungen unterschiedliches Verhalten verursachen.

Um zu testen, ob es ausreichend ist, Kenntnis über die Admittanz-Matrizen einer Lampe zu haben, um auch das Verhalten mehrerer Lampen in Parallelschaltung vorhersagen zu können, werden die Admittanz-Matrizen als Summe der Matrizen für die einzelnen 8W Lampen berechnet. Die Ergebnisse zeigen die Gleichungen (7) und (9). Der Vergleich der jeweils messtechnisch bestimmten und der berechneten Matrix zeigt: Die Beträge der meisten Elemente weichen um maximal 5% voneinander ab. Lediglich für einige wenige Elemente beträgt die Abweichung bis zu 27%. Da das besonders für die sehr kleinen Beträge zutrifft, ist davon auszugehen, dass die begrenzte Genauigkeit der verwendeten Messgeräte eine wesentliche Ursache für die Abweichungen ist. Ähnliches gilt für die Abweichungen der Phasenwinkel. Für die Mehrheit der Matrizen-Elemente weichen die Phasenwinkel um weniger als 5% voneinander ab. In einem Fall beträgt die Abweichung mehr als 43%, jedoch handelt es sich wiederum um einen der Werte mit einem kleinen Betrag. Ähnliche Messungen und Berechnungen können auch für andere Kombinationen der untersuchten LED Lampen erzielt werden.

$$\underline{Y}_{8W, \text{parallel}, 5\%, 0^\circ, \text{gemessen}} = \begin{bmatrix} 0.3109+0.2527i & -0.0538+0.1712i & 0.0916+0.1936i & 0.2199-0.2849i & 0.0268-0.1370i & 0.1780-0.2366i \\ 0.0950-0.1706i & 0.5296+0.9985i & -0.3084-0.2200i & -0.1297+0.2071i & 0.0136-0.0743i & -0.2500+0.0603i \\ -0.0208-0.0647i & 0.6689-0.7035i & 0.5099+1.2019i & -0.9358-0.6955i & -0.0017-0.0380i & -0.0766-0.4764i \\ -0.0486-0.0177i & 0.1919-0.3738i & 0.7121-0.9223i & 0.6495+1.9312i & -1.1638-0.5422i & -0.0013+0.2525i \\ -0.0251+0.0118i & -0.3062-0.2995i & -0.1361-0.2545i & 0.3917-1.0285i & 0.7907+2.1212i & -1.5525-0.3611i \\ -0.0041+0.0265i & -0.3217-0.2118i & -0.4447-0.3633i & -0.0067-0.0990i & 0.5423-1.0806i & 1.1466+2.6018i \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\underline{Y}_{8W, \text{parallel}, 5\%, 0^\circ, \text{berechnet}} = \begin{bmatrix} 0.3067+0.2508i & -0.0819+0.1707i & 0.0897+0.1609i & 0.1894-0.2854i & 0.0084-0.1314i & 0.1623-0.2427i \\ 0.0985-0.1677i & 0.4493+0.9691i & -0.3975-0.2481i & -0.2224+0.1339i & -0.0593-0.1130i & -0.3152+0.0290i \\ -0.0193-0.0648i & 0.6142-0.7044i & 0.4211+1.1898i & -0.9559-0.7405i & -0.0292-0.0735i & -0.1366-0.4560i \\ -0.0480-0.0192i & 0.1732-0.3650i & 0.7107-0.8923i & 0.5624+1.9801i & -1.1641-0.5508i & -0.0110+0.2592i \\ -0.0260-0.0102i & -0.2805-0.2738i & -0.1286-0.2391i & 0.4407-0.9709i & 0.7198+2.1528i & -1.5619-0.2263i \\ -0.0060+0.0256i & -0.2840-0.1813i & -0.3880-0.3455i & 0.0161-0.1060i & 0.6235-1.0458i & 1.3526+2.5090i \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\underline{Y}_{8W, \text{parallel}, 5\%, 60^\circ, \text{gemessen}} = \begin{bmatrix} 0.3109+0.2527i & -0.0551+0.6585i & 0.1835+0.0001i & 0.0323-0.5929i & 0.0598-0.4663i & 0.1820-0.2163i \\ 0.0950-0.1706i & -0.1633+0.9591i & -0.6233-0.4938i & -0.4379+0.3239i & -0.1951+0.1171i & -0.3037+0.2233i \\ -0.0208-0.0647i & 0.1018-0.3534i & 0.4326+1.2956i & -1.1111-0.2730i & -0.3788+0.3404i & -0.0327-0.1335i \\ -0.0486-0.0177i & 0.1587+0.01040i & 0.4067-0.7993i & 0.7837+2.1920i & -0.8336-0.3885i & 0.3926+0.3790i \\ -0.0251+0.0118i & -0.0080-0.1050i & -0.0917-0.1576i & 0.8749-0.8702i & 1.3199+2.4667i & -1.1081-0.4725i \\ -0.0041+0.0265i & 0.0449-0.0843i & -0.3131-0.0913i & 0.3046-0.2297i & 0.7088-1.4202i & 1.3051+2.2317i \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\underline{Y}_{\text{SW,parallel, 5\%, 60\%, berechnet}} = \begin{bmatrix} 0.3067+0.2508i & -0.0757-0.5983i & 0.1623+0.0092i & 0.0133-0.5765i & 0.0385-0.4548i & 0.1572-0.2543i \\ 0.0985-0.1677i & -0.2147-0.9863i & -0.6705-0.4606i & -0.5284+0.3188i & -0.2880+0.1216i & -0.3889+0.2394i \\ -0.0193-0.0648i & 0.0797-0.3308i & 0.3527+1.3133i & -1.1399-0.2500i & -0.4043+0.3193i & -0.0922-0.1083i \\ -0.0480-0.0648i & 0.1559+0.0993i & 0.4506-0.7793i & 0.8026+2.2073i & -0.8334-0.3568i & 0.4195+0.3657i \\ -0.0260+0.0102i & 0.0217+0.1071i & -0.0638-0.1742i & 0.8977-0.8749i & 1.3468+2.4556i & -1.1218-0.3664i \\ -0.0060+0.0256i & 0.0780-0.0739i & -0.2643-0.1159i & 0.3241-0.2833i & 0.7499-1.4333i & 1.5081+2.1089i \end{bmatrix} \quad (9)$$

