

**Oberschwingungsbelastung
in öffentlichen elektrischen
Energieversorgungsnetzen
durch elektronische Massen-
geräte kleiner Leistung**

Mai 2012

Oberschwingungsbelastung in öffentlichen elektrischen Energieversorgungsnetzen durch elektronische Massengeräte kleiner Leistung

Mai 2012

© Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN)
Bismarckstr. 33, 10625 Berlin
Telefon: + 49 (0) 30 3838687 0
Fax: + 49 (0) 30 3838687 7
E-Mail: fnn@vde.com
Internet: www.vde.com/fnn

Inhaltsverzeichnis

1	Hintergrund	3
2	Messsystem	4
3	Messergebnisse	5
3.1	Kompaktleuchtstofflampen (CFL).....	6
3.2	LED-Lampen (SSL).....	7
3.3	Elektronische Geräte (EG).....	8
4	Überlagerung	11
5	Vereinfachte Abschätzung der Auswirkungen im Netz	13
6	Zusammenfassung	15
7	Ausblick	16
8	Literaturverzeichnis	17

Bildverzeichnis

Bild 2-1	Aufbau des Messsystems.....	4
Bild 3-1	Beispiel für die graphische Darstellung in der komplexen Ebene	5
Bild 3-2	5. Stromharmonische für CFL (Farblegende siehe Tabelle 3-1)	6
Bild 3-3	5. Stromharmonische für SSL (Farblegende siehe Tabelle 3-2)	7
Bild 3-4	THDi/Pr Verhältnis der gemessenen elektronischen Geräte.....	8
Bild 3-6	5. Stromharmonische für elektronische Geräte (Farblegende siehe Tabelle 3-3)	10
Bild 4-1	5. Stromharmonische aller untersuchten Geräte.....	11
Bild 4-2	Vektoren der 5. Stromharmonischen für drei verschiedene Netzteile, welche die Entwicklung der Netzteiltechnologie über die letzten 10 Jahre repräsentieren.....	12
Bild 5-1	Vergleich der 5. Stromharmonischen für Hoch- und Niedriglastzeiten an einem Samstag in einem städtischen Niederspannungsnetz heute und vor 11 Jahren	13

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1	Gemessene CFL.....	6
Tabelle 3-2	Gemessene SSL.....	7
Tabelle 3-3	Gemessene elektronische Geräte	8
Tabelle 4-1	Überlagerung von CFL mit verschiedenen Schaltungstechnologien	12

Abkürzungsverzeichnis

ISL	Glühlampe
CFL	Kompaktleuchtstofflampe
SSL	LED-Lampe
EG	Elektronische Geräte
EUT	Prüfling
ESL	Energiesparlampe
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE

1 Hintergrund

Aufgrund politischer Rahmenbedingungen wird die Glühlampe schrittweise durch moderne Energiesparlampen ersetzt. Im Vergleich zur Glühlampe emittieren moderne Lampen auf Basis elektronischer Vorschaltgeräte (Kompaktleuchtstofflampe, LED-Lampe) Oberschwingungen. Die Grenzwerte der Oberschwingungsströme für diese Lampen sind in EN 61000-3-2 vorgegeben und wurden unter bestimmten Annahmen festgelegt. Eine dieser Annahmen ist eine effektive Kompensation zwischen den Oberschwingungsströmen von Energiesparlampen und anderen elektronischen Geräten, wie beispielsweise Fernsehern oder Computern.

Die ersten CFL mit integriertem elektronischen Vorschaltgerät wurden im Jahre 1985 verkauft. Während der letzten 25 Jahre wurden eine Vielzahl von Simulationsstudien vorgestellt, welchen den möglichen Einfluss eines Masseneinsatzes dieser Lampen auf die Spannungsverzerrung im Niederspannungsnetz untersuchten. Die Ergebnisse dieser Studien variieren deutlich und reichen von positiven bis hin zu stark negativen Auswirkungen [1, 2]. Die Ergebnisse der Studien sind stark von den getroffenen Annahmen und benutzten Modellen abhängig.

Verschiedene Langzeitmessungen niederfrequenter Harmonischer in öffentlichen Niederspannungsnetzen haben einen stabilen oder leicht sinkenden Pegel der 5. Spannungsharmonischen während der letzten Jahre gezeigt. Messungen, die unmittelbar vor und nach Austausch einer größeren Zahl von ISL durch CFL erfolgten haben keinen signifikanten Einfluss gezeigt [3, 4]. Allerdings sind auch einzelne Fälle bekannt, bei denen nach vollständigem Austausch der ISL durch CFL Probleme auftraten (z.B. Hotels oder Altersheime).

Die Ergebnisse der genannten Simulationen und Messungen zeigen, dass die Beeinflussung der Spannungsverzerrung durch moderne Lampen mit elektronischen Vorschaltgeräten eine sehr komplexe Thematik darstellt, für welche einheitliche Schlussfolgerungen schwierig zu finden sind.

Vor diesem Hintergrund hat das Forum Netztechnik/Netzbetrieb im VDE (FNN) eine Studie bei der TU Dresden in Auftrag gegeben, in der erstmals in einem realitätsnahen Szenario die Kompensationseffekte beim gleichzeitigen Betrieb von modernen Energiesparlampen mit Haushaltsgeräten geringer Leistung untersucht wurde.

Der vorliegende technische Hinweis untersucht die Effektivität des Kompensationseffektes für aktuelle am Markt verfügbare Energiesparlampen und typische elektronische Kleingeräte für den Massenmarkt. Dazu werden die Oberschwingungsströme von ca. 100 Energiesparlampen (Kompaktleuchtstofflampen, LED-Lampen) und 50 weiteren elektronischen Geräten, hauptsächlich mit Leistungen kleiner 75 W, analysiert. Der Kompensationseffekt wird am Beispiel der 5. Stromharmonischen für verschiedene Szenarien diskutiert und mit Messungen aus einem öffentlichen Niederspannungsnetz verglichen.

