

CHARAKTERISTIK DER STROMAUFNAHME UND NETZRÜCKWIRKUNG VON ENERGIESPARLAMPEN

DIPLOMARBEIT



Institut für Elektrische Anlagen
Technische Universität Graz

Institutsleiter
Univ.-Prof. DI Dr.techn. Lothar Fickert

Betreuer
DI Dr.techn. Ernst Schmutzer
Ao.Univ.-Prof. DI Dr.techn. Herwig Renner
DI Dr.techn. Andreas Abart
DI Christian Elbe

Autor
Johannes Ferstl

Graz / Juni - 2010



EIDESTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am 14. Juni 2010

Johannes Ferstl

Kurzfassung

Titel: Charakteristik der Stromaufnahme und Netzrückwirkung von Energiesparlampen

Schlagwörter: Energiesparlampe, ESL, KLL, Netzrückwirkung, Spannungsqualität

Richtlinien der Europäischen Union erzwingen seit September 2009 den stufenweisen Ersatz von Klarglaslampen (Glühlampen) durch Energiesparlampen (ESL). Dem positiven Argument der um den Faktor 5 größeren Energieeffizienz bei der Lichterzeugung im Vergleich zur Glühlampe steht unter anderem die mögliche Verschlechterung der Spannungsqualität in den Versorgungsnetzen gegenüber. In der folgenden Arbeit werden mit einem Simulationsmodell der Energiesparlampe und der Nachbildung eines Niederspannungsnetzes die Netzrückwirkungen von Energiesparlampen abgeschätzt. Dazu werden Messungen an einer repräsentativen Anzahl von Energiesparlampen unterschiedlicher Hersteller für die Bildung des Modells und Verständnisses des Stromaufnahmeverhaltens durchgeführt.

In vielen bisherigen Studien betreffend die Netzrückwirkung der ESL wird eine Beeinflussung der Stromaufnahme der Energiesparlampe durch die Form der Versorgungsspannung bislang nicht berücksichtigt. Der Oberschwingungsgehalt der versorgenden Spannung ist der maßgebende Faktor für die exakte Stromform. Neben der Amplitude der Harmonischen beeinflusst auch deren Phasenlage die Stromaufnahme der ESL. Eine Veränderung der Amplitude der Grundschwingung der Spannung zeigt erstaunlicherweise den geringsten Effekt.

Änderungen des Oberschwingungsgehaltes der Spannung im Niederspannungsnetz sind durch den zunehmenden Einsatz von Energiesparlampen aus den Ergebnissen der Netzsimulation zu erwarten. Dies bedeutet nicht zwangsläufig eine Erhöhung aller Oberschwingungspegel. Die derzeit dominierende 5. Harmonische zeigt sogar einen Trend nach unten. Der Oberschwingungsgehalt in den Energieversorgungsnetzen steigt jedoch nicht so stark an, dass Grenzwerte ausgeschöpft werden.

Abstract

Title: Characteristic of the Input Current and the Influence on Power Quality of Energy Saving Lamps

Keywords: Energy Saving Lamp, ESL, CFL, Power Quality

Directives of the European Union enforce the stepwise replacement of incandescent lamps by Energy Saving Lamps (ESL) since September 2009. Higher efficiency of light generation by factor 5 compared with the incandescent lamps is confronted with the possible loss of voltage quality in the mains power supply, if the use of ESLs increases.

Using the tool MATLAB, simulation models of consumer loads including ESLs and low voltage distribution grid are developed to estimate the effects on the harmonic distortion of the voltage. Measurements on a representative number of ESLs of different types and manufacturer are the basis for this simulation model and also help to get a better understanding of the input current of the ESL.

Up to now, studies don't consider the impact of the shape of the supplying voltage on the input current of the ESL. But the harmonic distortion of the supplying voltage is one of the most important factors for the accurate shape of the input current. In addition to the amplitudes of the voltage harmonics, the phase angles of the harmonics are also an important factor. However, changing the amplitude of the fundamental harmonic of the voltage has, compared to the influence of the harmonics higher order, the least effect.

Because of the increasing amount of ESL, changes in the harmonic distortion in low voltage grids are to be expected. Not all single harmonics will increase, in case of the 5th harmonic the magnitude decreases. Although the harmonic distortion of the mains power supply increases, it doesn't reach the defined limits.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
1.1	Vorbemerkung	8
1.1.1	Ökodesign-Verordnung	8
1.2	Normen für Begrenzung der Oberschwingungsemission	10
1.2.1	ÖVE/ÖNORM 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen – Abschnitt für Niederspannung.....	10
1.2.2	ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 EMV; Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte- Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter)	11
1.3	Leistung bei nichtsinusförmigen Kurvenformen von Spannung und Strom	13
1.4	Funktion der Energiesparlampe	14
1.5	Bisherige Untersuchungen und Publikationen zu den Auswirkungen von ESL.....	16
1.5.1	Netzverluste.....	16
1.5.2	Rückwirkung auf Versorgungsspannung.....	16
1.6	Ziel der Arbeit	17
2	Messung	18
2.1	Norm.....	18
	ÖVE/ÖNORM 61000-4-7 EMV; Allgemeiner Leitfaden für Messung von Oberschwingungen und Geräten in Energieversorgungsnetzen	18
2.2	Verwendetes Messgerät – DEWERACK-3016	19
2.3	Messaufbau	19
2.4	Durchführung der Messungen	20
2.5	Anmerkung zu Fourier-Transformation in MATLAB	20
2.6	Erfassung der Oberschwingungsbelastung im NS-Netz.....	21
2.7	Verwendete Energiesparlampen	24
3	Charakteristik der Stromaufnahme	25
3.1	Einschaltvorgang.....	25
3.2	Kennwerte von Energiesparlampen.....	26
3.2.1	Betrachtung 16 unterschiedlicher ESL.....	27
3.2.2	Summation von 16 Lampen	30
3.2.3	Betrachtung von 25 Lampen gleichen Typs	32
3.2.4	Summation von 25 gleichen Lampen.....	34
3.2.5	Lampenkollektiv.....	35
3.3	Einflüsse der Versorgungsspannung auf das Verhalten der Energiesparlampe	36
3.3.1	Amplitude der Versorgungsspannung.....	36

3.3.2	Amplituden der Oberschwingungen in der Versorgungsspannung.....	38
3.3.3	Überlagerung mehrerer Oberschwingungen.....	46
3.3.4	Phasenlage der Oberschwingung	50
3.4	Betrachtung der Gesamtverzerrung	51
3.4.1	Entwicklung der Stromverzerrung	53
3.4.2	Steigerung der Gesamtverzerrung der Spannung über eine Impedanz.....	56
4	Simulationsmodell	58
4.1	Mathematisches Modell für die Energiesparlampe	58
4.1.1	Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Parametersätzen.....	59
4.1.2	Simulation von unterschiedlicher Anzahl von ESL	61
4.1.3	Vergleich von Simulation und Messung anhand zweier ausgewählter Beispiele.....	62
4.2	Nachbildung eines Niederspannungsnetzes	63
4.2.1	Topologie	63
4.2.2	Impedanzen der Leitungen	65
4.2.3	Transformator.....	66
4.2.4	Speisung aus MS-Ebene	67
4.3	Nachbildung der Ersatzlast eines Hausanschlusses	67
4.3.1	Modell für B2-Gleichrichter.....	67
4.4	Evaluierung der Simulationsergebnisse und der Messung.....	69
5	Netzurückwirkung von Energiesparlampen.....	70
5.1	Erhöhung des Leistungsfaktors.....	70
5.2	Veränderung der Oberschwingungsamplituden	71
5.3	Ergebnisse anderer Studien	76
6	Zusammenfassung.....	78
7	Literaturverzeichnis.....	80
8	Anhang.....	82

Abkürzungsverzeichnis

THD	.....	Total Harmonic Distortion – Gesamtverzerrung
f	.....	Frequenz
t	.....	Zeit
v	.....	Ordnung einer Oberschwingung
U_0	.....	Gleichanteil der Spannung
I_0	.....	Gleichanteil des Stromes
U_1	.....	Effektivwert der der Grundschiwingung der Spannung
I_1	.....	Effektivwert Grundschiwingung des Stromes
U_v	.....	Effektivwert der v-ten Oberschwingung der Spannung
I_v	.....	Effektivwert der v-ten Oberschwingung des Stromes
φ_1	.....	Phasenverschiebung zwischen Grundschiwingung von Strom und Spannung
φ_v	.....	Phasenverschiebung der v-ten Oberschwingung von Strom und Spannung
P	.....	Wirkleistung
S	.....	Scheinleistung
Q	.....	Blindleistung
D	.....	Verzerrungsblindleistung
λ	.....	Leistungsfaktor
a_0	.....	Fourierkoeffizient für den Gleichanteil
b_v	.....	Fourierkoeffizient für den Oberschwinungsanteil
U_N	.....	Nennspannung des Transformators
S_T	.....	Nennscheinleistung des Transformators
P_{Cu}	.....	ohmsche Kupferverluste des Transformators
u_k	.....	Kurzschlussspannung des Transformators
u_R	.....	ohmscher Anteil der Kurzschlussspannung des Transformators
u_X	.....	induktiver Kurzschlussspannung des Transformators
Z_T	.....	Kurzschlussimpedanz des Transformators
R_T	.....	ohmscher Anteil an Kurzschlussimpedanz
X_T	.....	induktiver Anteil an Kuzschlussimpedanz
Z^0	.....	Impedanz des Nullsystems
Z^1	.....	Impedanz des Mitsystems
Z^2	.....	Impedanz des Gegensystems

1 Einleitung

1.1 Vorbemerkung

Ein zunehmendes Bewusstsein für die effizientere Nutzung von elektrischer Energie hat die Kompaktleuchtstofflampe oder Energiesparlampe (ESL) vermehrt in den Mittelpunkt öffentlicher und wissenschaftlicher Betrachtung gestellt.

In der Vergangenheit konnte sich die ESL gegenüber der herkömmlichen Glühlampe trotz des um den Faktor fünf niedrigeren Energieverbrauchs bei gleicher Lichtausbeute, aufgrund der schlechteren lichttechnischen Eigenschaften, betreffend Lichtfarbe, Farbwiedergabe, Helligkeit und Anlaufzeit nicht durchsetzen. Im Jahr 2008 lag der Marktanteil von ESL in Österreich bei 15 %. Durchschnittlich befinden sich in einem Haushalt 37 Lampen wobei von diesen noch 19 Stück (51 %) Glühlampen konventioneller Art sind. [1]. Richtlinien der Europäischen Union betreffend Effizienzanforderungen an Haushaltslampen [2],[3] führen nun zum stufenweisen Verschwinden der Glühbirne vom Markt. Die lichttechnischen Eigenschaften von modernen ESL haben sich im Vergleich zu den Anfängen enorm verbessert und bieten nahezu Qualität und Komfort einer Glühlampe. Eine detaillierte Analyse, aufgrund des zunehmenden Einsatzes von ESL in den Energieversorgungsnetzen und deren Eigenschaften, hinsichtlich Leistungsfaktor und Oberschwingungsanteil des Stromes, ist erforderlich.

1.1.1 Ökodesign-Verordnung

Die EU-Verordnung 244/2009 [2] zur Umsetzung der Richtlinie 2005/32/EG (Ökodesign-Richtlinie [3]) erzwingt mit Erhöhung der Mindestanforderungen der Effizienz von Haushaltslampen das Verschwinden von Glühlampen vom Markt. Aktuell entfallen 14 % der in Europa und 9 % der in Österreich genutzten elektrischen Energie auf die Beleuchtung [1]. Der EU-weite Stromverbrauch der von der Ökodesign-Verordnung erfassten Produkte betrug im Jahr 2007 schätzungsweise 112 TWh/a. Dies entspricht einem CO₂-Ausstoß von ca. 45 Mio. t/a bzw. umgerechnet 400 g/kWh (vgl. Tabelle 1.1). Laut Prognosen steigt der Verbrauch bis zum Jahr 2020 auf 135 TWh/a, sofern keine Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Die Umsetzung der Verordnung für Haushaltsbeleuchtung soll innerhalb der EU im Jahr 2020 zu Energieeinsparungen von 39 TWh/a führen und damit das Gemeinschaftsziel einer Verringerung des Primärenergieverbrauchs um 20 Prozent unterstützen [4].

	CO ₂ -Emission in g/kWh
Welt	400
ENTSO-E (EU)	450
Deutschland	580
Österreich	162

Tabelle 1.1 CO₂-Emission der Stromerzeugung für ausgewählte Regionen aus [5]

Die einzelnen Anforderungen der Ökodesign-Verordnung treten in sechs Stufen beginnend mit 1. September 2009 bis 2016 in Kraft. Dies führt zu einem vermehrten Einsatz an ESL.

	Datum	Auswirkungen der Mindestenergieeffizienzstandards
Stufe 1	1. September 2009	Verschwinden von 100 W Klarglaslampe; alle Mattglaslampen
Stufe 2	1. September 2010	Verschwinden von 75 W Klarglaslampen
Stufe 3	1. September 2011	Verschwinden von 60 W Klarglaslampe
Stufe 4	1. September 2012	Verschwinden von ≥ 7 W Klarglaslampe
Stufe 5	1. September 2013	Erhöhte Anforderungen an Lebensdauer, Zündzeit, Anlaufzeit
Stufe 6	1. September 2016	Steigerung der Standards für Klarglaslampen

Tabelle 1.2 Stufen der Ökodesign-Verordnung

1.2 Normen für Begrenzung der Oberschwingungsemission

Die Begrenzung von Oberschwingungspegeln im Niederspannungsnetz ist für die Einhaltung von Spannungsqualitätskriterien notwendig. Zu große Verzerrungen in der Spannung können sich negativ auf einzelne Verbraucher (Motoren) auswirken. Deshalb sind in der ÖVE/ÖNORM 50160 [6] Grenzwerte für Störgrößen im Niederspannungsnetz festgelegt. Speziell für Verbraucher im Niederspannungsnetz regelt die Normenreihe ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 die Grenzwerte für die Emission von Oberschwingungen.

1.2.1 ÖVE/ÖNORM 50160 Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen – Abschnitt für Niederspannung

Die ÖVE/ÖNORM 50160 [6] gibt Grenzwerte und Verträglichkeitspegel für im Niederspannungsnetz auftretende Störgrößen an.

Auszug der wichtigsten Werte

Spannungsänderung

langsame Spannungsänderung	95 % aller 10-Min-Mittelwerte innerhalb $\pm 10\%$
schnelle Spannungsänderung	normal $\pm 5\%$; mehrmals am Tag $\pm 10\%$ zulässig
Flicker	Langzeit-Flickerstärke von $P_{It}=1$ darf während 95 % des Wochenintervalls nicht überschritten werden

Oberschwingungspegel

95 % der 10-Min-Mittelwerte dürfen folgende Werte nicht überschreiten

Ungerade Harmonische				Gerade Harmonische	
Nichtvielfache von 3		Vielfache von 3		Ordnung	u_v in %
Ordnung	u_v in %	Ordnung	u_v in %		
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		

Tabelle 1.3 Verträglichkeitspegel für OS-Spannungen im NS-Netz

Für den gesamten Oberschwingungsgehalt der Spannung gilt:

$$THD_U \leq 8\%$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_v^2}}{U_1} \quad (1.1)$$

Die Berechnung der THD in (1.1) beinhaltet Oberschwingungen der 2. bis 40. Ordnung

1.2.2 ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 EMV; Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter)

Die ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 [7] der Normenreihe gilt für die Begrenzung von Oberschwingungsströmen, die von Verbrauchern in das öffentliche Niederspannungsnetz eingespeist werden. Sie legt die Grenzwerte der Oberschwingungsanteile des Eingangsstroms fest, die durch ein Gerät (Betriebsmittel, Einrichtung) hervorgerufen werden können, das unter festgelegten Bedingungen geprüft wird. Die Norm ist anzuwenden auf elektrische und elektronische Geräte (Betriebsmittel, Einrichtungen), die einen Eingangsstrom bis zu und maximal 16 A je Leiter haben und die zum Anschluss an das öffentliche Niederspannungs-Verteilnetz vorgesehen sind.

Allgemeine Grenze für Oberschwingungsströme

Lampen und Beleuchtung sind als Betriebsmittel der Klasse C normativ behandelt. Die Unterscheidung der Klasse C erfolgt nach aufgenommener Leistung. Oberschwingungsströme die 0.6 % des Eingangsstroms bzw. 5 mA unterschreiten sind, je nach dessen welcher Wert größer ist, zu vernachlässigen.

a. Leistung ≤ 25 W

Der Stromfluss muss bei spätesten 60° beginnen und mindestens bis 90° andauern, wenn als 0° der Nulldurchgang bei positiver Flanke der Versorgungsspannung vorausgesetzt wird. Der Scheitelpunkt des Stromes muss vor 65° erreicht sein.

$$3. \text{ OS} < 86 \%$$

$$5. \text{ OS} < 61 \%$$

Weiters müssen folgende Grenzwerte eingehalten werden.

Ordnung der Harmonischen	Maximaler zulässiger Strom
v	A
3	2.30
5	1.14
7	0.77
9	0.40
11	0.33
$13 \leq v \leq 39$	$0.15 \cdot 15/v$

Tabelle 1.4 Beschränkungen der Stromharmonischen für Geräte der Klasse C mit Leistungsaufnahme ≤ 25 W

Die Grenzwerte in Tabelle 1.4 müssen von allen Verbrauchern im Niederspannungsnetz eingehalten werden.

b. Leistung > 25 W

Es müssen folgende Grenzwerte eingehalten werden:

Ordnung der Harmonischen	Maximaler zulässiger Strom bezogen auf Grundschwin- gungsstrom
v	%
2	2
3	$30 \cdot \lambda$
5	10
7	7
9	5
$11 \leq v \leq 39$	3

Tabelle 1.5 Beschränkung der Stromharmonischen für Geräte der Klasse C über 25 W

Für die Messung der Stromharmonischen an Energiesparlampen werden laut Norm folgende Bedingungen festgelegt:

Prüfspannung	230/400 V \pm 2 %
Frequenz	50 Hz \pm 0.5 %
Umgebungstemperatur	20 ° bis 27 ° mit $\Delta T = 1$ ° während der Messung

Zusätzlich sind die Lampen einem Alterungsprozess von 100 Stunden zu unterziehen und Messungen sollen erst nach 15 Minuten Anlaufzeit beginnen. Unter diesen Voraussetzungen müssen die Vorgaben für die Begrenzung der Oberschwingungsströme eingehalten werden.

Für die Prüfspannung gelten für deren Oberschwingungspegel folgende Spezifizierungen:

Ordnung OS	Limit
v	in % GS
3.	0.9
5.	0.4
7.	0.3
9.	0.2
2. bis 10. (gerade)	0.2
11. bis 40.	0.1

Tabelle 1.6 erlaubte maximale OS-Anteile der Prüfspannung bezogen auf die Grundschwingung

Geräte welche mit Schaltnetzeilen betrieben werden, besitzen ebenfalls einen hohen Oberschwingungsanteil ([8],[9]). Personalcomputer, Monitor und TV-Geräte mit einer Leistung bis zu 600 W fallen in der Norm unter Klasse D.

Bis zu einer Bemessungsleistung von 75 W gelten keine Grenzwerte für Oberschwingungsströme. Für Geräte mit einer höheren Bemessungsleistung gilt folgende Tabelle.

Ordnung OS	Zulässiger Höchstwert des OS- Stromes je Watt
ν	mA/W
3	3.4
5	1.9
7	1.0
9	0.5
11	0.35
$13 \leq \nu \leq 39$	$3.85/\nu$

Tabelle 1.7 Grenzwerte für OS-Ströme für Geräte über 75 W

1.3 Leistung bei nichtsinusförmigen Kurvenformen von Spannung und Strom

Allgemein ergibt sich die Wirkleistung aus dem zeitlichen Mittelwert der Momentanleistung $p(t)$.

$$P = \overline{p(t)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt \quad (1.2)$$

Bei rein sinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung gilt der Zusammenhang

$$P = U \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (1.3)$$

$$Q = U \cdot I \cdot \sin(\varphi) \quad (1.4)$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.5)$$

Sind Spannung und Strom nicht rein sinusförmig, sondern Oberschwingungsbehaftet gilt folgender Zusammenhang:

Für die Wirkleistung und Blindleistung ergeben immer nur Signale gleicher Frequenzen einen Beitrag.

$$P = U_0 \cdot I_0 + \sum_{\nu=1}^N U_{\nu} \cdot I_{\nu} \cdot \cos(\varphi_{\nu}) \quad (1.6)$$

$$Q = \sum_{\nu=1}^N U_{\nu} \cdot I_{\nu} \cdot \sin(\varphi_{\nu}) \quad (1.7)$$

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.8)$$

Bei nicht sinusförmigen Verlauf von Spannung und Strom wird ein Term zur Berücksichtigung der Oberschwingungsanteile eingeführt – die Verzerrungsblindleistung D.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (1.9)$$

Entspricht bei rein sinusförmiger Spannung der Leistungsfaktor dem $\cos(\varphi)$, so ist bei nicht sinusförmiger Spannung das Verhältnis von Schein- und Wirkleistung der Leistungsfaktor.

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (1.10)$$

1.4 Funktion der Energiesparlampe

Bei der herkömmlichen Glühlampe wird mittels Stromfluss ein dünner Draht (Wolfram) erhitzt und zum Glühen gebracht. Neben der Erwärmung (95 %) wird zusätzlich Licht (5 %) durch die zugeführte Energie abgegeben.