5 Diskussion

Frequenz-Kopplungs-Admittanz-Matrizen können für eine größere Anzahl von Betriebsmitteln, die mit der gleichen Netzimpedanz verbunden sind, verwendet werden. Da sie sowohl Informationen über die Amplituden als auch über die Phasenwinkel enthalten, werden mögliche Dämpfungs- und Diversitätseffekte berücksichtigt, ohne direkt Dämpfungs- und Diversitätsfaktoren ausrechnen zu müssen. Weitere Untersuchungen müssen zeigen, inwieweit die Effekte großer Zahlen im Netz verteilter Oberschwingungserzeuger analysiert werden können.

Die untersuchten Lampen zeigen ein breites Spektrum an erzeugten Oberschwingungsströmen sowohl bezüglich der Oberschwingungsordnung als auch der Phasenwinkel. Für Betriebsmittel höherer Leistung >25W, u.a. LED Lampen, werden in der DIN EN 61000-3-2 [8] Grenzwerte für Oberschwingungsströme angegeben. Das führt zu ähnlicheren Eingangsströmen der unterschiedlichen Betriebsmittel, was wiederum eine Reduktion der Diversitätseffekte zur Folge hat. Eine Ausweitung der Grenzwerte auf den Leistungsbereich <25W hätte mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Verstärkung einzelner Oberschwingungsordnungen zur Folge.

6 Literatur

- [1] A. Mansoor, W.M. Grady, A.H. Chowdhury, M.J. Samotyj, "An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 467-473
- [2] M. Fauri, "Harmonic modelling of non-linear load by means of crossed frequency admittance matrix", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, No. 4, November 1997, pp. 1632-1638
- [3] L.P. Frater, A.R. Wood, N.R. Watson, "Linearisation of non-linear loads by phase dependent frequency coupling matrices", in Proc. 16th PSCC, Glasgow, Scotland, July 14-18, 2008
- [4] Anke Froebel, Ralf Vick, "Performance analysis for non-linear load modelling with frequency coupling admittance matrices", in Proc. 23rd International Conference and Exhibition on Electricity Distribution CIRED, Lyon, France, June 15-18, 2015
- [5] E.E. Ahmed, W. Xu, G. Zhang, "Analyzing systems with distributed harmonic sources including the attenuation and diversity effects", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 4, October 2005, pp. 2602-2612
- [6] A. Mansoor, W.M. Grady, P.T. Stats, R.S. Thallam, M.T. Doyle, M.J. Samotyj, "Predicting net harmonic currents produced by large number of distributed single-phase computer loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, October 1995, pp. 2001 – 2006
- [7] M.J.H. Rawa, D.W.P. Thomas, M. Sumner, "Harmonics attenuation of nonlinear loads due to linear loads", Proceedings of Asia-Pacific Symposium on EMC, Singapore, 2012, pp. 829-832
- [8] Norm DIN EN 61000-3-2:2015-03: Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) - Teil 3-2: Grenzwerte - Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom <= 16 A je Leiter) (IEC 61000-3-2:2014); Deutsche Fassung EN 61000-3-2:2014