Für die Messungen im Labor wurde ein vollständig automatisiertes Messsystem zur reproduzierbaren Erfassung der Strom Oberschwingungen von Geräten mit Bemessungsströmen kleiner 16 A entwickelt. Alle Auswertungen in diesem Beitrag basieren auf einer sinusförmigen Versorgungsspannung mit $U_n = 230 \text{ V} / 50 \text{ Hz}$.

2 Messsystem

Der Schwerpunkt der Studie lag auf der 3. und 5. Stromharmonischen, da diese derzeit die höchste Bedeutung bei den niederfrequenten Oberschwingungen haben. Untersucht wurden die Kompensationseffekte für eine große Zahl aktuell am Markt erhältlicher Lampen und haushaltstypischer Massengeräte kleiner Leistung. Insgesamt wurden 109 Energiesparlampen und 61 elektronische Geräte getestet. Bei den Lampen handelte es sich um 97 Kompaktleuchtstofflampen (CFL) und 12 LED-Lampen (SSL). Es wurden nur Lampen mit bis zu 25 W berücksichtigt, da Lampen mit höherer Leistung aufgrund der normativen Randbedingungen wesentlich strengere Grenzwerte erfüllen müssen. Bei den Geräten wurden z.B. Computer, Monitore sowie alle Arten von externen Netzteilen (wie Router, Telefonbasisstationen, Digitalkameras, Mobiltelefone usw.) getestet. Besonders interessant waren dabei Geräte mit Leistungen etwas unter 75 W, da hier aufgrund der Freistellung von Grenzwerten mit einfachen Schaltungen und damit mit hohen Stromverzerrungen zu rechnen war. Die Geräte und Lampen wurden mit dem Ziel einer möglichst guten Repräsentativität für Haushalte und Büros ausgewählt. Der Aufbau des Messsystems ist in Bild 2-1 dargestellt.

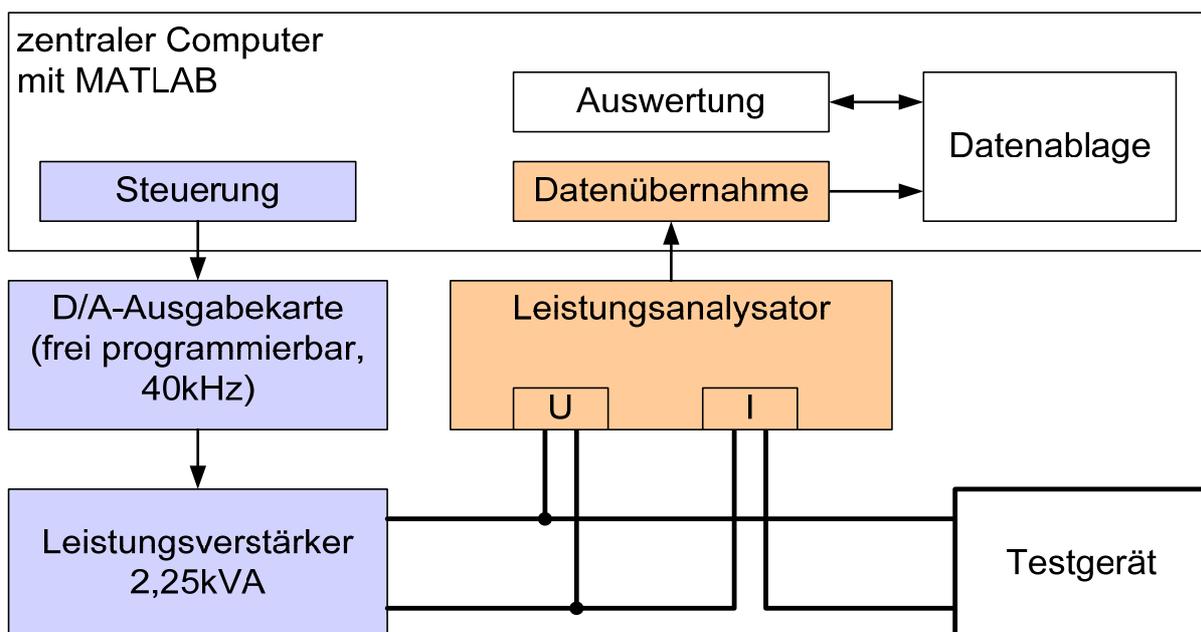


Bild 2-1 Aufbau des Messsystems

3 Messergebnisse

Für die Bewertung des Kompensationseffektes einzelner Harmonischer wird die Darstellung in der komplexen Ebene benutzt, wobei jeder Wert nur durch einen Kreis und nicht durch den kompletten Vektor dargestellt wird. (Bild 3-1).