Die Energiesparlampe erzeugt ihr Licht über die elektrische Entladung von Gasen (Edelgas-Quecksilber-Gasgemisch). Durch die von Wendelektroden ausgesendeten Elektronen werden Quecksilberatome angeregt ultraviolette Strahlung abzugeben. Beim Auftreffen auf der Innenseite des mit einer Leuchtstoffschicht beschichteten Glaskolbens werden diese UV-Strahlen in sichtbares Licht umgewandelt. Durch dieses Prinzip kann ein Viertel der aufgenommenen Leistung in Licht umgewandelt werden. Die in Abbildung 1.1 dargestellte Schaltung gilt grundlegend für alle ESL. Einzelne Details oder Bauteile der Schaltung variieren von Typ zu Typ.

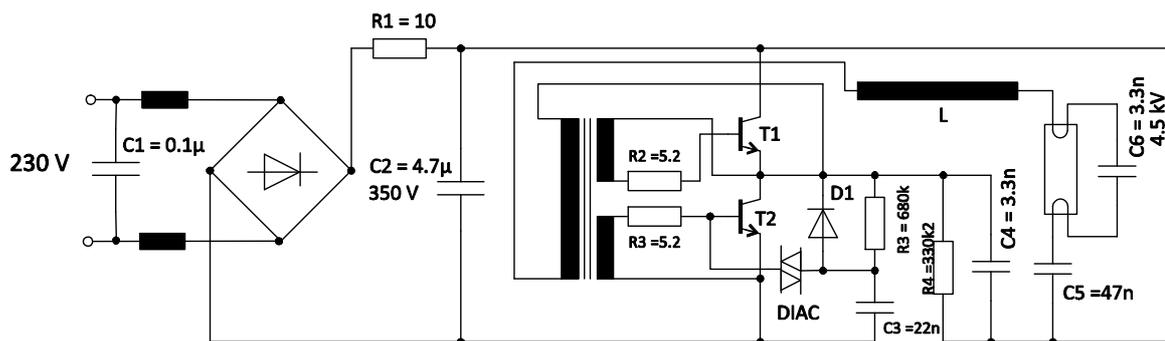


Abbildung 1.1 Innenschaltung einer Energiesparlampe [10]

Zum Aussenden der Elektronen benötigt die Wendelektrode eine Zündspannung von ungefähr 300 bis 350 V. Dazu wird mittels elektronischem Vorschaltgerät die vorhandene Netzspannung gleichgerichtet und in eine Wechselspannung mit einer Frequenz von 40 bis 45 kHz gewandelt, um ein für das menschliche Auge flimmerfreies Licht zu erzeugen. Elektronische Vorschaltgeräte beziehen nur innerhalb einer kurzen Zeit einen impulsförmigen Strom (Abbildung 1.2). Die ESL ist damit im Gegensatz zum sinusförmigen Strom der Glühlampe ein nichtlinearer Verbraucher und ihr Strom ist stark Oberschwingungsbehaftet. Abbildung 1.2 zeigt den zeitlichen Verlauf von Strom und Spannung an einer Energiesparlampe. Deutlich erkennbar ist die kurze Stromflussdauer von rund 3 ms. Damit ergibt sich ein breites Spektrum von Oberschwingungen (Abbildung 1.3).

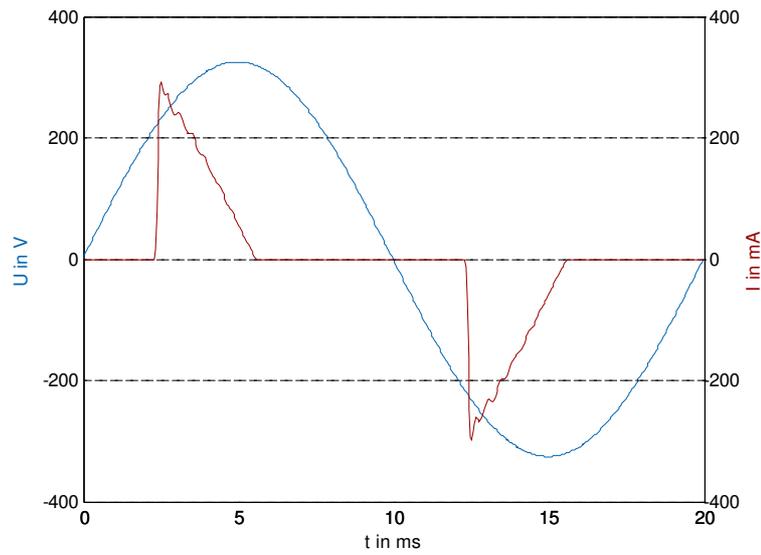


Abbildung 1.2 Strom- und Spannungsverlauf einer ESL über eine Periode

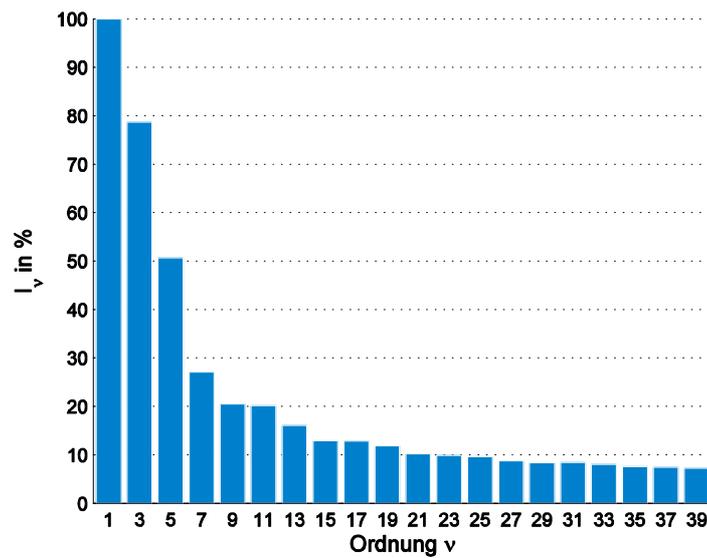


Abbildung 1.3 Frequenzspektrum des Lampenstroms

Neben der zusätzlichen Belastung im Oberschwingungsbereich wirken sich nichtlineare Verbraucher wie die Energiesparlampe außerdem verzerrend auf die Versorgungsspannung aus.

1.5 Bisherige Untersuchungen und Publikationen zu den Auswirkungen von ESL

Studien über und mit ESL werden weltweit betrieben. Der geographische Bogen reicht von Australien, Neuseeland über Indien, Pakistan, Sri Lanka, ... bis nach Europa. Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der ESL deckt ebenfalls immer mehr Bereiche der ESL und ihrer Einflüsse ab.

Vor allem zwei Punkte sind hier besonders hervorzuheben: Netzverluste und Netzurückwirkungen.

1.5.1 Netzverluste

Der allgemein genannte Vorteil der ESL weniger Energie zu verbrauchen, wird im Zusammenhang mit der Blindleistung aufgrund des „schlechten“ Leistungsfaktors immer mehr kritisch betrachtet. Aus dem kapazitiven Verhalten von Strom und Spannung an der ESL resultiert ein Blindleistungsanteil, welcher zusätzlich noch durch die Verzerrungsblindleistung D erhöht wird. Die nichtsinusförmige Stromaufnahme und die daraus entstehenden Oberschwingungen (OS) ergeben zusammen mit der Spannung diese Verzerrungsblindleistung. Die aus Wirkleistung und Blindleistung zusammengesetzte Scheinleistung muss netzseitig bereitgestellt und übertragen werden. Dies belastet Netze und Leitungen. Die Oberschwingungsströme der ESL führen zu zusätzlichen Netzverlusten im Bereich höherer Ordnung.

Beobachtungen über die aus den Oberschwingungsströmen zusätzlichen Netzverluste gehen meist über die Niederspannungsebene hinaus und es wird versucht über Simulationen die Auswirkungen des Einsatzes von ESL in das Mittelspannungsnetz (20 kV) und Hochspannungsnetz (110 kV bis 220 kV) abzuschätzen. Eine europäische Studie aus Slowenien [12] zeigt in Bezug auf Netzverluste eine Erhöhung dieser im 0.4 kV-Bereich, aber in den höheren Netzebenen ergeben sich geringere Verluste und in Summe kommt es zu einer Reduzierung der Netzverluste um $\frac{1}{3}$. Detaillierter berücksichtigt werden die Verluste der OS in einer neuseeländischen Studie [13]. Das Ergebnis für die gesamten Verluste in den Netzebenen bis 220 kV verringert sich in Summe.

1.5.2 Rückwirkung auf Versorgungsspannung

Lineare Lasten, d.h. Verbraucher, welche bei sinusförmiger Spannung auch sinusförmige Ströme aufnehmen, führen zu keiner zusätzliche Verzerrung in der Spannung. Nichtlineare Verbraucher, wie ESL mit elektronischem Vorschaltgerät, wirken auf die versorgende Spannung mit ihrem nichtsinusförmigen, impulsförmigen Strom verzerrend. Über Spannungsabfälle an Leitungsimpedanzen wird die Versorgungsspannung zusätzlich mit Oberschwingungen behaftet. In welcher Stärke sich der Einsatz von Energiesparlampen auf die Versorgungsspannung auswirkt hängt von mehreren Faktoren ab. Der Lastanteil der Beleuchtung an der Gesamtlast ist dabei maßgebend und bei Betrachtung von Bürogebäuden oder dicht besiedelten Wohngebieten bestimmend. Vor allem Studien aus Schwellenländern wie Pakistan oder Sri Lanka [14], welche zusätzlich noch mit schwachen Netzen zu kämpfen haben, beschäftigten sich durch den steigenden Energieverbrauch der Haushalte verstärkt mit dem Einsatz von ESL zur Verringerung des Verbrauchs. Bei Lastanteilen von bis zu 85 % der Beleuchtung zu Spitzenzeiten führt dies zu Auswirkungen auf die Qualität und Zuverlässigkeit der Versorgungsspannung [14]. Im europäischen Raum hat unter anderen

eine österreichische Studie [15] 1995 die Auswirkungen auf die Netze und deren Oberschwingungsbelastung untersucht. Die Weiterentwicklung der Energiesparlampe hat auch zu weiteren Studien geführt [12]. Sie behandeln neben den Netzverlusten auch die Erhöhung der Oberschwingungspegel in der Niederspannungsebene anhand der Simulation verschiedener Lastfälle.

Interessant im Rahmen dieser Betrachtungen ist eine Untersuchung in welcher der Frage nachgegangen wird, ob bei steigender Verzerrung der Spannung womöglich der Verzerrungsfaktor des Stromes der ESL sinkt [16], diese Messungen zeigen tatsächlich eine Verringerung der THD_I um 20 % bei Erhöhung der THD_U von 4.9 % auf 6.9 %.

1.6 Ziel der Arbeit

Die im Rahmen der Arbeit zu Beginn getätigte Literaturrecherche zeigt, dass Fragen zu Netzverluste und Netzurückwirkungen immer wieder behandelt werden. Bislang ist aber keine zufriedenstellende Antwort gegeben worden, da für die Nachbildung der ESL in den Netzsimulationen starke Vereinfachungen vorgenommen wurden. Daneben tauchen neue noch nicht betrachtete Aspekte wie mögliche Änderungen des Stroms durch Einflüsse der Versorgungsspannung auf.

Die Spannung im öffentlichen Netz ist tageszeitlichen Schwankungen unterschiedlicher Parameter unterworfen. Bislang ist wenig bekannt wie Einflüsse der Versorgungsspannung den Strom der ESL verändern.

Ein wichtiger Parameter der Spannung ist deren Oberschwingungsbelastung bzw. Verzerrung, jedoch scheinen generelle Aussagen nur über Betrachtung der Gesamtverzerrungsgrade hier wenig zielführend, darum ist es notwendig die Oberschwingungsbelastung der Versorgungsspannung in einen Zusammenhang mit den Oberschwingungen des Lampenstroms zu stellen. Mittels drei Kennwerten, der Ordnung, der Amplitude und der Phasenlage lässt sich eine Harmonische in der Versorgungsspannung vollständig beschreiben. Anhand der Veränderung dieser drei Kennwerte soll der jeweilige Einfluss auf das Oberschwingungsspektrum des Stroms der ESL betrachtet werden.

Je nach Tageszeit und Belastungszustand des Netzes schwankt nicht nur der Verzerrungsgrad der Spannung sondern auch deren Amplitude. Änderungen der Amplitude sollen ebenso auf ihren Einfluss untersucht werden.

Durch Messungen an einer repräsentativen Anzahl gemischter und gleicher Typen von ESL sollen Schwankungsbreiten und Summationseffekte nachvollzogen werden. Diese Messungen und das damit erarbeitete Verständnis für ESL sollen in einem Modell in einer Simulation eines Niederspannungsnetzes einfließen. Aus den Simulationsergebnissen sollen anhand der Entwicklung der bislang vorherrschenden OS im Niederspannungsnetz Schlüsse auf eine Wirkung der ESL als zusätzlicher Verbraucher gezogen werden.

2 Messung

Beginnend bei Normen über Messaufbau, Wahl des Messgerätes und Durchführung der Messungen soll ein Überblick über die Vorgehensweise bei der Messung und anschließender Auswertung geschaffen werden.

2.1 Norm

Bei der messtechnischen Erfassung von Oberschwingungen sind für das zu verwendende Gerät Genauigkeitskriterien zu beachten.

ÖVE/ÖNORM 61000-4-7 EMV; Allgemeiner Leitfaden für Messung von Oberschwingungen und Geräten in Energieversorgungsnetzen

Die ÖVE/ÖNORM 61000-4-7 [17] regelt Anforderungen an die für die Messung von OS vorgesehenen Messgeräte.

Umgebungstemperatur 5 bis 40 ° C
Luftfeuchtigkeit 40 bis 95 %

Spannungsversorgung

Frequenzabweichungen ± 2 %
Spannungsschwankungen ± 15 %
Verzerrungsgrad max. 10 %

Des Weiteren werden Genauigkeitsangaben für Messgeräte vorgegeben.

Klasse	Messgröße	Bereich	Erlaubter Fehler	
A	U	$U_m \geq 1 \% U_N$	5 %	U_m
		$U_m < 1 \% U_N$	0.05 %	U_N
	I	$I_m \geq 3 \% I_N$	5 %	I_m
		$I_m < 3 \% I_N$	0.15 %	I_N
B	U	$U_m \geq 3 \% U_N$	5 %	U_m
		$U_m < 3 \% U_N$	0.15 %	U_N
	I	$I_m \geq 10 \% I_N$	5 %	I_m
		$I_m < 10 \% I_N$	0.5 %	I_N

Tabelle 2.1 maximal erlaubte Messfehler laut [17]

Index m bezeichnet die Messgröße; Index N bezeichnet den Eingangswertbereich der Messgeräte

2.2 Verwendetes Messgerät – DEWERACK-3016

Den Messungen soll ein so hoher Genauigkeitsgrad wie möglich zugrunde liegen. Ebenfalls sollen die erfassten Messwerte eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Auswertung bieten. Daraus folgt die Aufnahme der Messwerte als zeitlicher Verlauf von Strom und Spannung mit genügend hoher Auflösung. Aus diesen können alle notwendigen Kennwerte errechnet werden. Dewetron bietet dazu eine geeignete Hardware an. Das DEWERACK-3016 ist ein Einbaugeschäft mit Modulen zur Spannungsmessung. Zur Strommessung dient ein Messwiderstand von 0.1Ω mit einer Toleranz von 1%.

DAQP-DMM	Bereich in V	Messabweichung
	10,40,100,200,400,1000	$\pm 0.1 \%$ von Messwert $\pm 0.1 \%$ von Messbereich
DAQP-LV		
	0.01 – 0.05	$\pm 0.04 \%$ von Messwert $\pm 40 \mu\text{V}$
	0.1 - 50	$\pm 0.04 \%$ von Messwert $\pm 0.05 \%$ von Messbereich

Tabelle 2.2 Angabe der Genauigkeit der DEWTRON-Module [18]

Anhand des Vergleichs der Angaben für die Messabweichungen der Dewetron-Module mit den Vorgaben aus der ÖVE/ÖNORM 61000-4-7 [17] kann klargelegt werden, dass unter Ausnutzung des Messbereichs die geforderten Fehlergrenzen für Strom- und Spannungsmessungen eingehalten werden können.

2.3 Messaufbau

Für die ausreichende Genauigkeit der Messungen ist es erforderlich einwirkende Fehlermöglichkeiten so gering wie möglich zu halten. Bei spannungsrichtiger Messung wird jene Spannung, welche direkt an der ESL anliegt gemessen. Spannungsabfälle über Zuleitungen und den Messwiderstand werden nicht in die Spannungsmessung aufgenommen.

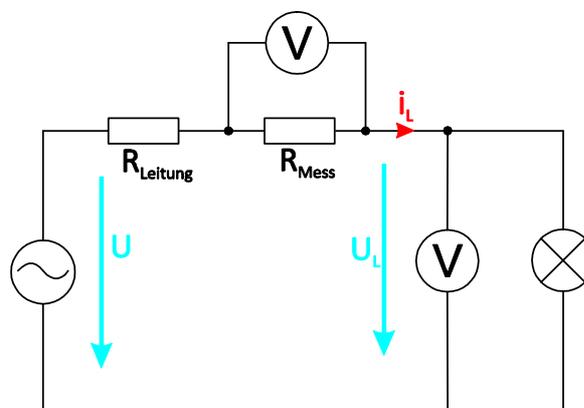


Abbildung 2.1 Prinzip der spannungsrichtigen Messung an ESL

Sowohl die Messung an einer einzelnen ESL sowie an mehreren ESL ist spannungsrichtig durchgeführt.

2.4 Durchführung der Messungen

Der Leistungsverstärker ELGAR 1751 B dient als Quelle zur Speisung der ESL. Anhand eines Eingabe-Programms in LabVIEW ist die Vorgabe von Spannungsamplituden und Winkeln für Grundschwingung und Oberschwingungen möglich. Über eine Schnittstelle gelangt ein normiertes Spannungssignal zu den BNC-Eingangsbuchsen des Leistungsverstärkers. Aus den Messungen der Spannung und dem Vergleich der eingestellten Werte kann eine Genauigkeit des Signals für die Pegel der OS von $\pm 1\%$ angenommen werden.

Die ESL sind in E27 Schraubfassungen, welche für die Messungen mit Buchsen versehen sind, eingebaut, über welche die Strom und Spannungsmessung mittels DEWERACK-3016 erfolgt. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt als zeitlicher Verlauf über 200 ms mit einer Abtastfrequenz von 25 kHz. Mittels MATLAB wurden die aufgenommenen Daten aufbereitet und ausgewertet. Besonderer Schwerpunkt liegt hier auf dem Spektrum des aufgezeichneten Stromes.

Die Messung der Spannung erfolgt wie in Kapitel 2.3 erläutert direkt an den ESL.

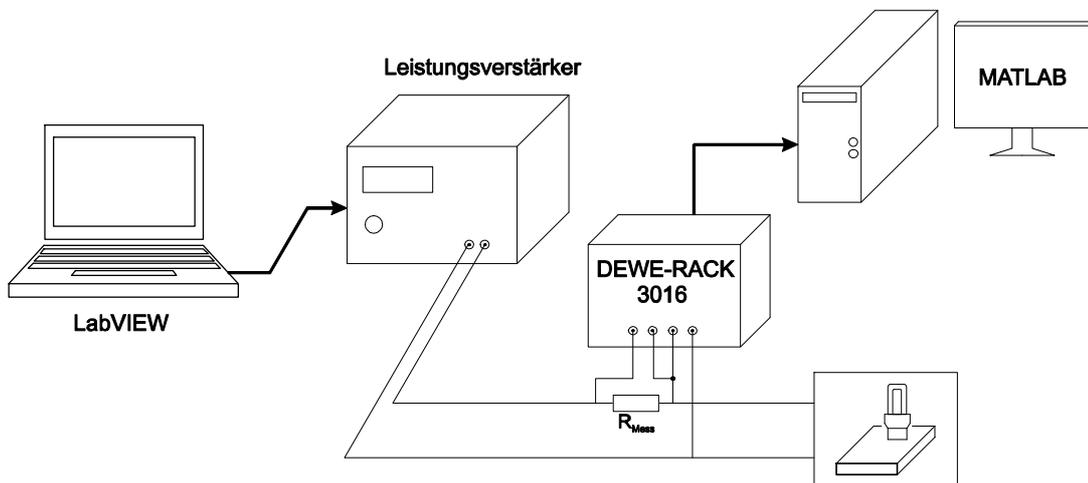


Abbildung 2.2 Prinzipieller Aufbau zur Durchführung der Messungen

2.5 Anmerkung zu Fourier-Transformation in MATLAB

Die Aufnahme der Signale erfolgt getriggert mit dem Spannungsnulldurchgang. In MATLAB wird bei der Fourieranalyse als zugrunde liegende periodische Funktion ein kosinusförmiger Signalverlauf verwendet. Das Ergebnis sind komplexe Werte, welche Betrags- und Phaseninformation beinhalten. Bei der Analyse einer rein sinusförmigen Spannung wird also für die Grundschwingung eine Phasenverschiebung von -90° angegeben. Durch Addition von 90° bei den Phasenwinkeln der Fourierkoeffizienten, wird diese Phasendifferenz ausgeglichen. Die Werte der Phasenwinkel gelten für eine Fourieranalyse, welche auf einem sinusförmigen Verlauf basiert.

$$u(t) = a_0 + \sum_{\nu=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot b_{\nu} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot \nu \cdot t + \varphi_{\nu})$$

Wobei a_0 aufgrund der reinen Wechselgrößen 0 ist. Die angegebenen Beträge von b_{ν} sind als Effektivwerte zu verstehen.

2.6 Erfassung der Oberschwingungsbelastung im NS-Netz

Vorbereitend werden Messungen im Niederspannungsnetz durchgeführt. Die Ergebnisse sollen einen Aufschluss über die auftretenden Oberschwingungspegel und deren Phasenlagen geben. Über 24 Stunden (wochentags) sind halbstündlich zeitliche Verläufe mit einer Länge von 200 ms aufgezeichnet worden. Aus diesen Daten der Messungen im Netzmodell-Labor der Technischen Universität Graz und einem Einfamilienhaus im nördlichen Einzugsgebiet der Stadt Graz stammen die zusammengefassten Werte in Tabelle 2.3.

Ordnung v	Betrag		φ_v	
	Min in %	Max in %	Min in °	Max in °
3	0.3	1.0	83	170
5	0.6	2.2	-175	-120
7	0.4	1.1	-35	34
9	0.2	0.6	-167	-98

Tabelle 2.3 Übersicht über die Messwerte der maximalen und minimalen Werte für Beträge und Phasenlagen der OS-Spannungen im Niederspannungsnetz

Eine Messung an einem 630-kVA-Verteilnetztransformator liefert die Angaben für die Oberschwingungen direkt an den Abgängen des Transformators. Die Messwerte stammen aus einer Anfang Februar 2010 durchgeführten Messung über einen Zeitraum von 24 Stunden.

Ordnung v	Betrag		φ_v	
	Min in %	Max in %	Min in °	Max in °
3	0.3	0.5	67	121
5	1.6	2.2	-161	-155
7	0.2	0.7	-44	7
9	0.1	0.2	-152	-101

Tabelle 2.4 Übersicht über die maximalen und minimalen Werte für Beträge und Phasenlagen von OS-Spannungen - Messung an NS-Seite des Verteilnetztransformators

Diese Werte ermöglichen eine ungefähre Vorstellung des Bereichs in welchem sich einzelne Oberschwingungen größenordnungsmäßig bewegen. In Abbildung 2.3 sind die Spektren und der Bereich für den minimalen und maximalen Wert abgebildet.

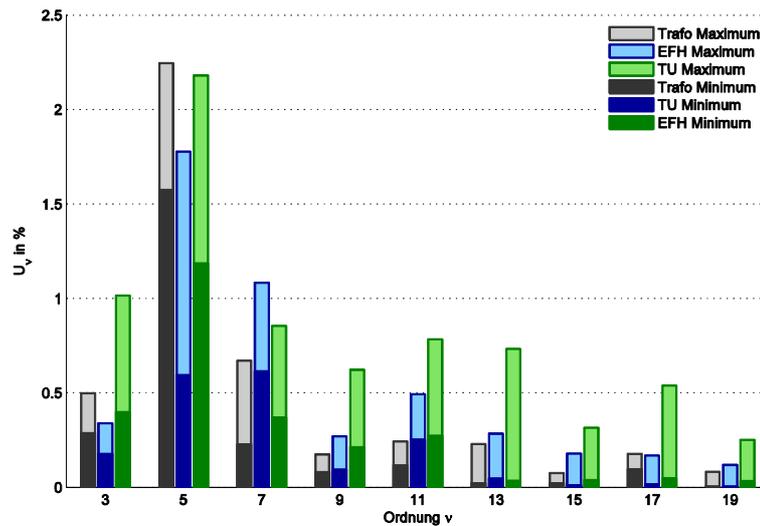


Abbildung 2.3 Spektren von Messungen an NS-Seite von Verteilnetztransformator, Einfamilienhaus und Labor der TU Graz. Spektrum von 3. bis zur 19. Oberschwingung

Neben den Oberschwingungsspannungen wird auch der Gesamtstrom des Transformators erfasst. Daraus lassen sich aufgrund des zeitlichen Verlaufs (Abbildung 2.4) und der spektralen Zusammensetzung (Abbildung 2.5) bestimmte Grundformen an Verbrauchern erkennen. Vor allem in Bezug auf die Entwicklung des Simulationsmodells sind diese Information wichtig (siehe Kapitel 4.3).

Ordnung v	Betrag		Phase	
	Min in %	Max in %	Min in °	Max in °
1	--	--	-22	-4
3	6.6	15.3	-171	-152
5	2.8	6.2	-66	36
7	1.4	3.8	-178	-135
9	1.6	4.7	-33	15

Tabelle 2.5 Übersicht der maximalen und minimalen Werte für Betrag und Phase von OS-Strömen im Niederspannungsnetz – Messung am Verteilnetztransformator

Aus den Strompegeln und Phasenlagen der Ströme sind verschiedene Verbrauchertypen heraus zu lesen. Eine ohmsch- induktive Grundlast mit einem $\cos(\varphi)$ von 0.92 bis 0.99 stellt die Hauptlast dar. Hinzu kommt ein Lastanteil resultierend von Gleichrichterschaltungen (10% bis 15%). Dieser ist verantwortlich für den überwiegenden Teil der Oberschwingungsbelastung im Strom. Detaillierte Behandlung der OS-Belastung durch Gleichrichterschaltung finden sich in [8] und [9].

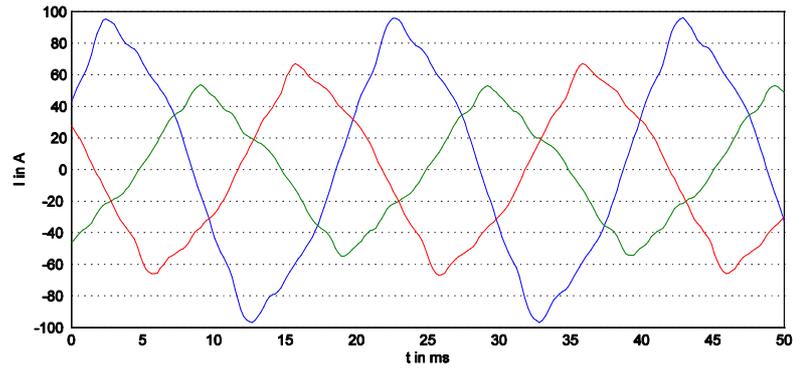


Abbildung 2.4 Zeitlicher Verlauf der drei Phasenströme des Summenabgangs der NS-Seite des Verteilnetztransformators

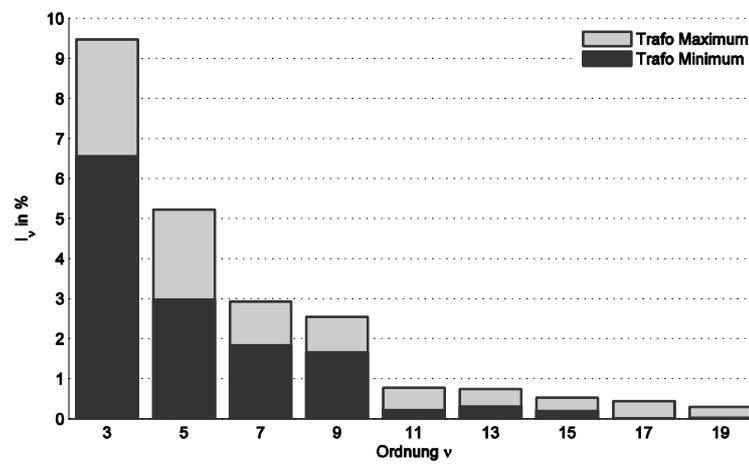


Abbildung 2.5 Spektrum des Summenstroms der Abzweige eines Verteilnetztransformators an der NS-Seite

2.7 Verwendete Energiesparlampen

Für die Messungen wird eine repräsentative Anzahl von verschiedenen Typen von ESL benötigt. 16 ESL unterschiedlicher Hersteller, Leistungsklassen und Bautypen sind dafür ausgewählt worden. Neben der Charakteristik einer einzelnen ESL ist auch das Verhalten von Kollektiven abzuschätzen. Von den Typen 1-4 aus Tabelle 2.6 sind dazu jeweils 25 Stück vorhanden. Aus dem Verhalten von in Summe 100 Energiesparlampen können Einzel- und Kollektivverhalten verglichen werden und die notwendigen Schlüsse daraus gezogen werden.

Nr.	Marke	Bautyp	W
1	Osram	Stab	11
2	Osram	Stab	17
3	Philips	Tornado	8
4	Baselight	Birne	11
5	Philips	Birne	20
6	Radium	Stab	11
7	Skylight	Stab	11
8	Minilight	Birne	11
9	IKEA	Birne	11
10	Osram	Birne	7
11	Osram	Birne	11
12	Philips	Tornado	23
13	IKEA	Birne	11
14	Philips	Ecotone	5
15	Energy Saving	Birne	9
16	Philips	Softone	16

Tabelle 2.6 Getestete Lampentypen

3 Charakteristik der Stromaufnahme

3.1 Einschaltvorgang

Das teilweise schlechte Image der ESL trägt dazu bei, dass zweifelhafte Argumente gegen die ESL angeführt werden. Eines davon ist die Behauptung, dass der Einschaltstrom der ESL so groß wäre, dass das Einsparpotential der ESL nicht gewährleistet ist. Aus dem in Abbildung 3.1 dargestellten Verlauf des Einschaltstroms ist je nach Einschaltzeitpunkt aufgrund unterschiedlich anliegender Spannung eine Einschaltspitze von bis zu 8 A ersichtlich. Trotz dieser hohen Stromspitze ist die aufgenommene Leistung gering. Die Dauer der Einschaltspitze beträgt nur 0.3 ms. Die Messung des Einschaltvorgangs wird direkt an Netzspannung durchgeführt um etwaige Nachregeleffekte des Leistungsverstärkers auszuschließen.

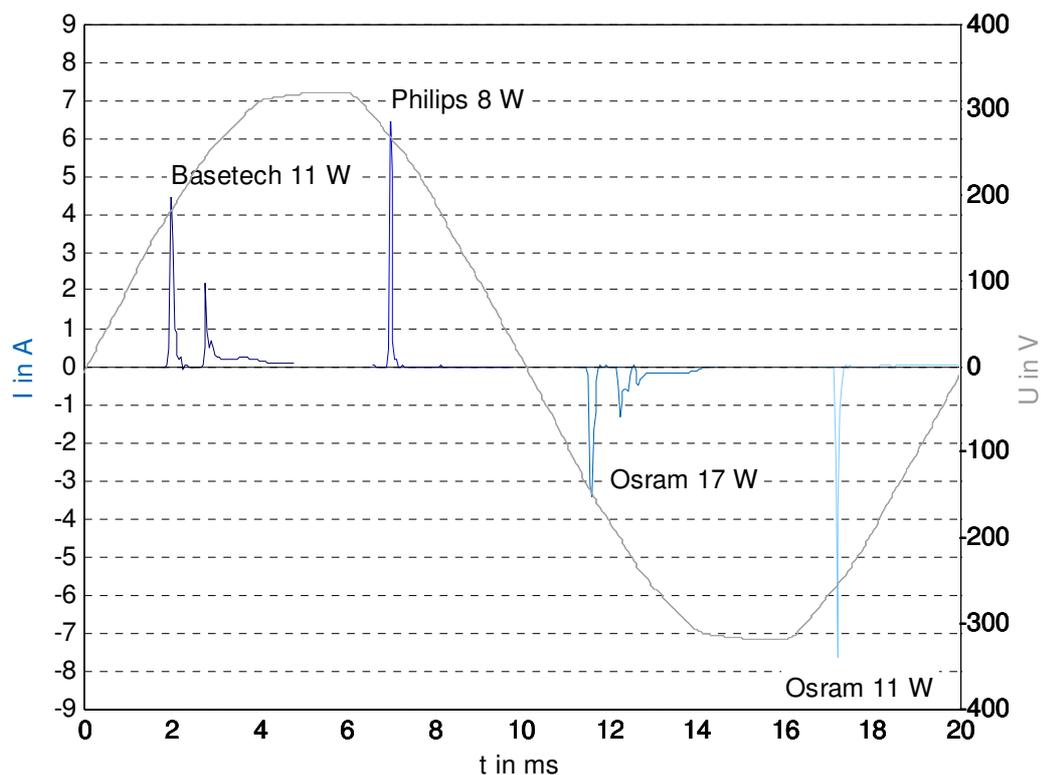


Abbildung 3.1 Einschaltvorgang von 4 ESL

3.2 Kennwerte von Energiesparlampen

In Tabelle 3.1 findet sich eine Auflistung der 16 unterschiedlichen Lampen und ausgewählte Kennwerte. Der Grundschwingungsstrom I_1 der ESL verhält sich kapazitiv, d.h. dieser eilt der Spannung vor. Insgesamt ergibt sich auch unter Einbezug der Verzerrungsblindleistung eine kapazitive Blindleistung.

Nr.	P_N	P	λ	I_{RMS}	THD_I	I_1	φ_1
	W	W		mA	%	mA	°
1	11	10.62	0.58	79.0	108.60	53.1	30.0
2	17	13.68	0.61	97.7	105.82	66.8	27.6
3	8	7.74	0.60	56.3	110.76	37.5	27.0
4	11	10.31	0.59	75.7	114.51	49.5	26.2
5	20	20.98	0.61	146.9	103.64	90.5	28.2
6	11	11.68	0.62	81.6	104.88	52.6	26.9
7	11	9.14	0.59	66.6	115.1	40.2	24.1
8	11	11.1	0.61	78.3	102.67	51.0	27.6
9	11	11.84	0.62	82.3	98.19	51.5	27.5
10	7	7.12	0.58	52.6	110.09	32.3	28.4
11	11	11.22	0.65	73.2	94.54	51.3	25.2
12	23	22.91	0.57	170.9	116.09	103.2	26.9
13	11	11.01	0.60	79.3	110.27	47.9	26.8
14	5	5.05	0.58	37.2	128.10	24.5	18.7
15	11	11.03	0.61	77.8	108.87	42.3	24.7
16	16	16.26	0.60	114.7	112.77	60.0	23.9

Tabelle 3.1 Kennwerte von 16 ESL

P_N ... angegebene Nennleistung laut Hersteller

Die angegebene Leistung P_N laut Hersteller und der gemessene Wert P stimmen bis auf eine Lampe (Nr.2) überein. Im Schnitt weisen die ESL ein Leistungsfaktor (λ) von 0.6 auf. Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem $\cos(\varphi_1)$. Der $\cos(\varphi_1)$ gilt nur für die Grundschwingung von Strom und Spannung, siehe Kapitel 1.3.

Ein gutes Maß für die starke Verzerrung des Stromes lassen die Werte der THD_I erkennen. Durchschnittlich ergeben sich Werte von 105 -110 %. Bei 90 % der geprüften ESL beträgt die THD_I über 100 %. Nur an zwei Lampentypen können Werte unter 100 % für die THD_I festgestellt werden.

3.2.1 Betrachtung 16 unterschiedlicher ESL

Wie einheitlich bzw. different sind unterschiedliche ESL bezüglich ihrer Stromaufnahme? Diese Frage taucht immer wieder bei der Beschäftigung mit ESL auf. Die Ergebnisse der Messungen zeigen für die Leistungsaufnahme der 16 ESL keine großen Schwankungsbreiten. Um eine einheitliche Darstellung der unterschiedlichen Leistungsklassen zu ermöglichen, ist der Strom auf die aufgenommene Wirkleistung bezogen. Für den auf die aufgenommene Wirkleistung bezogenen Effektivwert des Stroms ergibt sich eine Differenz von 1 mA/W und für den Grundschwingungsstrom eine Differenz von 0.4 mA zwischen minimal und maximal ermittelten Stromwert.

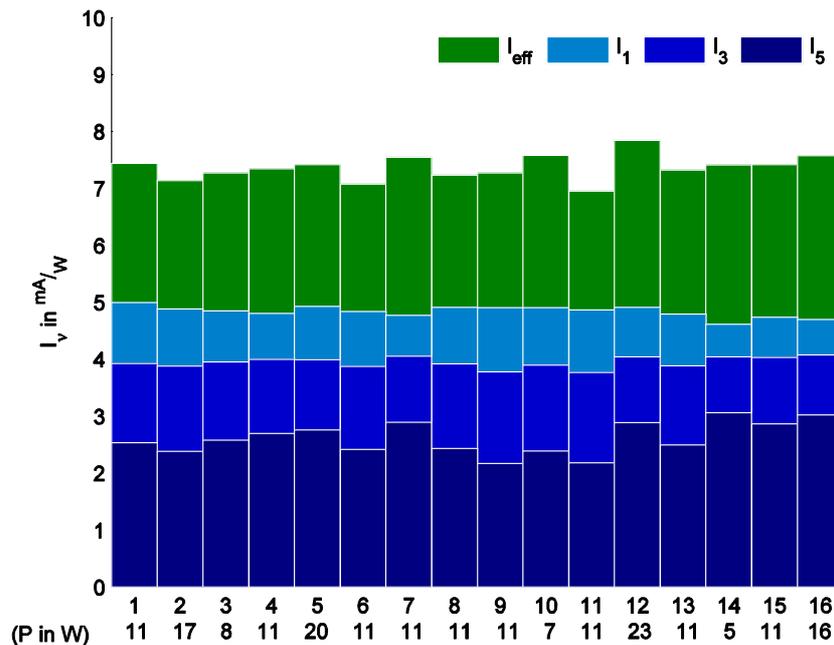


Abbildung 3.2 Darstellung der auf die Wirkleistung bezogenen Ströme bei 16 Lampen

	Min	MW	Max
I	mA/W	mA/W	mA/W
I_{eff}	6.9	7.4	7.9
I_1	4.6	4.8	5.0
I_3	3.7	3.9	4.1
I_5	2.2	2.6	3.0

Tabelle 3.2 Übersicht der auf die Wirkleistung bezogenen Ströme

Der leistungsbezogene Grundschwingungsstrom variiert in einem Bereich von $\pm 4\%$. Für den dritten und fünften OS-Strom kann ein Bereich von $\pm 5\%$ bzw. $\pm 15\%$ ausgemacht werden. Die Streuungen weisen auf keine Korrelationen zu aufgenommener Leistung oder Bauform hin. Viel mehr ist anzunehmen, dass kleine Unterschiede in den Bauformen der Vorschaltgeräte dafür verantwortlich sind. Auch Toleranzen der elektronischen Bauteile sind in Betracht zu ziehen.

In (Abbildung 3.3) wird der Unterschied der Ströme für 16 ESL anhand der dargestellten zeitlichen Verläufe auffällender. Der Beginn des Stromflusses findet nicht zu gleichen Zeitpunkten statt, sondern weist auch einen Streubereich auf. Der Stromfluss startet zwischen 2.2 und

2.9 ms, wenn für den Zeitpunkt 0 der Nulldurchgang der sinusförmigen Spannung angenommen wird. Das Ende des Stromflusses liegt zeitlich deutlich näher zusammen. Bei 5.5 ms endet der Stromfluss bei allen Lampen. Aus der Differenz von Start- und Endpunkt ergeben sich unterschiedliche Stromflussdauern von 2.6 bis 3.3 ms.

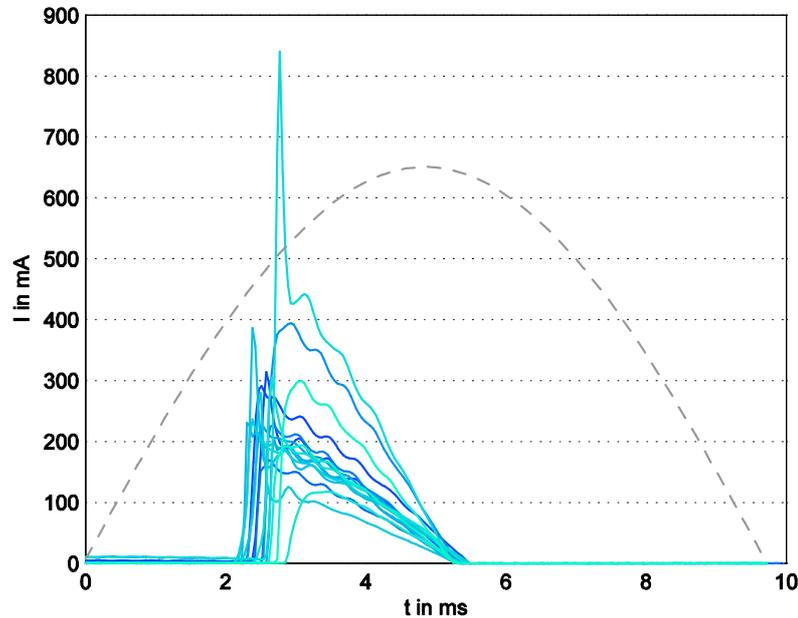


Abbildung 3.3 zeitlicher Verlauf des Stroms für 16 ESL

Die Differenzen der zeitlichen Startwerte für den Stromfluss wirken sich insofern aus, dass sich dadurch die in Abbildung 3.5 dargestellten unterschiedlichen Phasenlagen der Oberschwingungsströme ergeben. Die Steilheit der Flanke und die Ausprägung der Stromspitze sind verantwortlich für die Zusammensetzung des OS-Spektrums.