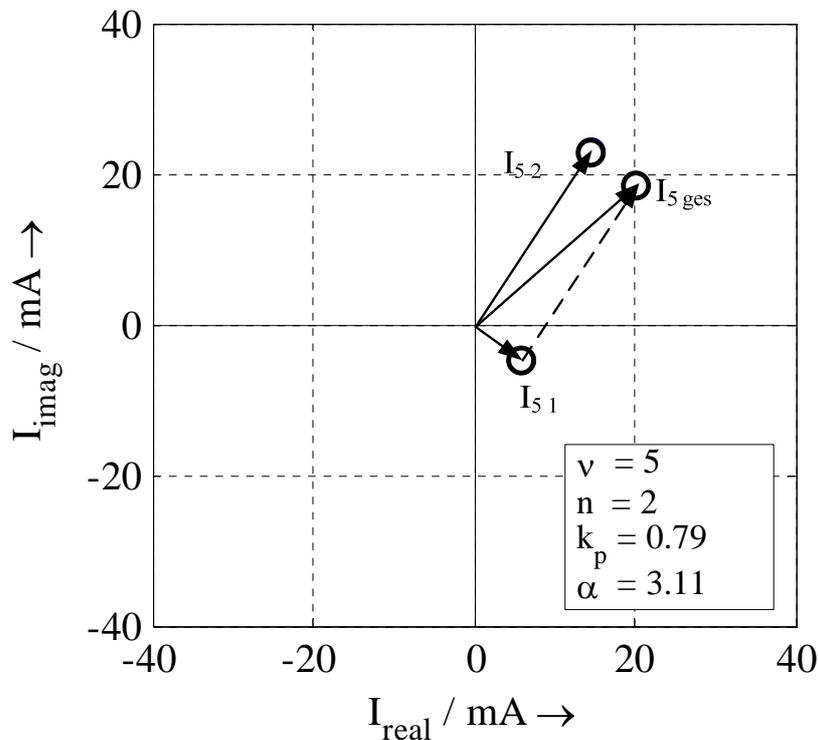


Bild 3-1 Beispiel für die graphische Darstellung in der komplexen Ebene

Zur Bewertung des Kompensationseffektes werden folgende gebräuchliche Kenngrößen berechnet:

(1) Summationsexponent $\alpha^{(v)}$: $|\sum \underline{I}_i^{(v)}|^{\alpha^{(v)}} = \sum |\underline{I}_i^{(v)}|^{\alpha^{(v)}}$

(2) Gleichphasigkeitsfaktor $k_p^{(v)} = \frac{|\sum \underline{I}_i^{(v)}|}{\sum |\underline{I}_i^{(v)}|}$

Die Kenngrößen werden jeweils im rechten unteren Teil des Diagramms dargestellt. Zusätzlich werden die Anzahl der EUTs und die Oberschwingungsordnung v angegeben.

Der Summationsexponent α wird u.a. in verschiedenen Normen verwendet (z.B. IEC 61000-3-6). Er kann jedoch bei einer geringen Zahl an EUTs und einer guten Kompensation sehr schnell hohe, schwer interpretierbare Werte annehmen. Deshalb wird für die Auswertungen im Rahmen dieses Beitrages der Gleichphasigkeitsfaktor verwendet. Er repräsentiert das Verhältnis zwischen dem Betrag der Vektorsumme und Summe der Beträge (arithmetische Summe). Sein Wertebereich beträgt $0 \leq k_p \leq 1$, wobei $k_p = 0$ beste Kompensation (Auslöschung) und $k_p = 1$ keine Kompensation bedeuten. Der

Gleichphasigkeitsfaktor $k_p = 0,79$ in Bild 3-1 bedeutet, dass der Betrag der Vektorsumme 79% der arithmetischen Summe beträgt, also 21% kleiner ist.

3.1 Kompaktleuchtstofflampen (CFL)

Tabelle 3-1 zeigt eine Übersicht der gemessenen CFL.

Tabelle 3-1 Gemessene CFL

Leistungsbereich	Anzahl	Farbe in Bild 3-2
$P_r \leq 5 \text{ W}$	4	schwarz
$5 \text{ W} < P_r \leq 11 \text{ W}$	48	rot
$11 \text{ W} < P_r \leq 20 \text{ W}$	7	grün
$20 \text{ W} < P_r \leq 25 \text{ W}$	12	blau
$P_r > 25 \text{ W}$	3	nicht dargestellt

Die CFL wurden zufällig ausgewählt und anonym in Supermärkten, Elektronikgeschäften oder per Versand gekauft. Die Stichprobe enthält sowohl Markenprodukte als auch „No-Name“-Produkte und stellt einen guten Querschnitt für den deutschen Markt dar. Die meisten CFL haben eine Leistung von 11 W, was im Hinblick auf die Lichtausbeute in etwa einer 60-W-Glühlampe entspricht.

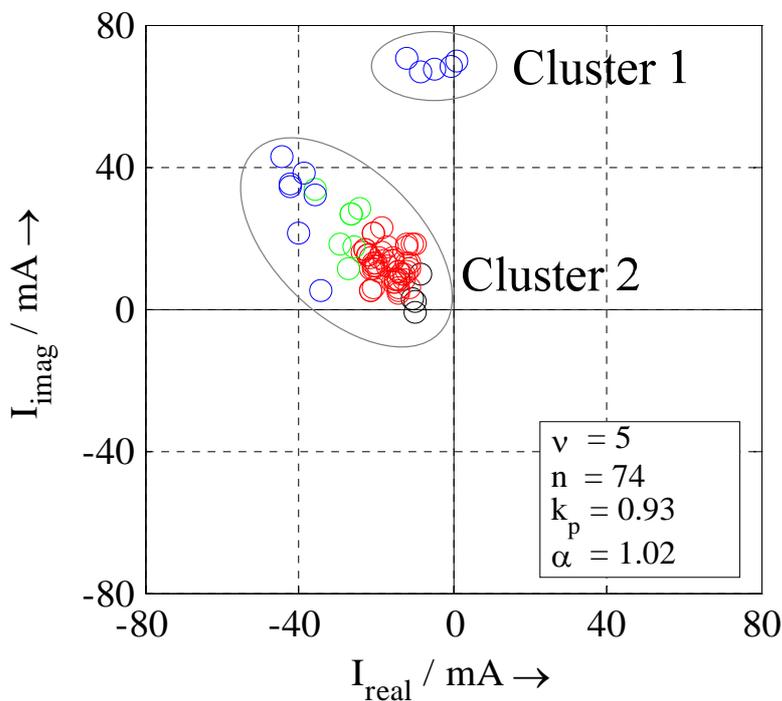


Bild 3-2 5. Stromharmonische für CFL (Farblegende siehe Tabelle 3-1)

Bild 3-2 zeigt zwei deutlich voneinander zu unterscheidende Gruppen, welche mit hoher Wahrscheinlichkeit durch Unterschiede in der Eingangsschaltungen bedingt sind. Die Gleichphasigkeit

aller 74 CFL ist mit $k_p = 0.93$ sehr hoch und bedeutet, dass praktisch keine Kompensation der 5. Stromharmonischen zwischen den CFL auftritt. Gleiches gilt auch für die 3. Stromharmonische. Dieses Ergebnis wird auch durch andere Untersuchungen bestätigt [5].