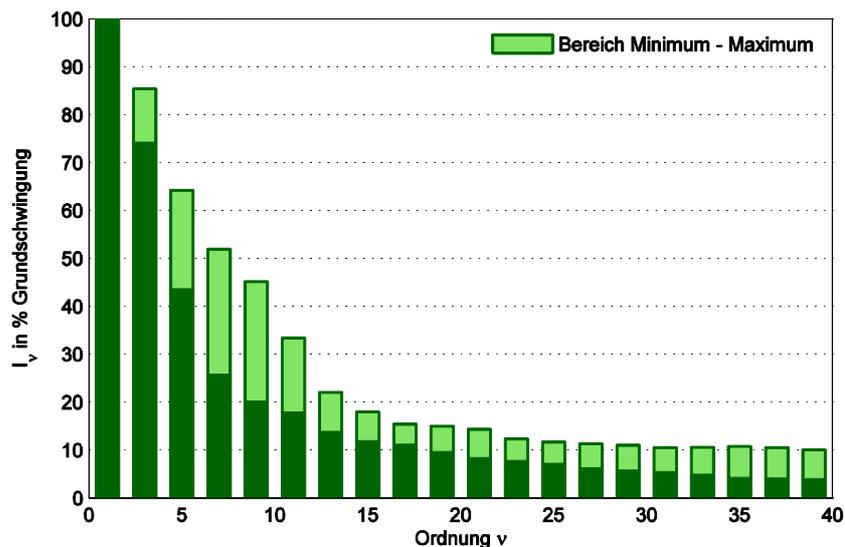


Abbildung 3.4 Zusammenfassung der Stromspektren von 16 Lampen

Abbildung 3.4 zeigt mittels des hellgrün markierten Bereichs, welchen Abweichungen einzelne ESL in ihrem OS-Spektrum besitzen. In Relation zu ihrer Größe zeigt die dritte OS den geringsten

Schwankungsbereich. Besonders große Bandbreiten weisen 5., 7. und 9. OS auf. In Tabelle 3.3 wird dies anhand der Werte noch einmal verdeutlicht.

Ordnung I_v	Min in %	Max in %
3	74.1	85.4
5	43.5	64.2
7	25.6	51.9
9	20.0	45.2
11	17.8	33.4
13	13.7	22.0
15	11.7	18.0
17	11.0	15.5
19	9.5	15.0

Tabelle 3.3 Minimum und Maximum der OS-Ströme bezogen auf GS für 16 Lampentypen

Werden bei den OS-Strömen neben der Betragsabweichung zusätzlich noch die Abweichung der Phasenlagen der OS berücksichtigt, ergeben sich Bereiche für Stromzeiger (Abbildung 3.5). Die Unterschiede in der Phasenlagen der Grundschwingung I_1 resultiert vorwiegend aus den unterschiedlichen Startpunkten des Stromflusses. Diese Unterschiede werden für die OS höherer Ordnung verstärkt übernommen. Damit können die größer werdenden Bereiche der Phasenlagen erklärt werden. Trotz dessen können für die Phasenlagen einzelner OS charakteristische Bereiche erkannt werden. So liegt die Grundschwingung des Stroms im Bereich um 25° (kapazitiv). Für die dritte ergibt sich ein Bereich um -100° (induktiv) und die 5. Ordnung befindet sich bei rund 145° .

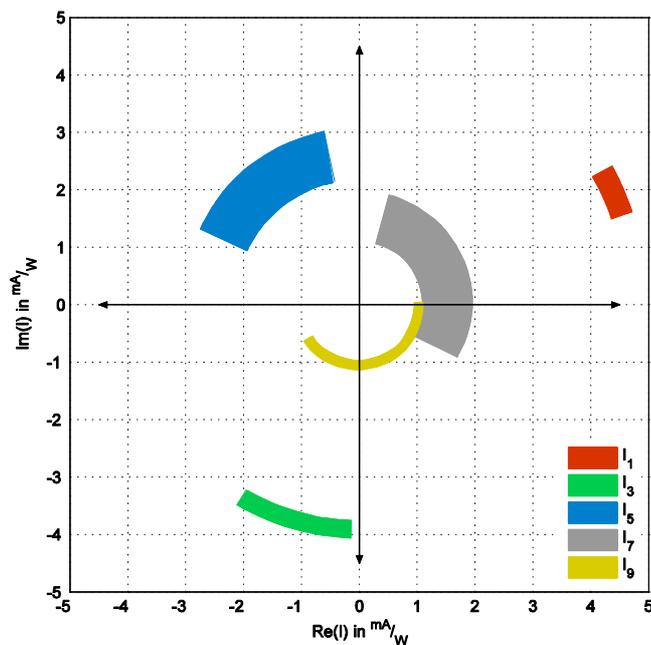


Abbildung 3.5 Bereich der auf die Wirkleistung bezogenen Stromzeiger ausgewählter OS-Ströme der 16 verschiedenen Typen

Ordnung φ_v	Min in °	Max in °
1	19.7	30.0
3	-120.3	-91.7
5	102.1	155.5
7	-29.5	75.5
9	-145.6	3.3

Tabelle 3.4 Minimum und Maximum der OS-Winkel bei 16 Lampen

3.2.2 Summation von 16 Lampen

Für die Summenbildung gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten, die lineare Addition der Strombeträge und die vektorielle Addition welche zusätzlich noch die Phaseninformation berücksichtigt. Die vektorielle Addition sollte so auch der vergleichenden Messung entsprechen.

Ordnung v		1	3	5	7	9
lin. Addition	mA	854	695	461	257	182
vekt. Addition	mA	853	691	450	233	147
Messung	mA	882	713	461	237	154
Differenz zu M.						
lin. Addition	%	-3.2	-2.4	0.0	8.6	18.2
vekt. Addition	%	-3.3	-3.1	-2.4	-1.7	-4.5

Tabelle 3.5 Addition und Messung von 16 Typen

In Abbildung 3.6 wird anhand der 9. OS des Stromes die Vorgehensweise bei der Summierung von 16 ESL dargestellt. Gut zu erkennen sind die unterschiedlichen Phasenlagen der Einzelvektoren.

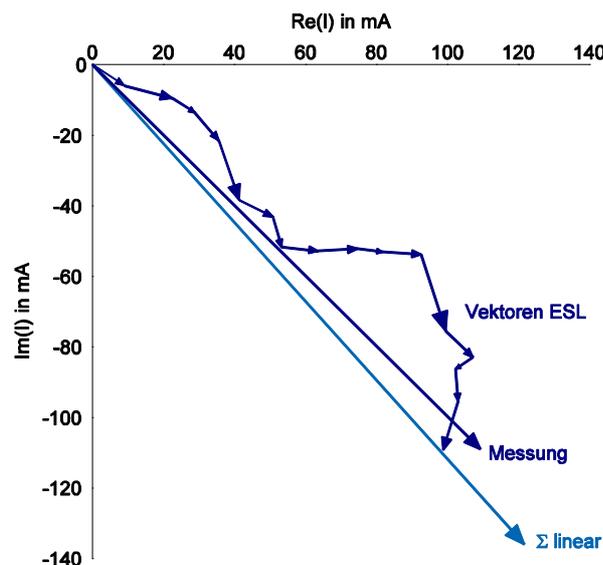


Abbildung 3.6 Vektordiagramm zur Addition der 9. OS von 16 Lampen. Vergleich von vektorieller Addition, Messung und linearer Summation.

Die lineare Summation hat nur bis zu gewissen Ordnungen der OS eine Gültigkeit. Ab der 7. bzw. 9. Harmonischen sind die Abweichungen zur Messung und auch zur vektoriellen Addition schon zu groß (8 % bzw. 18 % aus Tabelle 3.5) als dass sie vernachlässigt werden können. Abhilfe kann eine Addition mittels Summationsfaktoren schaffen, wenn die einzelnen Größen für die ESL explizit nicht bekannt sind. Der Summationsfaktor berücksichtigt behelfsmäßig die Streuung der Phasenlagen der OS-Ströme.

$$I_{\Sigma} = \sqrt[k]{\sum_{v=1}^N I_v^k}$$

Beispiel:

Bei Verwendung eines Summationsfaktors k von 1.07 reduziert sich der Wert für die 9. Harmonische auf 152 mA. Die Abweichung zur Messung wäre somit vernachlässigbar.

Weiter zeigt sich, dass es zwischen gemessener Summe und gerechneter Vektorsumme eine Abweichung gibt. Interessanterweise ist der gemessene Wert jeweils größer als der rechnerisch ermittelte. Unterschiede in der aufgenommenen Leistung sind hierfür verantwortlich. Ein Vergleich der Summe der gemessenen Einzelleistungen der 16 Lampen mit der Summenleistung der 16 ESL ergibt eine Differenz der Leistungsaufnahme von 3.4 %.

Für eine Hochrechnung von einigen wenigen Lampen auf eine größere Stückzahl ist das Wissen über eine Streuung von Betrag und Phase notwendig, da sonst, wie dargelegt, die Ergebnisse zu große Ungenauigkeiten beinhalten.

3.2.3 Betrachtung von 25 Lampen gleichen Typs

Die Messungen zur Erfassung der Streuungen für gleichartige Lampen liegen für 4 Lampentypen vor. Insgesamt weisen die Lampentypen 1-4 keine Unterschiede auf, d.h. weder vergrößert sich der Schwankungsbereich der erfassten Ströme noch verringert sich dieser signifikant. Der Unterschied besteht wie aus Kapitel 3.2.1 hervor geht in den mittleren Ausgangslagen für den Betrag und Phase der Ströme. Im Folgenden werden die Ergebnisse für Lampentyp 4 beschrieben.

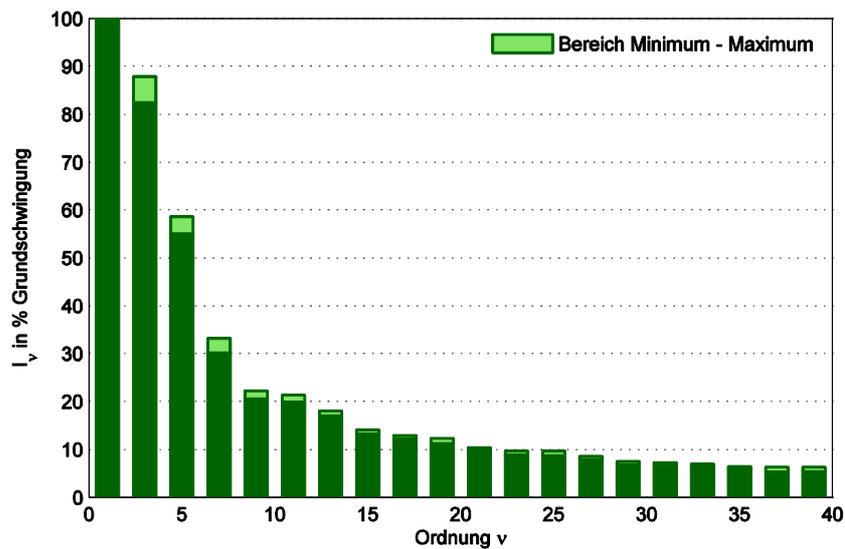


Abbildung 3.7 Zusammenfassung des Stromspektrums für 25 Lampen (Typ 4)

Ordnung I_v	Min in %	Max in %
3	82.2	88.9
5	54.5	60.0
7	29.7	33.3
9	20.5	22.6
11	19.9	22.1
13	16.7	18.6
15	13.1	14.7
17	12.1	13.5
19	11.2	12.9

Tabelle 3.6 Minimum und Maximum von OS-Strömen bezogen auf GS von 25 Lampen gleichen Typs

Ein Vergleich des Spektrums in Abbildung 3.7 mit den Ergebnissen aus Kapitel 3.2.1 lässt eine deutlich geringere Schwankungsbreite bei Lampen gleichen Typs in der Amplitude erkennen. Vor allem die in Kapitel 3.2.1 festgestellten breiten Bereiche der Amplituden für 5., 7. und 9. OS-Strom haben deutlich abgenommen. Ebenso sind die Bereiche der Winkel für die Stromzeiger, wie in Abbildung 3.8 gezeigt schmaler. Die Grundschiwingung variiert zwischen 25° und 29° . Selbst die 9. Oberschiwingung befindet sich einem Bereich von -55° bis -33° (Tabelle 3.7).

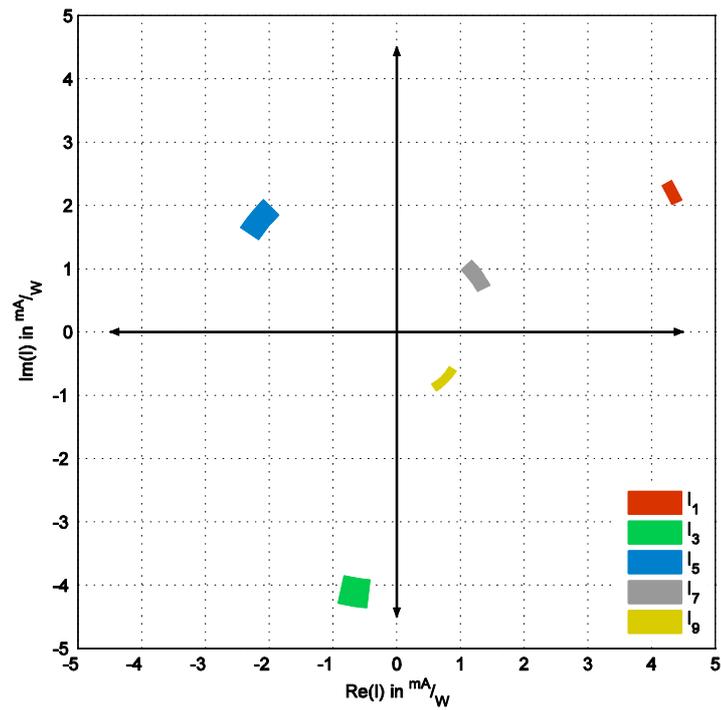


Abbildung 3.8 Bereich der auf die Wirkleistung bezogenen Stromzeiger einiger OS-Ströme für 25Lampen gleichen Typs

Ordnung φ_v	Min in $^\circ$	Max in $^\circ$
1	25.7	29.7
3	-102.0	-95.4
5	135.6	146.8
7	27.7	44.1
9	-55.5	-33.5

Tabelle 3.7 Minimum und Maximum der OS-Winkel bei 25 Lampen gleichen Typs

3.2.4 Summation von 25 gleichen Lampen

Erwartungsgemäß ergibt sich aufgrund der geringen Schwankungsbreiten bei der Summation von OS-Strömen von ESL gleicher Type nur eine Abweichung von -2.0 bis 3.4 % (Tabelle 3.8). Bei den in Abbildung 3.9 dargestellten Stromzeigern sind die Endpunkte beider Zeiger durch die geringe Winkelstreuung nahezu ident. Eine Verlässlichkeit der Hochrechnung von wenigen Lampen auf eine hohe Stückzahl gleichartiger Lampen ist somit gegeben. Es genügt für die wesentlichen OS (bis zur 9.) die Rechnung mittels linearer Addition, da diese genügend genaue Ergebnisse liefert.

Ordnung v		1	3	5	7	9
lin. Addition	mA	1710	1351	822	426	362
vekt. Addition	mA	1710	1351	822	423	358
Messung	mA	1687	1324	795	418	369
Differenz zu Messung		1	3	5	7	9
lin. Addition	%	1.4	2.1	3.4	2.0	-2.0
vekt. Addition	%	1.4	2.1	3.4	1.2	-3.0

Tabelle 3.8 Ergebnisse der linearen und vektoriellen Addition und Gegenüberstellung mit Messung

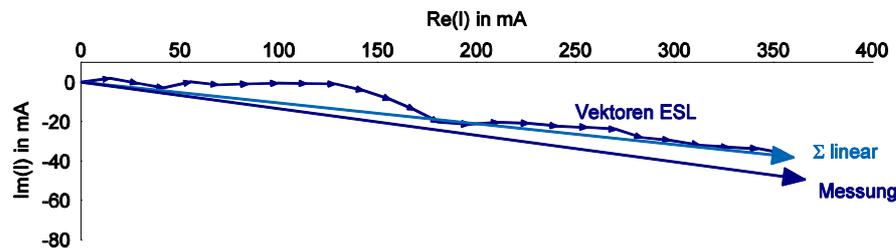


Abbildung 3.9 Vektordiagramm zur Addition des 9. OS-Stromes von 25 ESL gleichen Typs. Gegenüberstellung von Addition und Messung

Auch bei ESL gleichen Typs weicht die vektorielle Addition ca. in demselben Maße (-3 bis 3.4 %) von der Messung ab. Auch hier ist eine Differenz der Leistungsaufnahme die Ursache. Die gemessene Leistungsaufnahme der insgesamt 25 ESL ist bei Zusammenschaltung um 2.2 % größer als die rechnerische Summierung der 25 Einzelleistungen.

3.2.5 Lampenkollektiv

Zusammenfassend lässt sich aus den Kapiteln betreffend die Summierung einzelner Lampen aufgrund der Streubereiche eine Änderung des gesamten Stromspektrums erwarten. In Abbildung 3.10 wird mittels zeitlichen Verläufen und dazugehörigem Spektrum des Stroms dieser Effekt demonstriert.

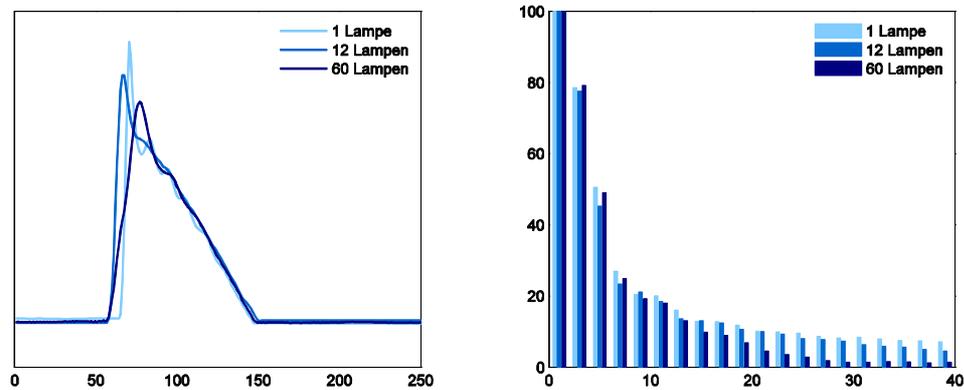


Abbildung 3.10 Zeitlicher Verlauf und Spektrum bei unterschiedlicher Anzahl von ESL. Normierte Darstellung des zeitlichen Verlaufs für eine bessere Vergleichbarkeit

Bei Erhöhung der Lampenzahl kommt es zu Überlagerungseffekten der OS vor allem im Bereich höherer Ordnung (Kapitel 3.2.1 und 3.2.4). Dies wirkt sich in der Verringerung der Welligkeit des Stromes (Abbildung 3.10 links) und der Abnahme der OS- Anteile ab der 15. Ordnung bei größerer Anzahl von ESL aus (Abbildung 3.10 rechts). Bis zur 11. Ordnung des Stromes (550 Hz) ist keine bedeutende Abnahme zu beobachten. Darüber hinaus ist besonders bei 60 ESL die Abnahme ausgeprägt. Daraus ergibt sich in Folge ein Sinken des Gesamtverzerrungsgrades (THD_I).

Anzahl	THD _I in %
1	108.6
12	102.8
60	101.3

Tabelle 3.9 THD_I bei unterschiedlicher Anzahl von ESL

3.3 Einflüsse der Versorgungsspannung auf das Verhalten der Energiesparlampe

Die Abhängigkeit des Stroms der ESL wird im folgenden Abschnitt anhand einer einzelnen ESL dargestellt, da die Stromaufnahme der 16 unterschiedlichen ESL sich nur in den absoluten Werten unterscheidet (vgl. Kapitel 3.2.1), die Tendenzen der Abnahme bzw. Zunahmen der OS-Ströme sind bei allen in gleicher Art festzustellen. Eine genaue Darstellung aller 16 ESL befindet sich im Anhang.

3.3.1 Amplitude der Versorgungsspannung

In den folgenden Grafiken finden sich die Verläufe der jeweils ausgewerteten Parameter (P , S , λ , I_v) für eine ESL (blau) und zum Vergleich einer herkömmlichen Glühbirne (grün).

Für die Versorgungsspannung wird eine rein sinusförmige Spannung gewählt, um Einflüsse von Oberschwingungen in der Spannung auszuschließen.

Zur Vereinfachung wird eine Normierung vorgenommen, d.h. 100 Prozent entsprechen im Fall der Spannung 230 V und gleichzeitig wird, die zugehörige aufgenommene Leistung (gilt für Wirk- und Scheinleistung) mit 100 Prozent festgelegt.

Eine Veränderung des Wertes der Versorgungsspannung von 90 bis 110% bewirkt bei P und S eine gleichartige lineare Änderung mit der Steigung (Leistungskennzahl k_P) von näherungsweise 1 (Abbildung 3.11). Tabelle 3.10 fasst die Messwerte für eine ESL zusammen.