3.2 LED-Lampen (SSL)

Insgesamt wurden elf verschiedene SSL gemessen (siehe Tabelle 3-2).

Tabelle 3-2 Gemessene SSL

Leistung	Anzahl	Farbe in Bild 3-3
$P_r \leq 5 \text{ W}$	7	schwarz
$P_r > 5 \text{ W}$	4	rot

Aufgrund der geringeren Anzahl und der rasante Entwicklung auf dem Gebiet der SSL ist die Auswahl an SSL etwas weniger repräsentativ. Ein wichtiges Ergebnis ist jedoch die im Vergleich zu den CFL deutlich geringere Gleichphasigkeit, was eine günstigere Kompensation der 5. Stromharmonischen bei SSL bedeutet (Bild 3-3).

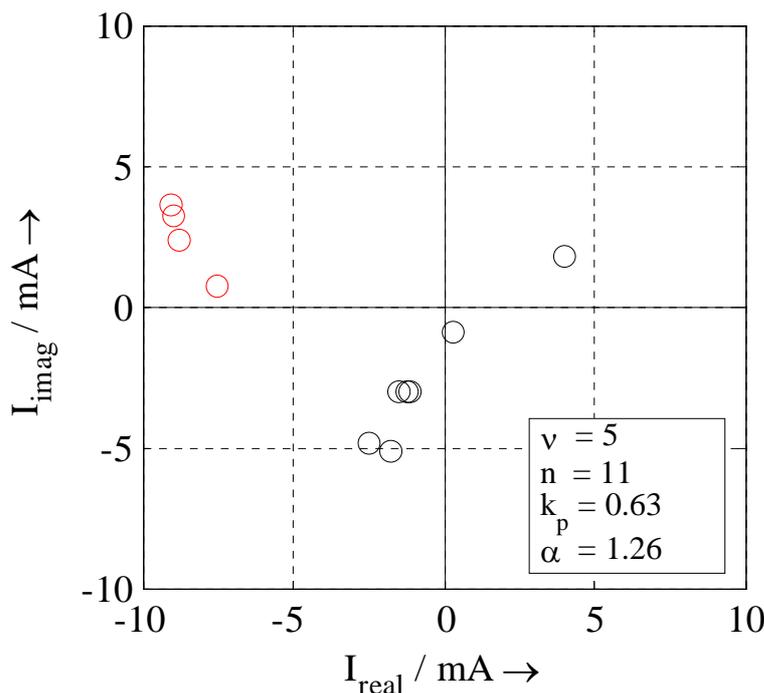


Bild 3-3 5. Stromharmonische für SSL (Farblegende siehe Tabelle 3-2)

Eine mögliche Ursache für die bessere Winkeldiversität kann die größere Zahl unterschiedlicher Eingangsschaltungen und damit unterschiedlicher Stromkurvenformen sein. Es ist jedoch nicht auszuschließen, dass zukünftig einzelne besonders effektive Eingangsschaltungen dominieren, was zu einer höheren Gleichphasigkeit führen könnte.

3.3 Elektronische Geräte (EG)

Tabelle 3-3 zeigt eine Übersicht der elektronischen Geräte, welche in fünf Gruppen eingeteilt sind.

Tabelle 3-3 Gemessene elektronische Geräte

Gruppe	Anzahl	Farbe in Bildern 3-4, 3-5 und 3-6
A Bürogeräte kleiner Leistung (Router, Telefonanlagen, ...)	17	schwarz
B Haushaltgeräte kleiner Leistung (Ladegeräte, Spielekonsolen, ...)	19	blau
C Notebooks	4	grün
D Computer-Monitore	6	pink
E Computernetzteile (bei Belastung mit 75 W)	16	rot

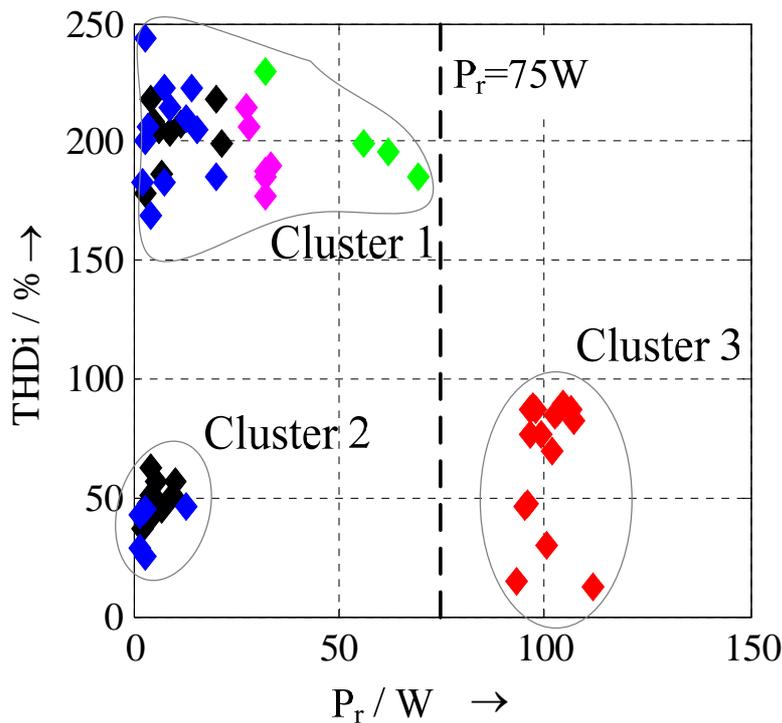


Bild 3-4 THDi/Pr Verhältnis der gemessenen elektronischen Geräte

Entsprechend dem Verhältnis aus Stromverzerrung und Geräteleistung THDi/P_r (Bild 3-4) können drei Gruppen identifiziert werden:

- (1) $P_r < 75 \text{ W}$, hoher $\text{THDi} > 150\%$
- (2) $P_r < 75 \text{ W}$, niedriger $\text{THDi} < 70\%$
- (3) $P_r > 75 \text{ W}$, moderater $\text{THDi} < 100\%$.

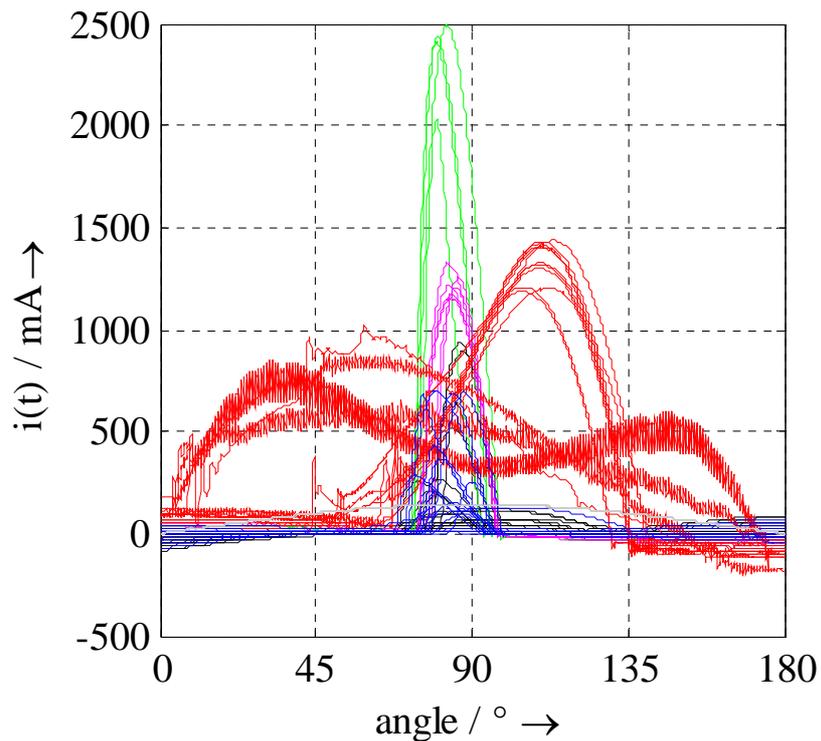


Bild 3-5 Kurvenform des Stromes der gemessenen elektronischen Geräte

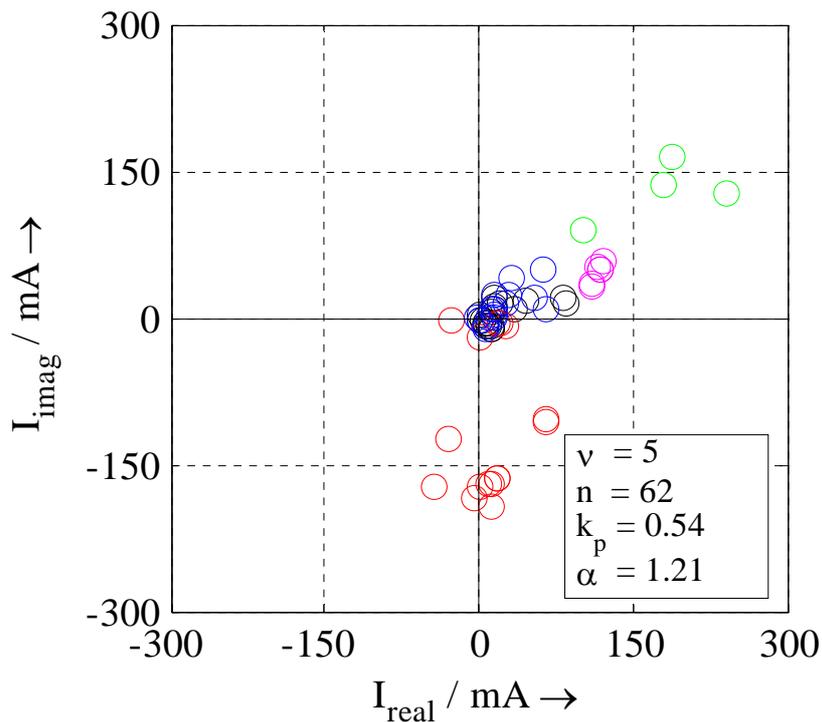


Bild 3-6 5. Stromharmonische für elektronische Geräte (Farblegende siehe Tabelle 3-3)