U	%	90	95	98	99	100	101	102	105	110
P	%	89.9	95.5	98.4	99.9	100	101.2	102.4	106.3	111.7
S	%	88.5	94.7	98.1	99.6	100	101.4	102.7	106.9	113.2
λ	--	0.6	0.6	0.596	0.595	0.594	0.593	0.593	0.591	0.587

Tabelle 3.10 Übersicht von P , S , und λ in Abhängigkeit der Amplitude der Spannung

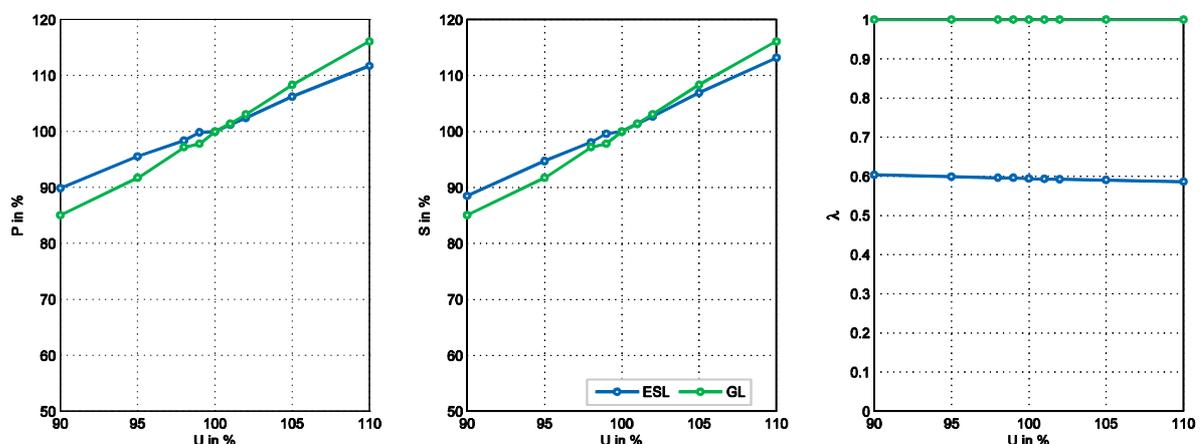


Abbildung 3.11 Übersicht von Wirkleistung, Scheinleistung und Leistungsfaktor bei veränderlicher Spannungsamplitude

Leistungskennzahl:

$$k_p = \frac{\Delta P}{\Delta U} = 0.97 \dots 1.03 \quad (3.1)$$

Die Glühlampe sollte, im Vergleich zur ESL einen quadratischen Zusammenhang zwischen Leistung und Spannung, wegen ihres rein ohmschen Verhaltens, besitzen. Dies stimmt hier nur bedingt, die Steigung für die Glühlampe ist etwas zu gering. Der Widerstand der Glühbirne besitzt eine Temperaturabhängigkeit, die ihn je nach anliegender Spannung etwas erhöht bzw. vermindert.

Da sich die Wirkleistungsaufnahme der ESL nur aus den Grundschwingungskomponenten von U und I ergibt, und die Wirkleistung im selben Maße steigt wie die Spannung bleibt folgedessen I_1 konstant. Das Sinken des Leistungsfaktors resultiert aus einer Steigerung der OS-Amplituden des Stromes ab der 3. Ordnung.

In Abbildung 3.12 ist die Wirkung durch eine Änderung der Versorgungsspannung auf einzelne Ordnungen des Stromes der Energiesparlampe dargestellt.

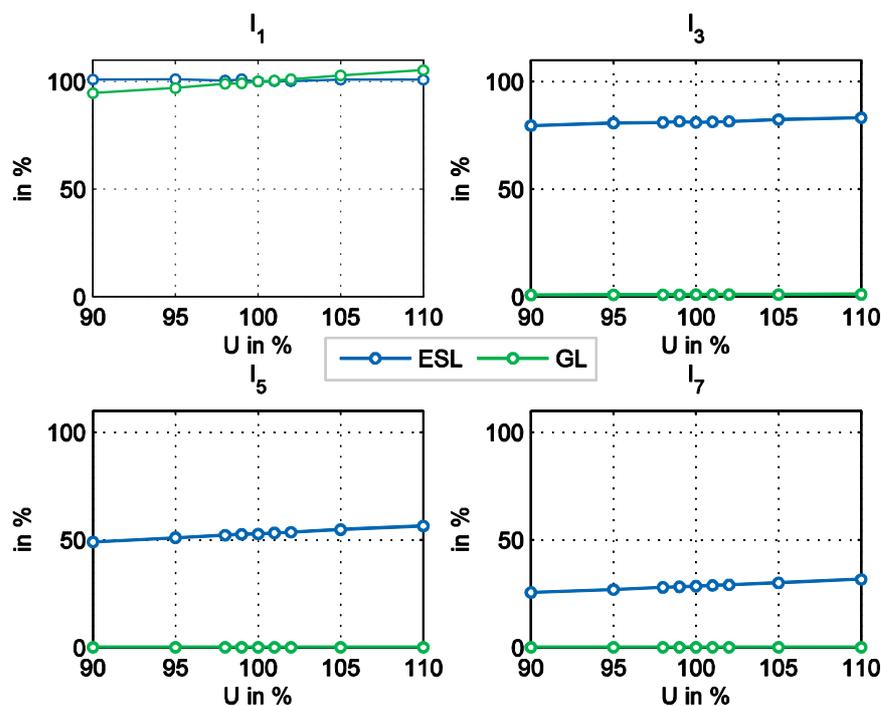


Abbildung 3.12 Auswirkung der Amplitude der Versorgungsspannung auf OS-Ströme

Die Spannung im Niederspannungsnetz ist keineswegs als konstant anzusehen, jedoch der Bereich von $\pm 10\%$ der Spannungsamplitude wird nur in den seltensten Fällen voll ausgenutzt. Messungen im Niederspannungsnetz ergeben meist größere Werte als 230 V. Der Bereich der Spannung bewegt sich je nach Last und Tageszeit im Bereich von -2% bis $+5\%$. Somit ist die Auswirkung der Amplitude auf das Stromspektrum der ESL als gering anzusehen. Als relevante Änderung verbleibt die Leistungsänderung. In Tabelle 3.11 finden sich die numerischen Angaben der wichtigsten OS-Pegel.

U	%	90	95	98	99	100	101	102	105	110
I ₁	%	101.0	101.1	100.6	101.1	100.0	100.2	100.3	100.8	100.8
I ₃	%	79.6	80.8	81.1	81.5	81.0	81.3	81.5	82.4	83.2
I ₅	%	49.0	51.0	52.2	52.6	52.8	53.6	54.7	54.7	56.5
I ₇	%	25.5	26.9	27.9	28.1	28.4	28.8	29.0	30.0	31.6

Tabelle 3.11 Übersicht der OS-Ströme bezogen auf die GS in Abhängigkeit der Amplitude der Versorgungsspannung

3.3.2 Amplituden der Oberschwingungen in der Versorgungsspannung

Anhand zweier über jeweils einen Tag laufenden Messreihen an der TU Graz und einem Einfamilienhaus liegen vorab OS-Pegel und deren Phasenlagen in der Versorgungsspannung vor (Kapitel 2.6). Um den Einfluss der Phasenlage der OS der Spannung zu berücksichtigen, werden die Phasenwinkel während der Messung konstant gehalten (Tabelle 3.12). Die festgelegten Werte entsprechen ungefähr den Mittelwerten der Phasenlagen von OS-Spannungen aus den durchgeführten Messungen im NS-Netz (Kapitel 2.6).

Zum Erkennen klarer Tendenzen werden die OS-Amplituden bis zu einem Wert von 4% der Grundschwingung erhöht.

	U ₃	U ₅	U ₇	U ₉
φ_v in °	150	-150	-20	-140

Tabelle 3.12 Phasenlagen von Spannungsharmonischen für die Messung

Auswirkung auf Leistungsaufnahme

In Abbildung 3.13 sind die Auswirkungen von 4 OS-Spannungen auf Wirk- und Scheinleistung dargestellt. Eine Erhöhung der Oberschwingungsbelastung der Versorgungsspannung bewirkt nicht automatisch eine Erhöhung der Scheinleistung, sondern es kann auch zu einem Rückgang wie im Fall von U_5 kommen.

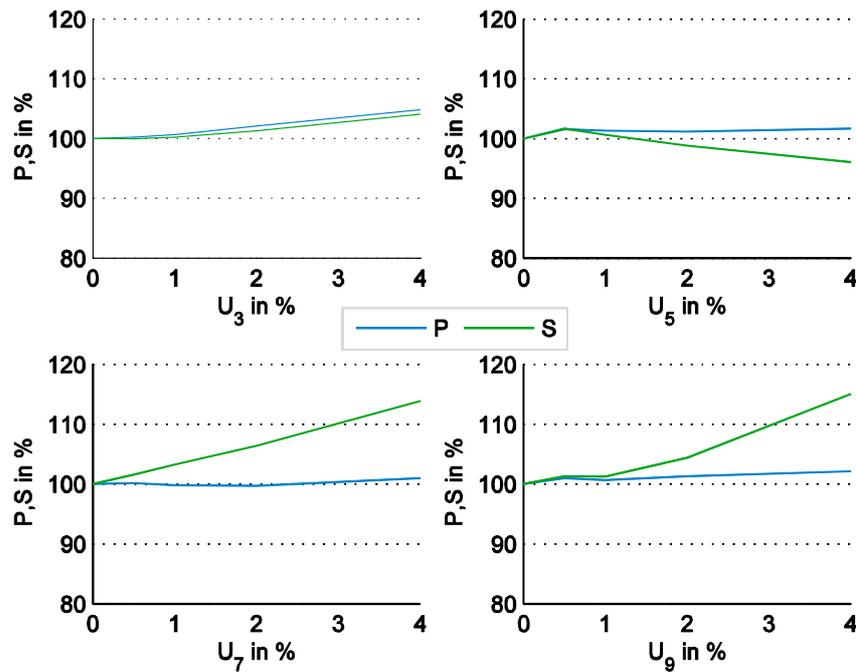


Abbildung 3.13 Abhängigkeit von S und P von OS in der Versorgungsspannung

Da sich S gegenüber P überproportional ändert, zieht dies auch eine Änderung des Leistungsfaktors mit sich. Abbildung 3.14 zeigt die 4 Verläufe des Leistungsfaktors bei Erhöhung der OS-Amplituden je nach eingprägten Spannungsüberschwingungen.

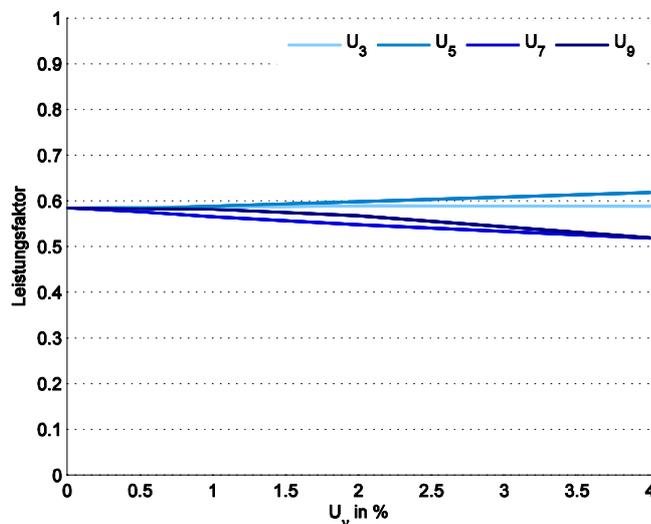


Abbildung 3.14 Veränderung des Leistungsfaktors bei Auftreten von OS in der Versorgungsspannung

Am Verhalten von P und S im Fall des Auftretens einer dritten OS-Ordnung kann ein in diesem Fall besonders ausgeprägter, interessanter Effekt beobachtet werden. Zusätzliche Harmonische in der Spannung führen zu einer Veränderung der Phasenlage zwischen Grundschwingungsstrom und Spannung (Abbildung 3.15). Der $\cos(\varphi_1)$ ändert sich. Die Wirkleistungskomponente setzt sich nur aus jeweils Strömen und Spannungen gleicher Frequenz und deren Phasenverschiebung zueinander zusammen, grundsätzlich dominiert die Grundschwingungskomponente mit $U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\varphi_1)$. Dies führt zur beobachteten Wirkleistungsänderung mit einer Differenz von 2 % bis 4 % (Abbildung 3.13). Besonders U_3 führt zu einer Verringerung von φ_1 (Abbildung 3.15) und damit zu einer Erhöhung der Wirkleistungsaufnahme. Aufgrund des Zusammenhangs von φ_1 und der Grundschwingungsblindleistung Q_1 ist deren Änderung in derselben Größenordnung wie P. Für die Änderung der Scheinleistung ist damit die Verzerrungsblindleistung D hauptverantwortlich.

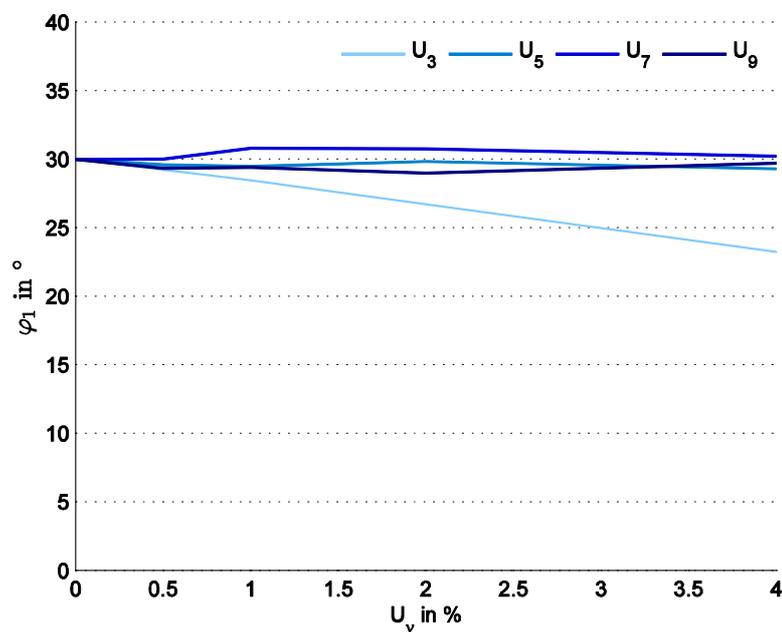


Abbildung 3.15 Veränderung von φ_1 bei Auftreten verschiedener Harmonischer in der Versorgungsspannung

Tabelle 3.13 fasst die in den Abbildungen grafisch dargestellten Abhängigkeiten numerisch zusammen.

U_3	%	0	0.5	1	2	4
P	%	100	100.3	100.7	102.1	104.8
S	%	100	100.0	100.2	101.3	104.1
λ	%	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59
U_5	%	0	0.5	1	2	4
P	%	100	101.5	101.3	101.2	101.6
S	%	100	101.7	10.6	98.8	96.1
λ	%	0.58	0.58	0.59	0.60	0.62
U_7	%	0	0.5	1	2	4
P	%	100	100.1	99.8	99.7	101.0
S	%	100	101.6	103.3	106.4	113.8
λ	%	0.58	0.58	0.56	0.55	0.52
U_9	%	0	0.5	1	2	4
P	%	100	101.0	100.6	101.3	102.1
S	%	100	101.3	101.2	104.4	115.1
λ	%	0.58	0.58	0.58	0.57	0.52

Tabelle 3.13 Übersicht von S und P in Abhängigkeit von OS-Spannungen

Auswirkung auf Stromberschwingungen

Bereits der zeitlichen Verlauf der Stromaufnahme der ESL in Abbildung 3.16 lässt die Auswirkungen von OS-Pegeln in der Versorgungsspannung erkennen. Die dritte Harmonische bewirkt keine allzu große Änderung der Stromform, nur verschiebt sie den Startzeitpunkt des Stromflusses. Dies bewirkt die erwähnte Änderung des Winkels φ_1 . Eine Abweichung von der charakteristischen Stromform ist besonders bei U_7 und U_9 mit 4% zu erkennen. Es kommt zu zwei Stromspitzen, wobei die zweite deutlich kleiner ist. Das erste Strommaximum ist gegenüber dem Effektivwert bei sinusförmigem Verlauf um 75% höher. Dies ist auch auf die mehr aufgenommene Scheinleistung zurück zu führen.

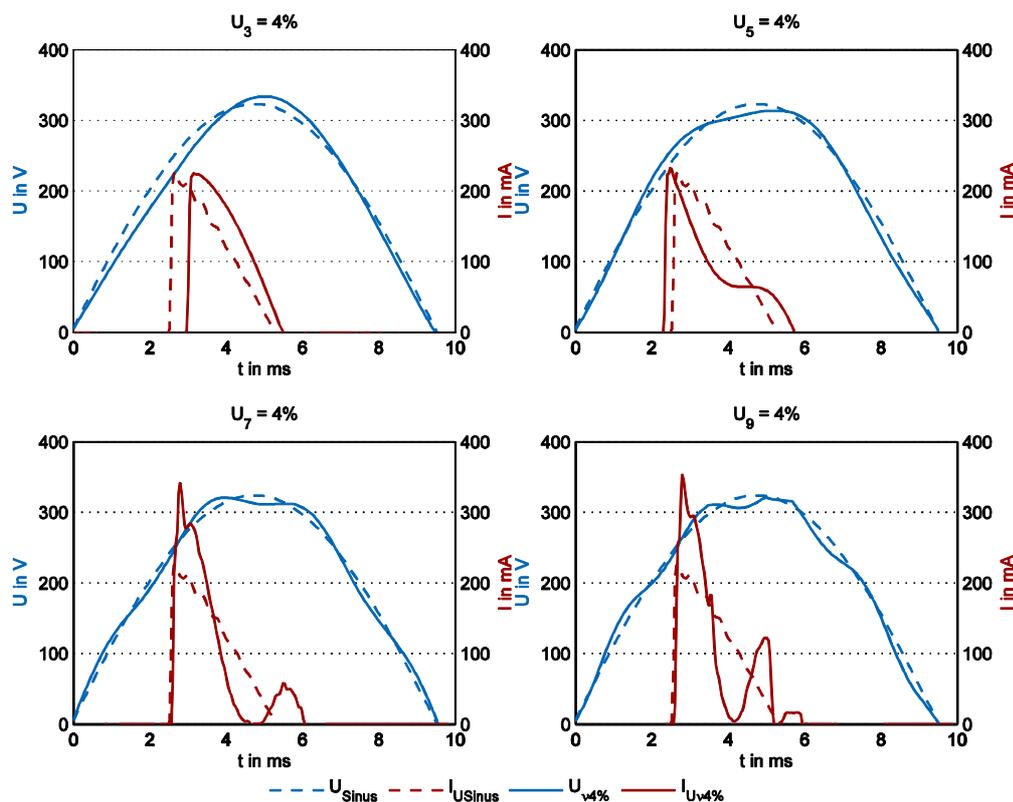


Abbildung 3.16 Vergleich der Stromverläufe bei rein sinusförmiger Spannung und OS-Belastung von 4%

Legt man den zeitlichen Verlauf der Ströme auf das Spektrum um, so ergeben sich die Kennlinien in Abbildung 3.17, Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19.

In Abbildung 3.17 werden unterschiedliche OS-Ströme in Abhängigkeit einer Ordnung der Oberschwingung der Spannung dargestellt. Dies gibt einen Überblick über die möglichen Auswirkungen auf den Strom. Durch die dritte Harmonische in der Spannung ergeben sich die geringsten Auswirkungen.

Einen der stärksten Einflüsse zeigt vor allem die 9. Oberschwingung der Spannung, sie erhöht neben I_7 (+70%) besonders stark I_9 (+200%). Das Auftreten von U_5 wirkt sich auf I_3 und I_5 sogar mindernd aus, während bei I_7 und I_9 eine Erhöhung feststellbar ist. Auch bei U_7 und U_9 zeigen sich die Änderungen auf I_3 und I_5 nicht in diesem Ausmaße. Insgesamt zeigt sich, dass höhere Ordnungen der Spannungen eine stärkere Wirkung auf den Strom besitzen. Die detaillierte Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 3.14 zu finden.

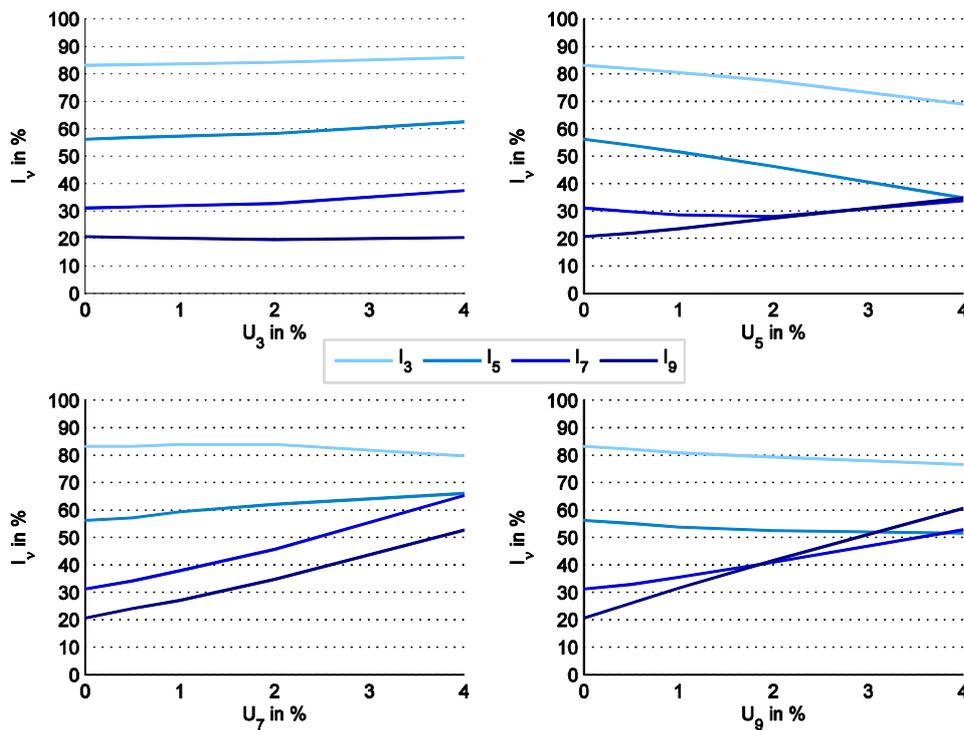


Abbildung 3.17 Auswirkung der Amplitude der OS in der Versorgungsspannung auf die OS-Ströme der ESL

Die Grafiken in Abbildung 3.18 fassen jeweils die gleichen OS-Ströme zusammen. Dadurch wird die Abhängigkeit eines OS-Stromes von unterschiedlichen Harmonischen in der Versorgungsspannung besser verdeutlicht. Die Beeinflussung von Spannungsharmonischen auf I_3 ist vergleichsweise gering. Bei I_7 und I_9 lässt sich auf der einen Seite, die schon beschriebene starke Zunahme durch U_7 und U_9 erkennen. Der Einfluss durch U_3 ist deutlich geringer, sogar ein Gleichbleiben des Wertes von I_9 ist möglich.

Neben der Beeinflussung der OS- Pegel ist auch mit einer Änderung der zugehörigen Phasenlagen zu rechnen. Die Änderung für die Grundschiwingung wurde bereits in Abbildung 3.15 dargestellt. Eine Auswertung für die OS höherer Ordnung findet sich in Abbildung 3.19. Besitzt U_3 im Vergleich mit den anderen OS die geringste Auswirkung auf die Beträge, so wirkt sie sich bei Phasenlagen am stärksten aus. Schon bei φ_1 führt U_3 zur stärksten Änderung (Abbildung 3.15). Für die Winkel von I_5 , I_7 und I_9 kommt es zu einer Abnahme. Der Winkel von I_3 bleibt bei allen betrachteten OS-Spannungen konstant. Obwohl sich die Verläufe bei U_7 und U_9 am deutlichsten ändern, ist die Winkeländerung nicht so ausgeprägt.

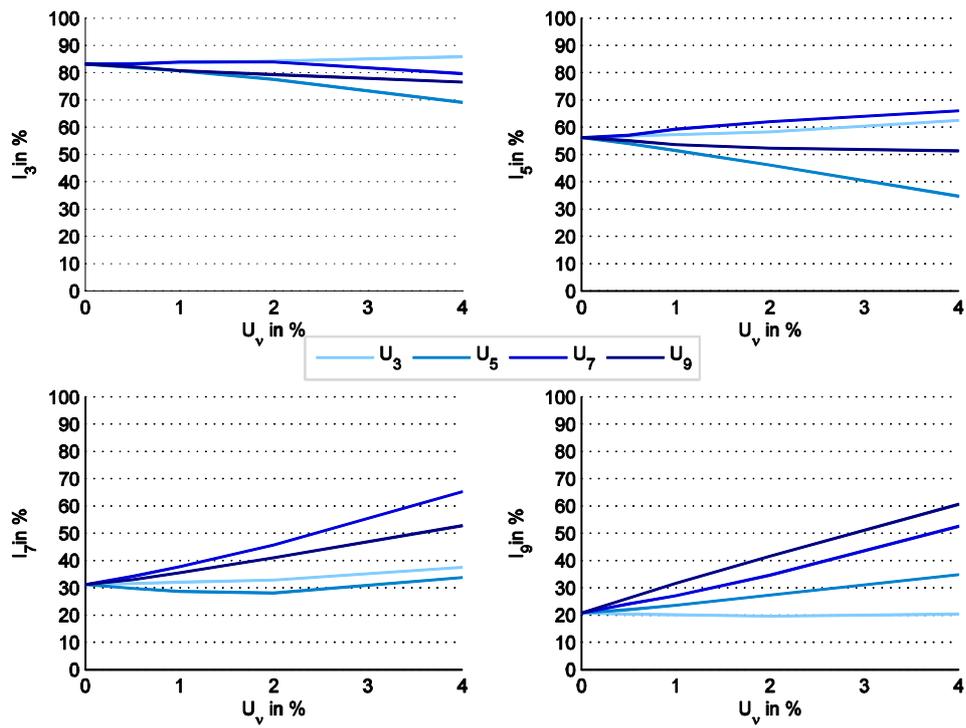


Abbildung 3.18 Auswirkungen auf die OS-Ströme der ESL aufgrund von OS in der Versorgungsspannung

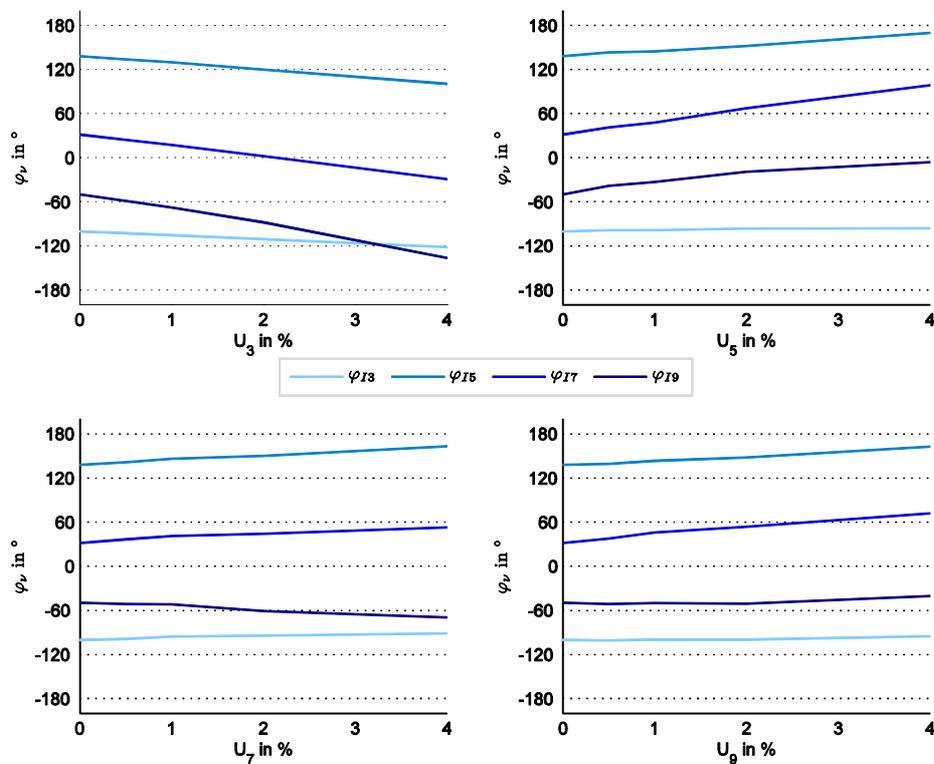


Abbildung 3.19 Auswirkung auf die Phasenlagen von OS-Strömen der ESL durch OS in der Versorgungsspannung

Tabelle 3.14 fasst die Ergebnisse für die Betragsänderung der Ströme aufgrund von OS-Pegeln zusammen.

	U ₃	%	0	0.5	1	2	4	ΔI
1	I ₃	%	83.14	83.78	83.60	84.22	85.94	3.37
2	I ₅	%	56.23	56.83	57.33	58.37	62.63	11.38
3	I ₇	%	31.15	31.49	32.00	32.73	37.40	20.06
4	I ₉	%	20.67	20.25	19.98	19.48	20.16	-2.47

	U ₅	%	0	0.5	1	2	4	ΔI
5	I ₃	%	83.14	81.91	80.64	77.60	69.16	-16.82
6	I ₅	%	56.23	54.0	51.55	46.2	34.77	-34.68
7	I ₇	%	31.15	29.76	28.68	28.10	33.80	8.51
8	I ₉	%	20.67	21.88	23.46	27.23	34.61	67.44

	U ₇	%	0	0.5	1	2	4	ΔI
9	I ₃	%	83.14	83.19	83.91	83.89	79.72	-4.11
10	I ₅	%	56.23	57.05	59.26	62.0	66.0	17.38
11	I ₇	%	31.15	34.17	37.80	45.72	65.27	109.53
12	I ₉	%	20.67	24.12	27.07	34.70	52.62	154.57

	U ₉	%	0	0.5	1	2	4	ΔI
13	I ₃	%	83.14	82.18	80.76	79.30	76.59	-7.88
14	I ₅	%	56.23	55.08	53.66	54.4	51.40	-9.59
15	I ₇	%	31.15	32.96	35.58	41.12	52.87	69.73
16	I ₉	%	20.67	26.11	31.63	41.6	60.62	193.28

Tabelle 3.14 Übersicht der OS-Ströme der ESL in Abhängigkeit der Amplituden von OS in der Spannung

3.3.3 Überlagerung mehrerer Oberschwingungen

In der Versorgungsspannung tritt nicht nur eine Ordnung an OS auf. Deswegen wird nun das Zusammenspiel mehrerer gleichzeitig auftretender OS untersucht. Mit einem Berechnungsmodell, das auf der Linearität von Spannungsüberschwingungen basiert, wird versucht, eine Vorhersage für die Stromüberschwingungen zu treffen. Eine Messung dient der Überprüfung. Die Berechnungen gehen davon aus, dass sich die in Kapitel 3.3.2 festgestellten Abhängigkeiten für einzelne OS linear überlagern. Die Summe der Änderungen aufgrund einzelner OS in der Spannung soll sich demnach in gleicher Weise auf die Stromharmonischen auswirken, wie die Summe von auftretenden OS in der Spannung.

Annahme:

$$I_{\Delta v(U_{v1}, \dots, U_{vk})} = \sum_{i=1}^k I_{\Delta v(U_{vi})} \quad (3.2)$$

Beispiel:

Wird durch die 5. Spannungsharmonische eine Abnahme bei I_5 von 10 % im Vergleich mit dem Wert bei sinusförmiger Spannung festgestellt und durch U_7 eine Abnahme von 15 %, so wird in der Berechnung angenommen, dass bei Auftreten beider OS in der Versorgung I_5 um 25 % abnimmt.

Für das Experiment wurden zwei, drei und vier gleichzeitig auftretende OS angenommen.

	1	2	3
	U_5, U_7	U_5, U_7, U_9	U_3, U_5, U_7, U_9
Anteil in %	0.5 – 4.0	0.5 – 4.0	0.5 – 4.0

Tabelle 3.15 Spannungsamplituden der OS

Die Abweichung berechnet sich aus der Differenz beider Ströme bezogen auf den gemessenen Strom, der als Referenz dient.

$$\Delta I_v = \frac{I_{\text{Berechnung}} - I_{\text{Messung}}}{I_{\text{Messung}}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

In Abbildung 3.20 und Abbildung 3.21 sind die Verläufe einzelner OS-Ströme in Abhängigkeit einer Spannungsharmonischer in hellblau und strichliert dargestellt. Der dunkelblaue durchgezogene Verlauf zeigt den rechnerischen Verlauf bei Vorhandensein von 5. und 7. OS in der Spannung. In grün ist der gemessenen Verlauf dargestellt und die grüne Fläche zeigt die Differenz beider Verläufe an. Unter den Grafiken mit den Verläufen für die OS-Ströme ist die Abweichung ΔI_v prozentuell dargestellt. Es zeigt sich, dass mit zunehmender Amplitude der OS der Grad der Rechengenauigkeit kleiner wird. Schon bei nur zwei OS zeigen sich Abweichungen in den Ergebnissen von über 10 % (Tabelle 3.16). Bei den Rechenabweichungen lassen sich auch keine Tendenzen erkennen, d.h. die Berechnungsergebnisse sind standardmäßig nicht größer oder kleiner als die Messergebnisse. Bei I_3 und I_9 sind die berechneten Werte zwar immer zu groß, aber bei I_5 und I_7 sind die Abweichungen sowohl positiv wie negativ.

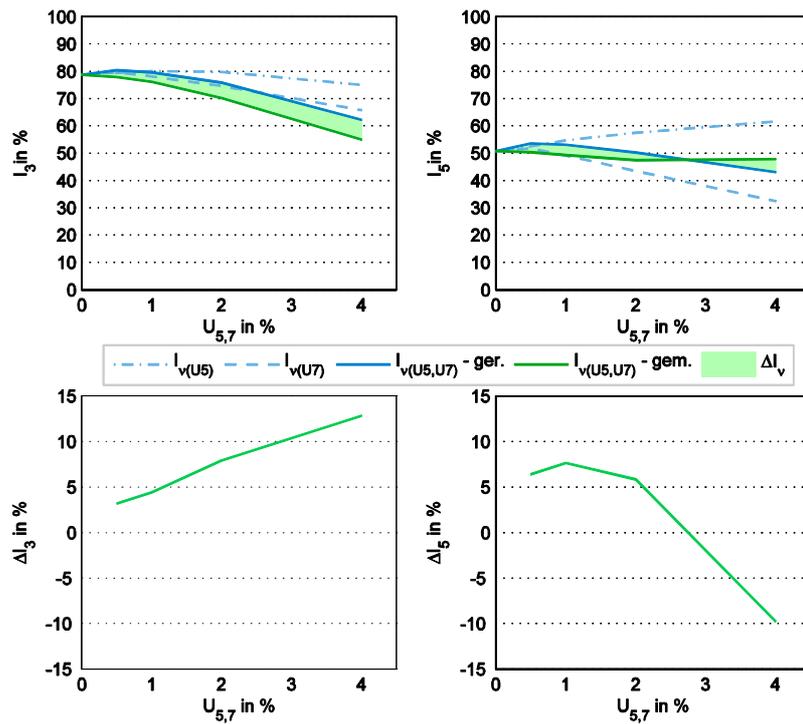


Abbildung 3.20 Darstellung des Verlaufs von 3. und 5. OS-Strom (oben), sowie Abweichung von Messung und Berechnung (unten), bei Überlagerung der 5. und 7. Harmonischen in der Spannung

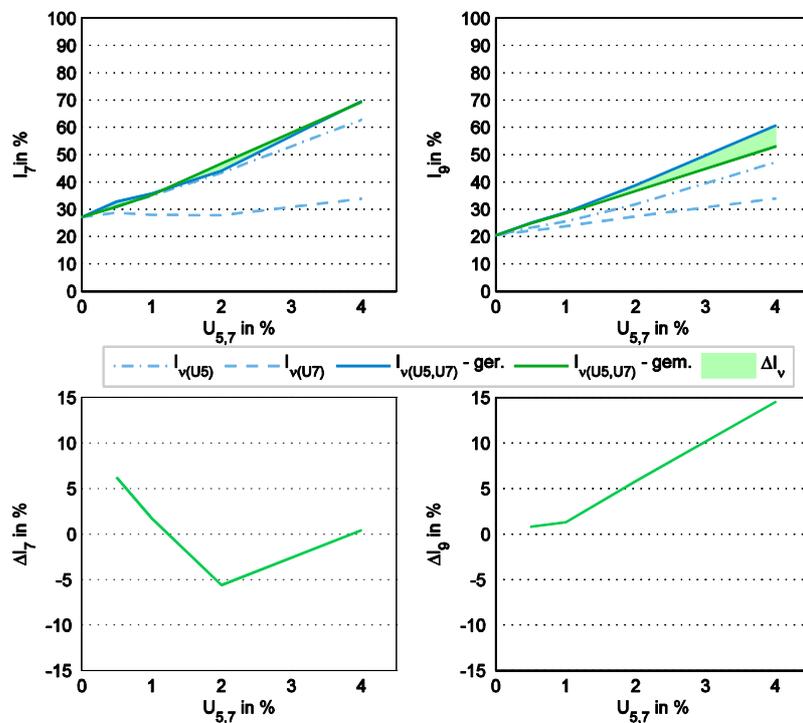


Abbildung 3.21 Darstellung des Verlaufs von 7. und 9. OS-Strom (oben), sowie Abweichung von Messung und Berechnung (unten), bei Überlagerung der 5. und 7. Harmonischen in der Spannung

Bei drei und vier überlagerten OS ergeben sich für die Abweichungen der Berechnung für einen Bereich der OS-Spannungen bis 2 % Fehler in der Größenordnung von maximal $\pm 10\%$. Es ergeben sich bis dahin keine größeren Fehler als bei 2 OS in der Spannung. Bei Amplituden über 2 % kommt es zu gravierenderen Abweichungen. Im Einzelfall tritt eine Abweichung von 66 % auf. In Abbildung 3.22 sind die Entwicklungen der Abweichungen für zwei, drei und vier in der Spannung vorhandene OS gezeigt.

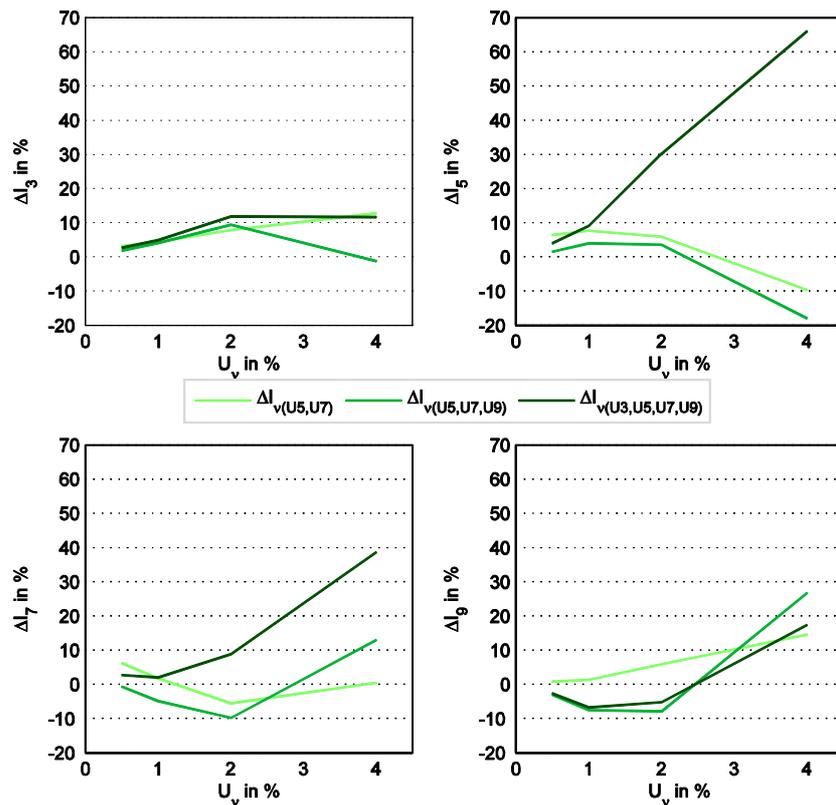


Abbildung 3.22 Abweichung von Berechnung zu Messung bei Überlagerung von 2, 3 und 4 Oberschwingungen in der Spannung

Anhand der unterschiedlichen Verläufe für die Abweichungen ΔI_v in Abbildung 3.22 ergibt sich, dass bei Überlagerung mehrerer OS die in Kapitel 3.3 dargelegten Einzeleffekte nicht mathematisch überlagern lassen. Allerdings lassen sich aus der Berechnung grobe Tendenzen feststellen. Der Nachweis der Einzeleffekte zeigt die Beeinflussbarkeit des Stromes der ESL. Bei Überlagerung von OS werden einige dieser Effekte teilweise kompensiert.

U_v in %	0.5	1	2	4
	ΔI_3 in %			
$U_{5,7}$	3.2	4.4	7.9	12.8
$U_{5,7,9}$	1.8	4.1	9.4	-1.2
$U_{3,5,7,9}$	2.7	4.9	11.8	11.6
	ΔI_5 in %			
$U_{5,7}$	6.4	7.6	5.8	-9.8
$U_{5,7,9}$	1.5	4.0	3.5	-18.1
$U_{3,5,7,9}$	4.0	9.1	30.3	66.1
	ΔI_7 in %			
$U_{5,7}$	6.2	1.7	-5.6	0.4
$U_{5,7,9}$	-0.6	-4.9	-9.8	13.0
$U_{3,5,7,9}$	2.7	2.0	8.7	38.6
	ΔI_9 in %			
$U_{5,7}$	0.8	1.3	5.8	14.5
$U_{5,7,9}$	-3.1	-7.5	-7.9	26.8
$U_{3,5,7,9}$	-2.6	-6.7	-5.2	17.4

Tabelle 3.16 Differenz überlagerte OS-Spannungen – Vergleich von rechnerischer Ermittlung und Messung

Die Angaben der prozentuellen Abweichung ΔI_v in Tabelle 3.16 liefern einen Überblick über die ermittelten Werte.

3.3.4 Phasenlage der Oberschwingung

Neben der Amplitude der OS in der Versorgungsspannung zeigt auch eine Veränderung deren Phasenlage bei gleicher Amplitude Auswirkungen auf das Stromspektrum. Die Variation der Phasenlage der 5. Spannungsharmonischen von 0° bis 360° ergibt eine Änderung der Beträge der OS-Ströme der ESL. Die maximalen und minimalen erfassten Werte des Strombetrages liegen bis zur 7. Stromharmonischen winkelmäßig relativ nahe beieinander. I_9 besitzt bei seinen Maxima und Minima davon stärker abweichende Werte.

	Minimum	φ_{U5} bei min	Maximum	φ_{U5} bei max
	%	$^\circ$	%	$^\circ$
I_3	74	245	86	84
I_5	40	245	63	73
I_7	20	281	40	94
I_9	13	323	28	180

Tabelle 3.17 Maximum und Minimum der OS-Strombeträge und dazugehörige Phasenlagen von U_5

In Abbildung 3.23 sind die Verläufe für 4 Stromharmonische dargestellt. Die horizontale grüne Linie kennzeichnet dabei den Wert des OS-Stroms bei rein sinusförmiger Versorgungsspannung.