Bild 3-5 zeigt die Stromkurvenformen und Bild 3-6 die Lage der 5. Stromharmonischen der elektronischen Geräte in der komplexen Ebene. Die verschiedenen Gruppen aus Bild 3-4 haben verschiedene Vorzugswinkellagen. Diese werden hauptsächlich durch verschiedene Schaltungstechnologien bedingt, deren Auswahl wiederum maßgeblich auf normative Vorgaben in EN 61000-3-2 zurückgeführt werden kann. Geräte der Gruppe 1 verfügen in der Regel über eine einfache Gleichrichterschaltung ohne Leistungsfaktorkorrektur. Diese sind durch kurze Stromflusszeiten und hohe Amplituden gekennzeichnet und haben einen Vorzugswinkel von $\varphi^{(5)} \approx 40^\circ$. Schaltungen mit passiver Leistungsfaktorkorrektur weisen Vorzugswinkellagen von $\varphi^{(5)} \approx -90^\circ$ auf (Gruppe 3). Geräte der Gruppe 2, sowie Geräte mit einer aktiven Leistungsfaktorkorrektur weisen i.d.R. keine nennenswerten Amplituden der 5. Stromharmonischen auf. Der Gleichphasigkeitsfaktor $k_p = 0.54$, welcher maßgeblich durch Geräte der Gruppen 1 und 3 bestimmt wird bedeutet bereits eine gute Kompensation unter den EG selbst.

4 Überlagerung

Bild 3-6 zeigt, dass kein Vektor der 5. Stromharmonischen der untersuchten elektronischen Geräte im 2. Quadranten liegt, welcher für CFL charakteristisch ist (vgl. Bild 3-2). Die Vorzugswinkellagen für EG und CFL lassen eine effektive Kompensation für die 5. Stromharmonische vermuten.

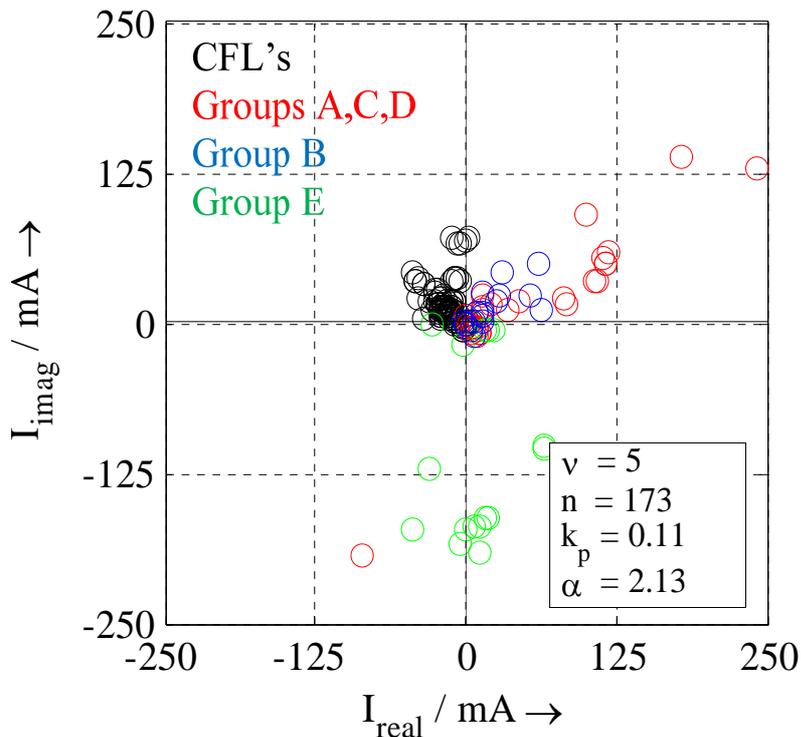


Bild 4-1 5. Stromharmonische aller untersuchten Geräte

Bild 4-1 zeigt die Überlagerung von 111 CFL mit 62 elektronischen Geräten und bestätigt die Vermutung. Die Gleichphasigkeit für diese Gerätekombination ist mit $k_p = 0,11$ sehr gering und die Kompensation somit sehr effektiv. Es zeigt aber auch, dass der Grad der Kompensation maßgeblich von Amplitude und Phasenlage der elektronischen Geräte abhängt. Änderungen der Gerätedurchmischung oder der eingesetzten Schaltungstechnologie bei den elektronischen Geräten kann signifikanten Einfluss auf die Effektivität der Kompensation haben.

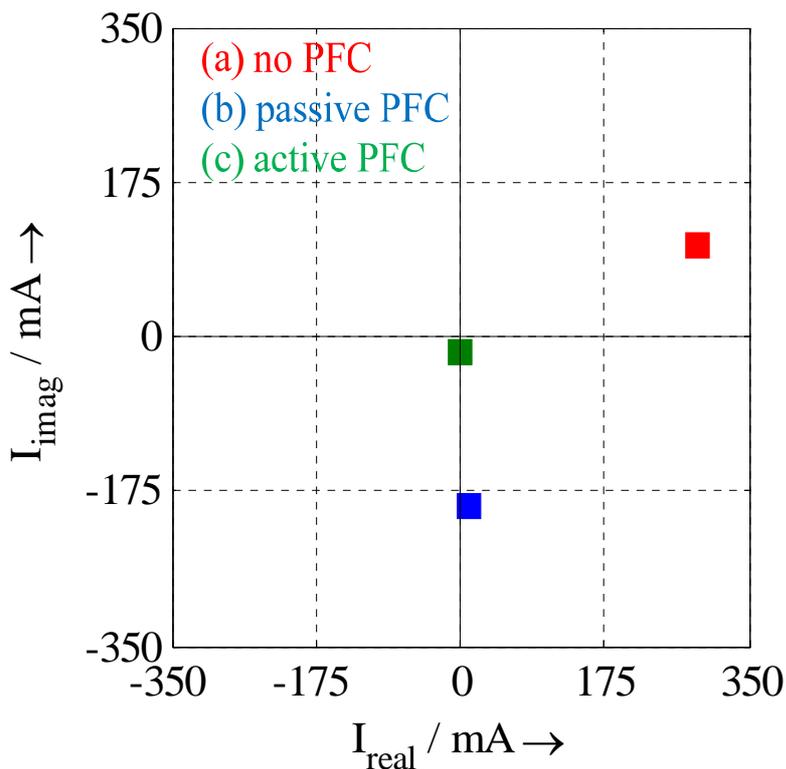


Bild 4-2 Vektoren der 5. Stromharmonischen für drei verschiedene Netzteile, welche die Entwicklung der Netzteiltechnologie über die letzten 10 Jahre repräsentieren

Zur Erläuterung dieses Sachverhaltes zeigt Bild 4-2 die Vektoren der 5. Stromharmonischen für drei verschiedene Netzteile, welche die Entwicklung der Netzteiltechnologie über die letzten 10 Jahre repräsentieren: ohne Leistungsfaktorkorrektur (nicht mehr üblich); mit passiver Leistungsfaktorkorrektur (heute üblich); mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur (zukünftig). Tabelle 4-1 zeigt die Ergebnisse der Überlagerung dieser drei Netzteile mit jeweils 6 CFL (1 x 24 W, 1 x 20 W, 1 x 15 W, 3 x 11 W). Die Ergebnisse zeigen deutliche Unterschiede, wobei die Kombination der CFL mit dem Netzteil mit passive Leistungsfaktorkorrektur, also die heutige Situation, die effektivste Kompensation zeigt. Würden neben den CFL nur Geräte mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur existieren, wäre aufgrund der sehr geringen 5. Stromharmonischen dieser Schaltungstechnologie nur eine geringe Kompensation zu erwarten. Die Bewertung der Effektivität der Kompensation ist demnach immer an bestimmte Bedingungen gebunden und kann nicht pauschal und allgemeingültig erfolgen.

Tabelle 4-1 Überlagerung von CFL mit verschiedenen Schaltungstechnologien

	k_p	α	$\text{abs}(\Sigma I)$	$\text{arg}(\Sigma I)$
(a): no PFC	0.49	>10	253 mA	63°
(b): pass. PFC	0.43	>10	174 mA	-157°
(c): act. PFC	0.88	1.07	202 mA	148°

5 Vereinfachte Abschätzung der Auswirkungen im Netz

Eine erste, stark vereinfachte Abschätzung erfolgt basierend auf einem typischen städtischen Niederspannungsnetz, welches eine Mehrfamilienhausstruktur versorgt (400 kVA-Transformator, 6 Abgänge, 192 Wohneinheiten). Es wird angenommen, dass in jeder Wohneinheit 5 CFL gleichzeitig in Betrieb sind und die Hälfte aller Lampen auf Grund der Installationspraxis am gleichen Leiter angeschlossen sind. Unter Vernachlässigung der Dämpfung und der Kompensationseffekte mit anderen Geräten würde der Anschluss der Lampen die 5. Spannungsharmonische an der NS-Sammelschiene des Transformators um ca. 0,855 erhöhen. Um eine erfolgreiche Koordination zwischen den Spannungsebenen zu gewährleisten, ist der zulässige Gesamteintrag im Niederspannungsnetz auf 1,5% zu begrenzen. Dies würde bedeuten, dass basierend auf der Transformator-Bemessungsleistung lediglich 6% der anschließbaren Last für ca. 50% des verfügbaren Gesamteintrages verantwortlich sind. Die vereinfachte Abschätzung zeigt, dass eine gute Kompensation zwischen den unterschiedlichen Geräten neben der geeigneten Begrenzung der Aussendung durch normative Grenzwerte ein wichtiges Instrument beim effektiven Management der Stromharmonischen im Niederspannungsnetz darstellt.

Die Veränderung der 5. Stromharmonischen über die letzten 10 Jahre wurde dem oben verwendeten Beispielnetz untersucht, welches im betrachteten Zeitraum in Netz- und Abnehmerstruktur praktisch unverändert blieb. Im betrachteten Netz wurden die Stromharmonischen nach Betrag und Phase auf der NS-Seite des Transformators in den Jahren 1999 und 2010 gemessen (Bild 5-1).

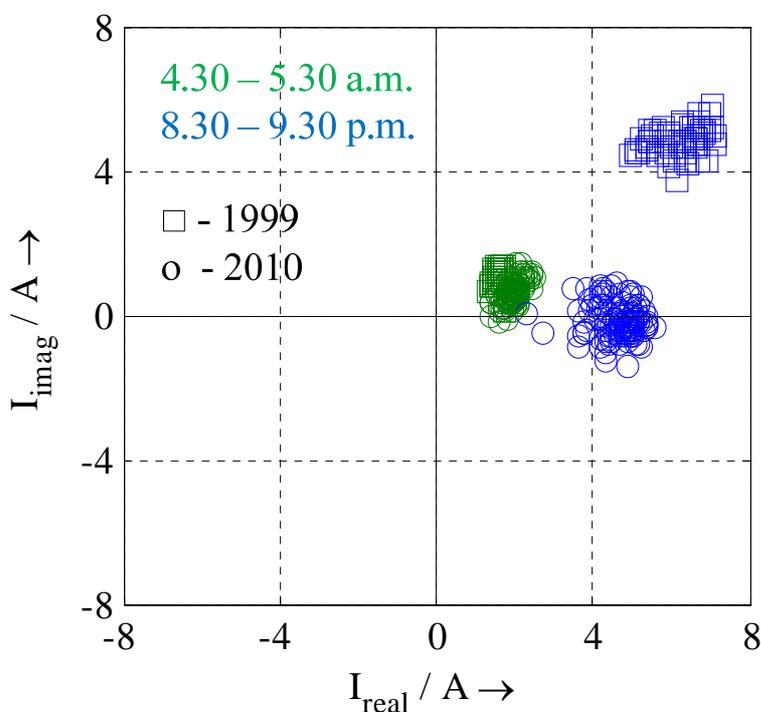


Bild 5-1 Vergleich der 5. Stromharmonischen für Hoch- und Niedriglastzeiten an einem Samstag in einem städtischen Niederspannungsnetz heute und vor 11 Jahren