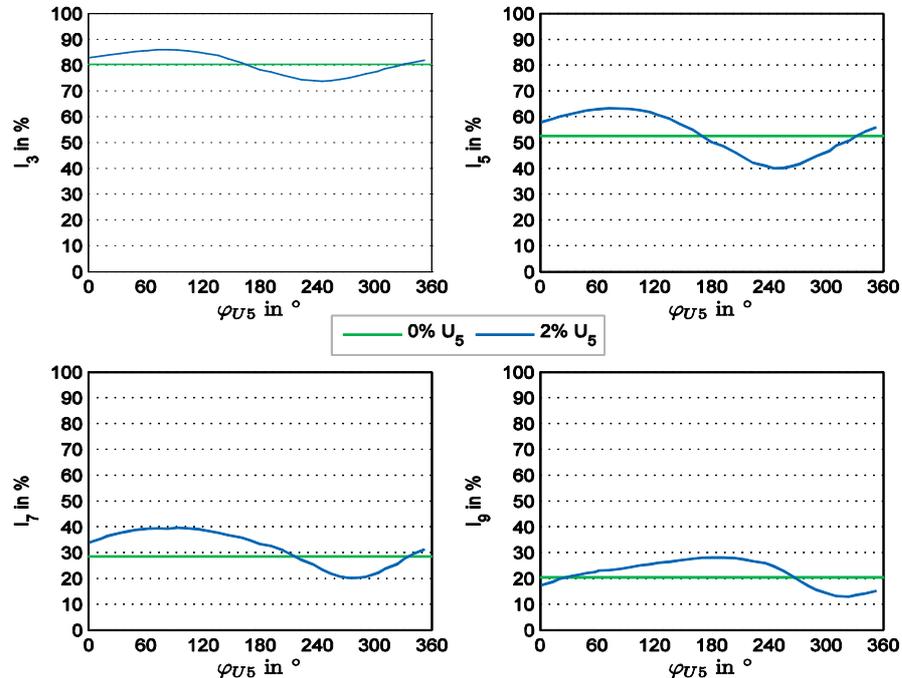


Abbildung 3.23 Verlauf von OS-Strömen (3,5,7,9) bei veränderlicher Phasenlage der 5. OS bei 2% Amplitude in der Versorgungsspannung

3.4 Betrachtung der Gesamtverzerrung

Für die Angabe der Verzerrung wird anstelle der einzelnen OS-Pegel oft die Gesamtverzerrung (THD) verwendet. Trotz des Informationsverlustes des genauen Frequenzspektrums und der Phasenlagen der OS bei der Berechnung aus der Summe der OS kann die THD gut als Vergleichsgröße verwendet werden. Mit zwei unterschiedlich verzerrten Spannungen wird in den folgenden zwei Kapiteln zuerst die Wirkung auf die Stromverzerrung beobachtet und mit dem Ergebnis einer bereits durchgeführten Studie [16] verglichen und dann wird die Steigerung der Verzerrung der Spannung durch ESL beobachtet.

Spannungsabfall an Impedanz

Grundsätzlich kommt es durch einen Strom an einer Impedanz zu einem Spannungsabfall. Ist der Strom, wie bei der ESL überschwingungsbehaftet, so ist auch der Spannungsabfall nicht rein sinusförmig. Besitzt die Impedanz nicht nur einen ohmschen sondern auch einen induktiven Anteil so werden die Oberschwingungen gemäß ihrer Ordnung verstärkt.

Für den Spannungsabfall über eine Impedanz geht neben der Stärke des Stromes auch dessen Frequenz ein.

Bei einer Induktivität gilt allgemein:

$$u_L = \sum_{v=1}^N 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot v \cdot L \cdot i_v \quad (3.4)$$

Betrachtung auf 50 Hz und deren Vielfache beschränkt

Ein Strom höherer Ordnung (größere Frequenz) bewirkt über eine Induktivität einen mit seiner Ordnung verstärkten Spannungsabfall.

Versorgungsspannungen

Die beiden verwendeten Messspannungen unterscheiden sich in wesentlichen Merkmalen voneinander (Abbildung 3.25 und Abbildung 3.26). Beim zeitlichen Verlauf der Spannung wird darauf geachtet, dass auch mit höheren Verzerrungsgraden beide Spannungen noch Grundzüge einer sinusförmigen Spannung besitzen.

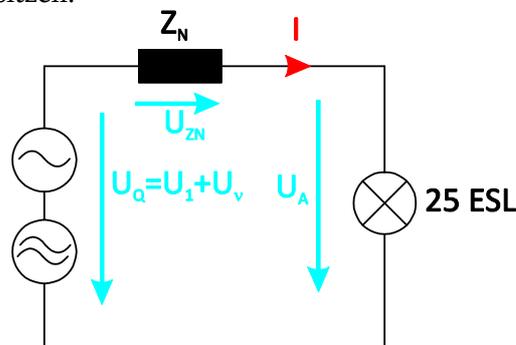


Abbildung 3.24 Prinzip der Erzeugung der Spannung U_A

In Abbildung 3.24 kann anhand der prinzipiellen Darstellung die Wirkung einer Impedanz zur Verzerrung einer Spannung nachvollzogen werden. An einer Impedanz (Normnetzimpedanz mit $Z_N = 0.5 + j \cdot 0.25$) kommt es aufgrund des Stromes von 25 ESL zu einem Spannungsabfall, um den

die Spannung U_A an den Lampen von der Quellenspannung U_Q vermindert ist. Die Spannung U_A an den ESL wird nun für den nächsten Messpunkt als Quellenspannung U_Q verwendet und dieser Vorgang wird bis zu einem THD_U von 7.8% fortgesetzt. Aus dieser schrittweisen Vorgangsweise werden die unterschiedlichen Verzerrungsgrade für die Spannung U_A erzeugt. In Abbildung 3.25 kann bei U_A durch den Vergleich mit einer rein sinusförmigen Spannung U_{Sinus} die typische Verformung im Bereich ab 60° der Spannung durch den Stromfluss der ESL erkannt werden.

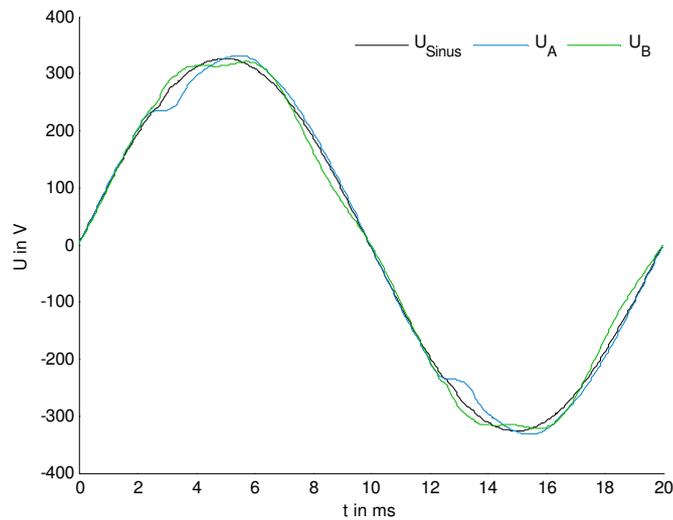


Abbildung 3.25 Darstellung zweier Spannungen (U_A, U_B) mit einem THD_U von jeweils ca. 5% und unverzerrter Spannung (U_{Sinus})

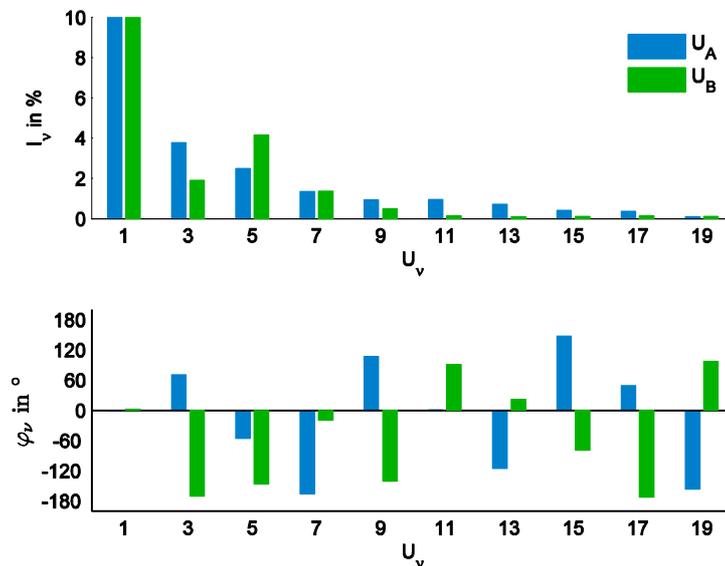


Abbildung 3.26 Frequenzspektrum beider verzerrten Spannungen bei einem THD_U von ca. 5%

Die Netzspannung mit ihrer typischerweise abgeflachten Spitze ist Grundlage für die Überlegung der Zusammensetzung von U_B . Das charakteristische an Spannung U_B ist die dominierende 5. Harmonische (Abbildung 3.26). Um eine ungefähre Sinusform beizubehalten variieren neben den unterschiedlichen Amplituden der Oberschwingungen auch die Phasenwinkel.

Die Spannungsverläufe beider Spannungen in Abbildung 3.25 für einen THD_U von jeweils ca. 5 % verdeutlichen die Merkmale. Beide Spannungen weichen in ihrer spektralen Zusammensetzung nicht nur bei den Spannungsamplituden, sondern auch bei den Phasenlagen voneinander ab. Frequenzspektrum und Phasenlagen beider Spannungen sind in Abbildung 3.26 für einen THD_U von rund 5 % veranschaulicht.

3.4.1 Entwicklung der Stromverzerrung

Die Entwicklung der THD_I wird mittels zweier Spannungen (U_A und U_B) die einen unterschiedlichen Oberschwingungsgehalt besitzen im Folgenden untersucht.

Aus Studie [16] geht die Aussage hervor, dass mit steigender Oberschwingungsbelastung der Spannung die Gesamtverzerrung des Stromes der ESL sinkt. Die Messungen der vorliegenden Arbeit zeigen andere Ergebnisse.

Gesamtverzerrung des Stroms

Trotz der unterschiedlichen spektralen Zusammensetzung der Versorgungsspannungen ergibt sich ein ähnlicher Trend für den Gesamtverzerrungsgrad des Stromes. Bei Variation der Verzerrungsgrade der Spannungen von 0.4 % bis 7.8 %, nimmt der Stromverzerrungsgrad von 121 % bis auf 129 % bzw. 133 % zu. Anhand der genauen Auflistung der Werte in Tabelle 3.18 ist bei Versorgung mit U_A für eine THD_U bis zu einem Wert von 3 % eher eine gleichbleibende THD_I feststellbar. Eine Interpolation der Messwerte in Abbildung 3.27 zeigt aber die ansteigende Tendenz der THD_I . Eine Versorgung mit U_B bringt noch deutlichere Ergebnisse. Hier ist über den gesamten betrachteten Bereich von 0.4 % bis 7.5 % eine Erhöhung der THD_I festzustellen.

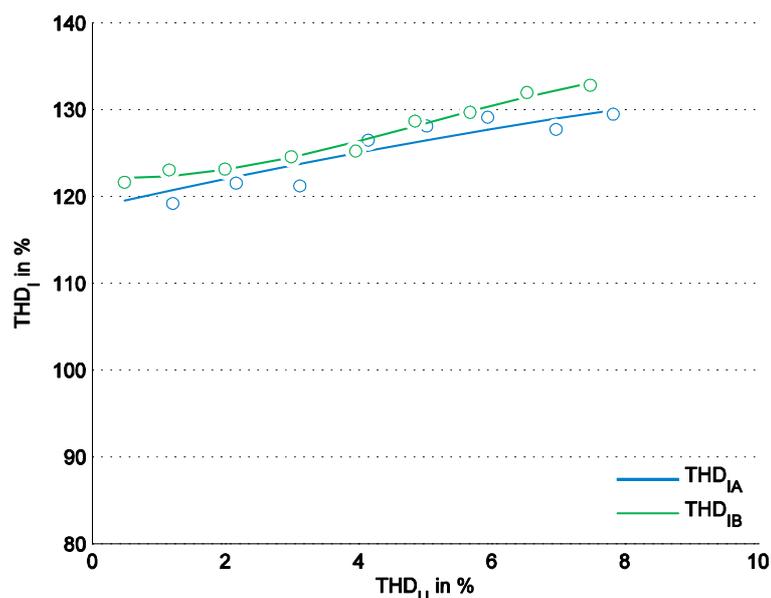


Abbildung 3.27 Darstellung von THD_I in Abhängigkeit von THD_U bei zwei unterschiedlich verzerrten Spannungen

U_A	THD _U	%	0.40	1.21	2.16	3.12	4.15	5.03	5.94	6.97	7.83
	THD _I	%	121.6	119.2	121.5	121.2	126.5	128.1	129.1	127.7	129.5
U_B	THD _U	%	0.40	1.16	2.00	3.00	3.96	4.85	5.68	6.53	7.48
	THD _I	%	121.6	123.1	123.2	124.6	125.2	128.7	129.7	132.0	132.8

Tabelle 3.18 Werte für THD_U und THD_I bei zwei unterschiedlich verzerrten Spannungen

Bei genauerer Betrachtung der einzelnen Harmonischen des Stromes zeigen sich deutlichere Unterschiede in den Tendenzen aufgrund der Erhöhung des Verzerrungsgrades. Aus Abbildung 3.28 geht hervor, dass bei Erhöhung der THD von U_A alle maßgebenden Oberschwingungen gleichmäßig ansteigen und somit insgesamt die THD_I erhöhen. Wird der Verzerrungsgrad bei U_B erhöht, vermindern sich I_3 und I_5 signifikant, jedoch nehmen siebte, neunte und elfte betragsmäßig soweit zu, dass es insgesamt zu einer Erhöhung der THD_I kommt. Auch hier zeigt sich die unterschiedliche Wirkung der OS in der Versorgungsspannung auf einzelne Harmonische des Stroms der ESL

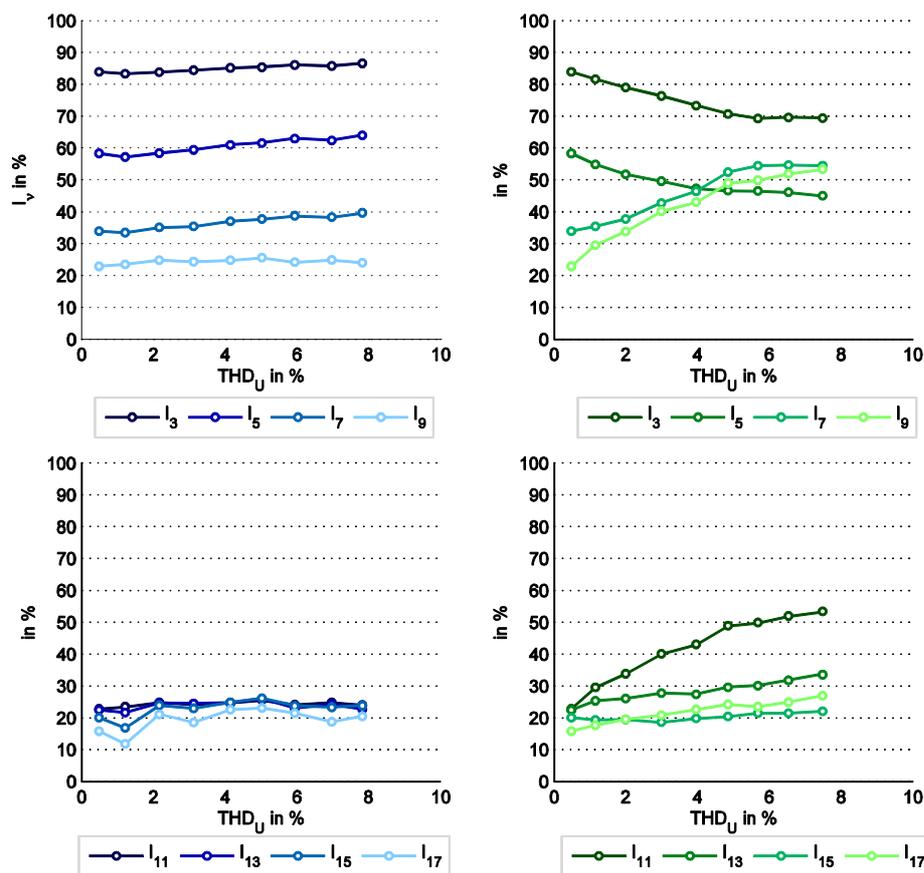


Abbildung 3.28 Verläufe der Stromober-schwingungen (3.-9. oben, 11.-17. unten) für zwei unterschiedliche THD_U (links A/rechts B)

Vergleich mit Studie [16]

Generell kann keine Aussage darüber getroffen werden in welcher Weise sich die THD_I bei Veränderung der THD_U ändert. Obwohl die Verzerrung der Versorgungsspannung über einer Impedanz und zusätzlicher Belastung von ESL erfolgte, decken sich die Ergebnisse von [16] nicht mit jenen in der vorliegenden Arbeit. Ein Unterschied ist, dass die Messung des Gesamtverzerrungsgrades nur an einer ESL durchgeführt wurde. Da es sich um eine kanadische Studie handelt, ist zu bemerken, dass die Versorgungsspannung nur 120 V beträgt und damit ein doppelt so großer Strom für die gleiche Leistungsaufnahme fließt. Damit ergeben sich auch größere Wirkungen über eine Impedanz. Der Messaufbau der Studie ist ähnlich dem in der Arbeit verwendeten. Leider fehlen das genaue Oberschwingungsspektrum der Spannung und, was besonders wichtig wäre, die verwendete Impedanz. Diese fehlenden Angaben sind wohl der Hauptgrund für die abweichenden Ergebnisse. In Tabelle 3.19 sind die Ergebnisse von [16] angeführt. Auffallend ist der schmale Bereich der THD_U von 4.87 bis 5.76 %.

	THD_U in %	THD_I in %
	4.87	106.59
	5.12	102.25
	5.40	92.47
	5.76	90.51
ΔTHD in %	0.89	-16.09

Tabelle 3.19 Übersicht der Werte aus [16]

3.4.2 Steigerung der Gesamtverzerrung der Spannung über eine Impedanz

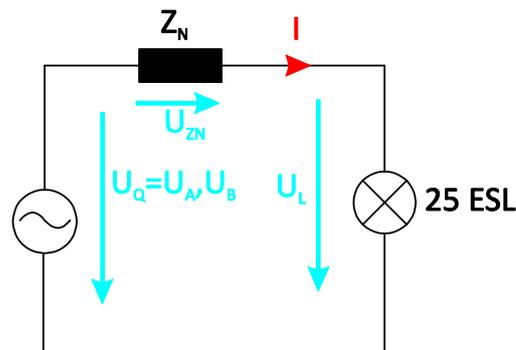


Abbildung 3.29 Schaltung zur Wirkung von ESL auf die THDU

Die prinzipielle Schaltung in Abbildung 3.29 dient als Messaufbau und die beiden Spannungen U_A und U_B aus Kapitel 3.4 bilden zwei Möglichkeiten zur Versorgung der ESL.

Im Interesse der Untersuchung steht die Frage, wie weit sich der Verzerrungsgrad der Spannung U_L durch zusätzliche ESL aufgrund des Spannungsabfalls über Z_N erhöht. Tritt womöglich der Fall auf, dass, wenn eine schon verzerrte Quellenspannung U_Q mit ESL zusätzlich belastet wird, es zu keiner weiteren Erhöhung der THDU kommt?

Die Messergebnisse sind in Abbildung 3.30 grafisch und in Tabelle 3.20 numerisch dargestellt. Wiederum sind die Unterschiede der Spannungen U_A und U_B für das Ergebnis entscheidend.

Da die THDU der Spannung U_A mit der verzerrenden Wirkung der ESL an einer Impedanz erzeugt werden, sind hier kaum Überlagerungseffekte zu beobachten. Die Phasenlagen der bereits vorherrschenden OS-Amplituden in der Spannung stimmen mit jenen durch die ESL eingebrachten besser überein. Zu jedem vorgegebenen THDU-Wert addiert sich ein relativ konstanter Wert durch die ESL (Abbildung 3.30 – links).

Bei zunehmenden vorgegebener THDU der Spannung U_B ist die Erhöhung der THDU durch die ESL nicht so ausgeprägt wie bei U_A . Es kommt zu Überlagerungserscheinungen von bereits in der Spannung U_B vorkommender OS und der durch die ESL zusätzlich über die Impedanz erzeugten OS (Abbildung 3.30 – rechts).

Bei den Werten der THDU der Spannung U_B ist eine Annäherung der Werte der THDU der Quellenspannung und der Spannung U_L an den ESL ersichtlich. Die These, dass sich der Verzerrungsgrad auf einen konstanten Wert „einpendelt“, kann dennoch nicht unterstützt werden, da für die Verzerrungsgrade der Spannung U_A dieser Effekt nicht beobachtet werden kann.

Aus Abbildung 3.27 geht grundsätzlich eine Änderung der THDI in Abhängigkeit der Verzerrungen der Spannungen hervor. Wird diese Änderung ignoriert und werden womöglich Abschätzungen über Entwicklungen der THDU anhand von Simulationsmodellen erstellt, können die Ergebnisse andere Interpretationsmöglichkeiten liefern. Zur Untermauerung wird nun rechnerisch die Änderung der THDI eliminiert. Die THDI wird konstant gehalten.