Während Bild 5-1 praktisch keine Unterschiede für den Zeitbereich schwacher Last (grün) zeigt, ist für den Bereich starker Last („Fernsehzeit“) ein unterschiedliches Verhalten zu erkennen. Die Amplitude hat sich im Vergleich zu 1999 reduziert und der Winkel um ca. -45° gedreht. Ein möglicher Grund kann die Zunahme von Geräten mit passiver Leistungsfaktorkorrektur sein. Diese haben gegenüber den Geräten ohne PFC eine geringere Störaussendung und führen in Kombination mit den Geräten ohne PFC zu einer verbesserten Kompensationswirkung.

Aufgrund der nahezu entgegengesetzten Lage im Vergleich zu CFL (vgl. Bild 3-2) ist für dieses konkrete Niederspannungsnetz speziell für die 5. Stromharmonische ein positiver Einfluss bei zunehmender Zahl von CFL zu erwarten. Eine Verallgemeinerung dieser Aussage ist aufgrund des einzelnen Beispiels nicht möglich. Insbesondere wenn nur geringe Pegel der 5. Stromharmonischen im Netz vorhanden sind, oder diese bereits im 2. Quadranten liegen, muss mit einer Erhöhung der 5. Stromharmonischen bei dem vermehrten Einsatz von CFL in diesem Netz gerechnet werden.

Im Rahmen weiterer Arbeiten, welche einen wichtigen Beitrag zur internationalen Normung darstellen, wird an belastbareren Aussagen gearbeitet.

6 Zusammenfassung

Kompensationseffekte für Oberschwingungsströme haben einen signifikanten Einfluss auf die Verzerrung der Versorgungsspannung und dürfen für realistische Simulationen nicht vernachlässigt werden. Die Effektivität der Kompensation hängt maßgeblich von der Gerätemischung sowie den verwendeten Schaltungstechnologien ab und ist somit keine konstante Größe. Die zukünftige Entwicklung kann dabei genauso positiv wie negativ beeinflusst werden.

Die Effektivität der Kompensation ist für jede Harmonische unterschiedlich. Eine gezielte, positive Beeinflussung einer Harmonischen, kann negative Einflüsse für andere Harmonische bedeuten. Insbesondere für die 3. Stromharmonische ist eine höhere Gleichphasigkeit festzustellen, so dass deren Beobachtung speziell im Hinblick auf die Neutralleiterbelastung empfohlen wird.

Eine gezielte Überwachung von Betrag und Phase der Oberschwingungsströme im öffentlichen Niederspannungsnetz kann einen wertvollen Beitrag zur frühzeitigen Erkennung einer negativen oder positiven Beeinflussung der Effektivität der Kompensation, bspw. aufgrund von Veränderungen der Gerätemischung, leisten. Fundierte Messungen können damit eine konstruktive Normungsarbeit wirksam unterstützen.

Innerhalb der nächsten 10 Jahre ist der Ersatz der Kompaktleuchtstofflampe durch die LED-Lampen sehr wahrscheinlich. Neben angemessenen Aussendungsgrenzwerten sollte im Rahmen der Normung auch die Diversität der Schaltungstechnologien als Basis einer effektiven Kompensation gezielt gefördert werden. Inwieweit die Vorgabe einer Kurvenform dafür geeignet ist, gilt es kritisch zu hinterfragen.

7 Ausblick

Vor dem Hintergrund der sich wandelnden Erzeugungs- und Laststrukturen in den NS- und MS-Netzen sollten über ein geeignetes Monitoring mögliche Netzurückwirkungen und davon ausgehende Konflikte erkannt und Anpassungserfordernisse hinsichtlich Zeitpunkt und Umfang für Normung und Vorschriftenwerk herausgearbeitet werden. Dabei sind die erforderlichen Bearbeitungsschritte gemäß der betroffenen Grenzwerte und Kenngrößen zu identifizieren. Hierzu ist eine geeignete belastbare Datenbasis zu schaffen.

Eine systematische Untersuchung möglicher Abnehmer und Netzstrukturen und deren Gerätedurchmischung für verschiedene Teilnetze, sowie die Berücksichtigung möglicher Worst-Case Szenarien (z.B. Großinstallationen) kann z.B. weitere Aussagen hinsichtlich einer Allgemeingültigkeit der Erkenntnisse der Studie liefern. Zudem sollten mögliche Resonanzeffekte durch die veränderten Geräte im Netz kritisch bewertet werden. Dies kann sowohl mit Hilfe von Simulationen als auch durch Messungen im Netz untersucht werden.

8 Literaturverzeichnis

- [1] Korovesis, P.N. et al, "Influence of Large-Scale Installation of Energy Saving Lamps on the Line Voltage Distortion of a Weak Network Supplied by Photovoltaic Station, IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 19, No. 4, October 2004
- [2] Blanco, A.M.; Parra, E.E., ICHQP, 2010, "Effects of High Penetration of CFLs and LEDs on Distribution Networks.
- [3] Ledbetter, M.; Hanzelka, Z. et al, "IFC/GEF Poland Efficient Lighting Project: Demand Side Management Pilot - Final Report", Batelle, September 1998
- [4] Ronnberg, S.K.; Wahlberg, M.; Bollen, M.H.J., ICHQP, 2010, "Harmonic emission before and after changing to LED and CFL — Part II: Field measurements for a hotel"
- [5] Koch, A.S. et al, ICHQP, 2010, "Harmonics and resonances in the low voltage grid caused by compact fluorescent lamps"