Grundlage ist der Strom und THDI der ESL anhand des Messpunktes mit einer THDU von 0.4%. Mit diesem Strom wird nun ein Spannungsabfall an einer Impedanz errechnet. Beiden Quellenspannungen (U_A und U_B) wird nun für unterschiedlichen Verzerrungsgrade immer nur dieser konstante Spannungsabfall addiert. Dieser Verlauf ist als strichlierte Linie in Abbildung 3.30 er-

sichtlich. Jetzt zeigt sich für beide Spannungen eine Annäherung der Verzerrungswerte von Quellen- und Lampenspannung im Bereich der THD_U um 8 %. Sogar eine Verringerung der THD_U bei U_B ist festzustellen (Tabelle 3.20).

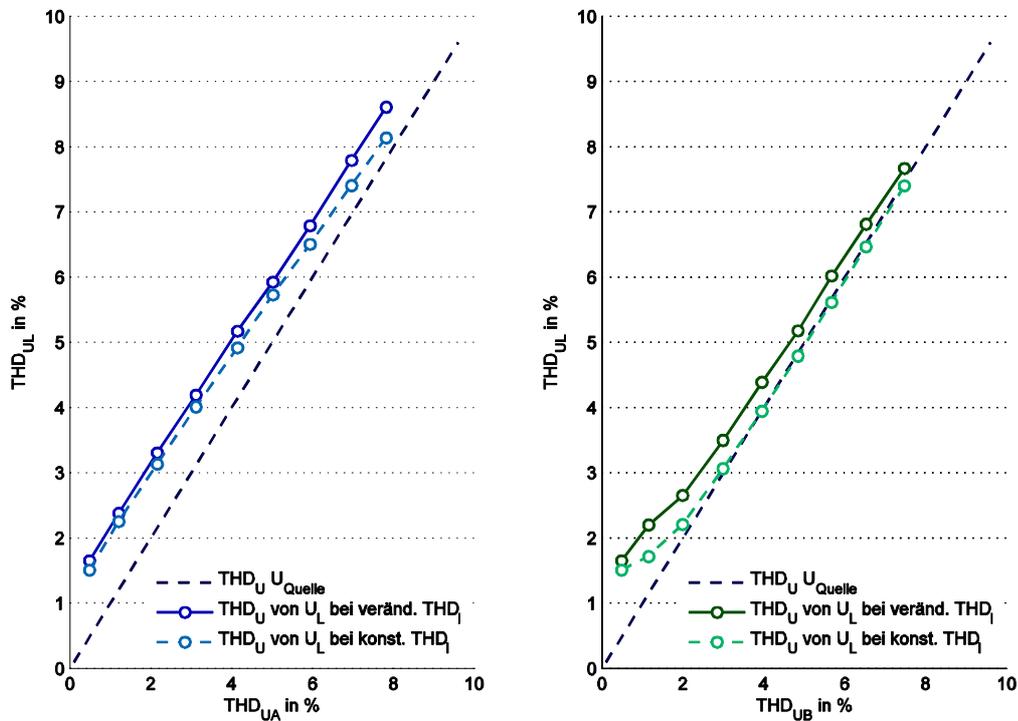


Abbildung 3.30 Veränderung des THD_U der Spannung an den ESL für zwei verzerrte Spannungen aufgrund der Wirkung von 25 ESL über die Normimpedanz und Verlauf des THD_U der Quellenspannung

U_A	THD_U Quelle	%	0.48	1.21	2.16	3.12	4.14	5.02	5.94	6.97	7.83
	THD_{UL} $THDI$ veränderlich	%	1.65	2.38	3.31	4.20	5.17	5.92	6.79	7.78	8.60
	THD_{UL} $THDI$ konstant	%	1.51	2.25	3.13	4.00	4.92	5.72	6.50	7.40	8.13
U_B	THD_U Quelle	%	0.48	1.16	2.00	3.00	3.96	4.85	5.68	6.53	7.48
	THD_{UL} $THDI$ veränderlich	%	1.65	2.20	2.65	3.50	4.39	5.18	6.02	6.81	7.67
	THD_{UL} $THDI$ konstant	%	1.51	1.72	2.21	3.06	3.95	4.79	5.62	6.46	7.40

Tabelle 3.20 Übersicht von THD_U für Quellenspannung und Spannungen an den ESL für zwei Arten der Quellenspannung (U_A und U_B)

4 Simulationsmodell

4.1 Mathematisches Modell für die Energiesparlampe

Aus der Kenntnis der inneren Beschaltung der ESL (Abbildung 1.1) mit einem Brückengleichrichter zur Erlangung einer Gleichspannung, welche in weiterer Folge auf eine höhere Frequenz umgerichtet wird, sowie der Anforderung an eine konstante Leuchtkraft der ESL lässt sich die Lampe mit einem einfachen aber effektiven Modell beschreiben.

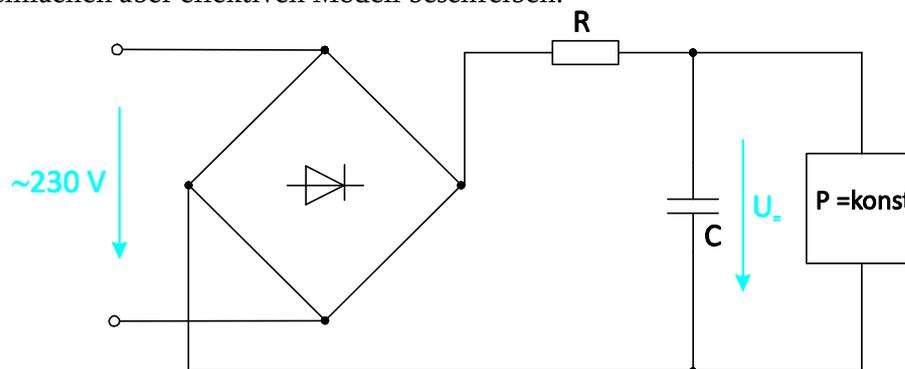


Abbildung 4.1 Simulationsmodell für ESL

Der Brückengleichrichter und ein Glättungskondensator werden für das Modell in MATLAB-Simulink herangezogen und die Nachbeschaltung wird mit einer Last mit konstanter Leistungsaufnahme als gesteuerte Stromquelle modelliert.

Der Wert von R teilt sich in einen konstant gehaltenen Anteil und einen variablen Anteil auf ($R = R_{\text{fix}} + R_{\text{var}}$). Bei der Skalierung des Modells für mehrere Lampen wird R unter Annahme einer Parallelschaltung der Lampen dementsprechend verringert. Der Gedanke dahinter ist, dass mehrere Lampen in einem Haushalt als Parallelschaltung von ESL angesehen werden können. Ein zu kleiner R bereitet aber in weiterer Folge mit induktiven Netzelementen Schwierigkeiten, da der so gebildete Resonanzkreis zu wenig abgedämpft ist. Es kommt zu starken Schwingungsverhalten im mathematischen Modell nach dem Strommaximum.

Mit Variation der Parameter R und C lässt sich eine bessere Abdeckung der Schwankungsbreite unterschiedlicher Lampentypen erreichen. Dies geschieht unter Verwendung von drei Modellvarianten (siehe Tabelle 4.1).

	R_{fix}	R_{var}	C
	Ω	Ω/W	$\mu\text{F}/\text{W}$
1	1	0.1	0.25
2	1	0.15	0.30
3	1	0.25	0.39

Tabelle 4.1 Parametersatz für 3 Modellvarianten

4.1.1 Simulationsergebnisse mit unterschiedlichen Parametersätzen

Diese Modelle der ESL zeigen im Vergleich des zeitlichen Verlaufs der Stromaufnahme mit den Messungen und dem Frequenzspektrum eine auffallend gute Übereinstimmung (Abbildung 4.2). Eine Änderung der Parameter, vorwiegend C, ergibt eine leichte Verschiebung des Beginns des Stromflusses um einige Zehntel ms. Mit diesen drei einfachen Modellen wird die Schwankungsbreite des Spektrums in Abbildung 4.3 und der Phasenlagen in Abbildung 4.4 ausreichend gut nachgebildet.

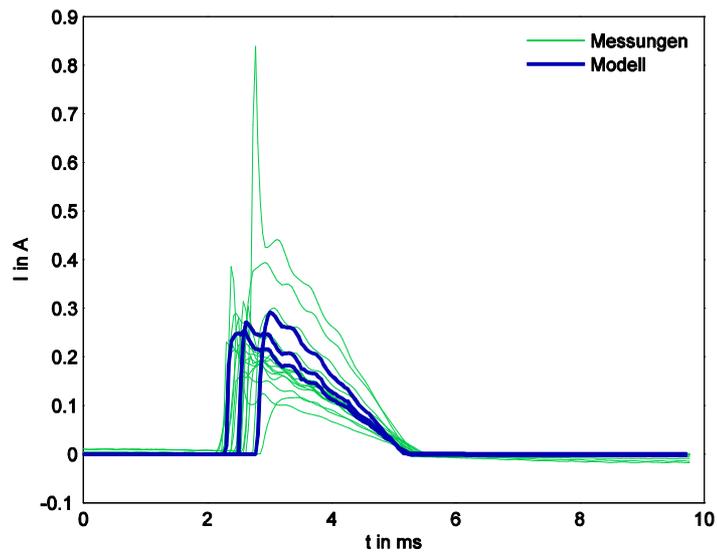


Abbildung 4.2 zeitlicher Verlauf des Stroms von 3 Simulationsmodellen und Messung

In Abbildung 4.2 wird der zeitliche Verlauf der 16 ESL und der drei Modellvarianten der Simulation miteinander verglichen. Hauptunterscheidungskriterium ist vor allem der unterschiedliche Startzeitpunkt des Stromflusses. Der Simulation liegt eine Leistungsaufnahme von 11 W für eine ESL zugrunde.

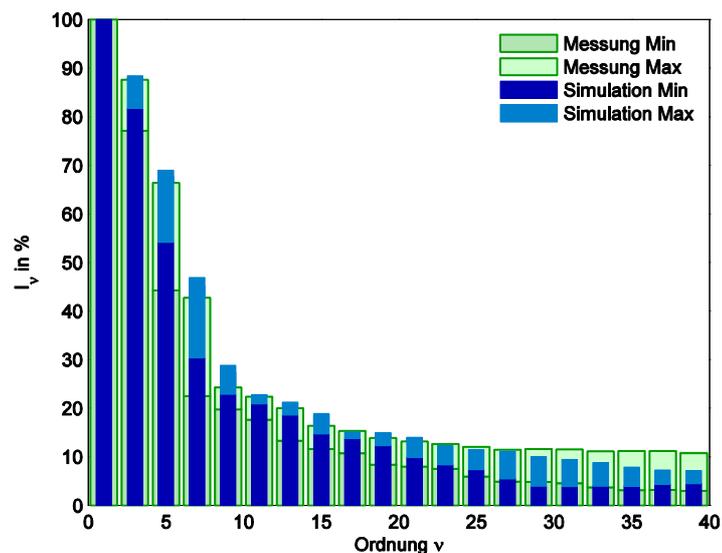


Abbildung 4.3 Vergleich des Betragsspektrums des Lampenstroms von Messungen und Simulation

Der Vergleich in Abbildung 4.3 des gemessenen Spektrums mit den Ergebnissen aus der Simulation zeigt eine gute Übereinstimmung. Die minimalen und maximalen Betragswerte aus den Messungen werden von der Simulation ebenfalls erreicht. Die wirkleistungsbezogenen Stromzeiger der drei Modellvarianten befinden sich ebenfalls in den aus den Messungen ermittelten Bereichen (Abbildung 4.4). Dadurch können auch in der Simulation Überlagerungseffekte, welche hauptsächlich durch die Winkelstreuung von unterschiedlichen ESL verursacht werden, berücksichtigt werden.

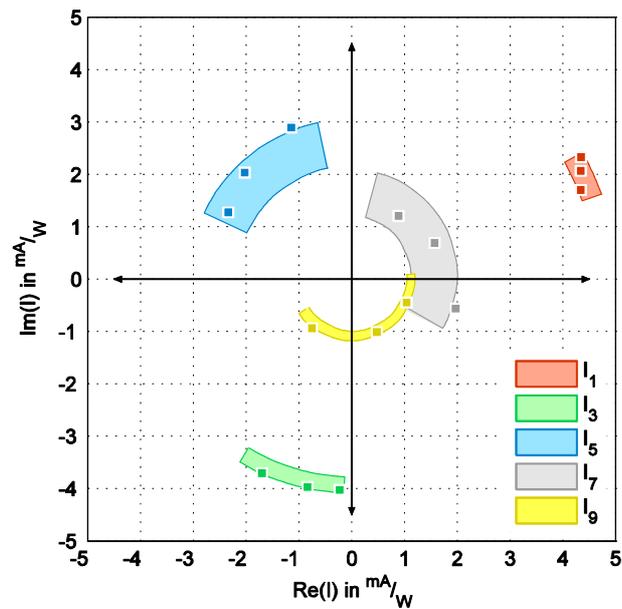


Abbildung 4.4 Vergleich der Bereiche der auf die Wirkleistung bezogenen Stromzeiger von Simulationsmodellen und Messungen (16 ESL) – 3 Modellvarianten

4.1.2 Simulation von unterschiedlicher Anzahl von ESL

Mittels Vergrößerung von C und Verkleinerung von R kann eine Steigerung der Lampenzahl erreicht werden. Dahinter steckt die Überlegung einer Parallelschaltung von ESL zur Erhöhung der Gesamtanzahl. Um das Modell nicht mehrmals parallel zu schalten, werden die Koeffizienten verändert. Für den Kondensator bedeutet dies eine Addition und der variable Anteil von R nimmt mit $1/\text{Anzahl}$ ab. Der konstante Anteil des Widerstandes bleibt unverändert, da wie bereits erwähnt durch einen zu kleinen ohmschen Anteil es zu Schwingungsverhalten kommt. Das vorliegende Modell ist somit bei geeigneten Einstellungen der Parameter sowohl für eine Lampe als auch eine Mehrzahl von Lampen gültig. Bei der Simulation zeigt sich mit zunehmender Anzahl der ESL eine Abnahme der Welligkeit des Stromes und eine Abnahme der Beträge der Oberschwingungsamplituden bei den höheren Ordnungen des Stromes (Abbildung 4.5 und Abbildung 4.6).

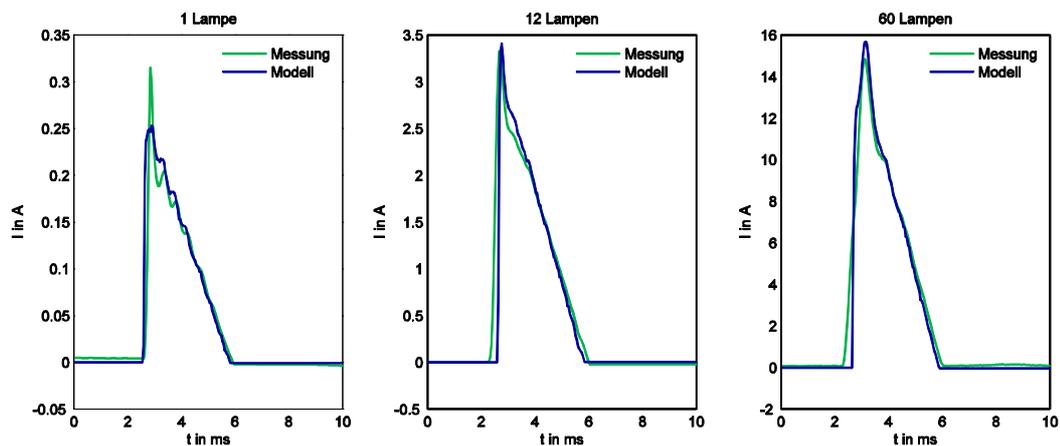


Abbildung 4.5 Zeitlicher Verlauf des Stroms von Messung und Simulation bei unterschiedlicher Anzahl von ESL

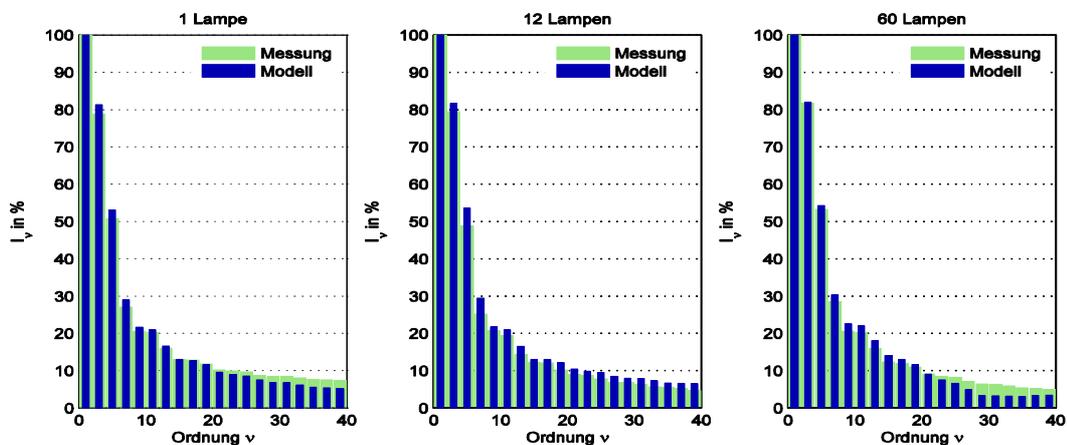


Abbildung 4.6 Spektrum des Stroms von Messung und Simulation bei unterschiedlicher Anzahl von ESL

4.1.3 Vergleich von Simulation und Messung anhand zweier ausgewählter Beispiele

Für den Vergleich der Messungen und den 3 Modellvarianten sind zwei Messreihen aller 16 ESL repräsentativ für die Beeinflussung des Stromes durch Spannungsparameter ausgewählt worden. Mit der Abhängigkeit von I_5 von U_5 aus Kapitel 3.3.1 wird die Gültigkeit des Modells auch in Bezug auf die Auswirkungen der Harmonischen in der Versorgungsspannung überprüft.

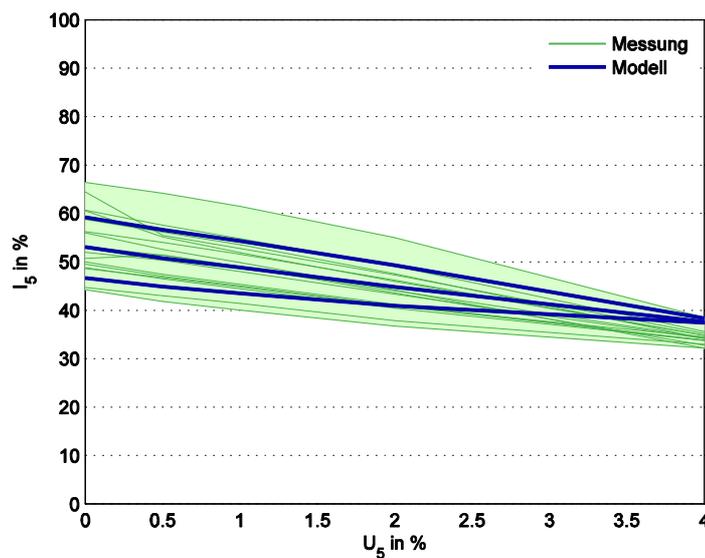


Abbildung 4.7 Vergleichende Darstellung von Messungen (16 ESL) und den drei Simulationsmodellen am Beispiel der Abhängigkeit von I_5 durch U_5

Die drei Modellvarianten zeigen ein mit den Messungen übereinstimmendes Verhalten. Die abfallende Tendenz für I_5 aufgrund der Vergrößerung der Amplitude der 5. Spannungsharmonischen (Abbildung 4.7) wird mittels Simulation ebenfalls nachgebildet. Auch die Änderungen des Betrages von I_5 durch den Einfluss der Phasenlage φ_5 von U_5 wird von der Simulation nachgebildet. Die drei Modelle decken auch den betragsmäßigen Schwankungsbereich, welcher anhand 16 ESL festgestellt wurde, ab.

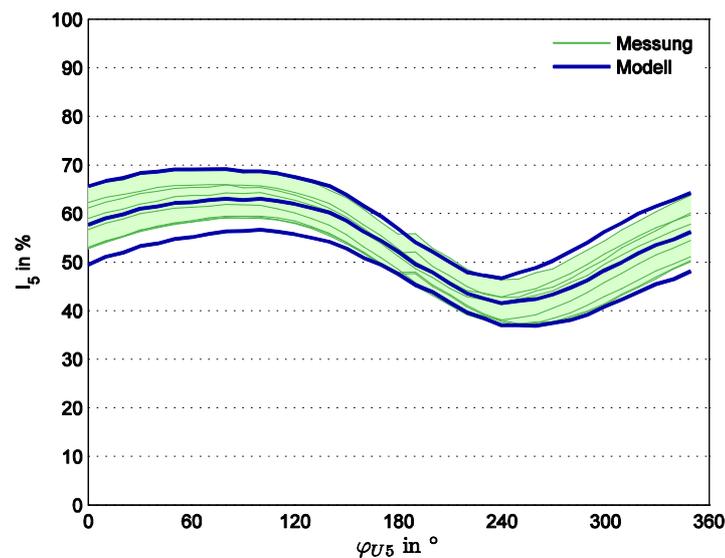


Abbildung 4.8 Vergleichende Darstellung von Messung (16 ESL) und den drei Simulationsmodellen am Beispiel der Abhängigkeit von I_5 von φ_{U5} .

Das Simulationsmodell erzielt bei den in den Messungen festgestellten Beeinflussungsfaktoren die gleichen Ergebnisse. Die Nachbildung der Streuung des Spektrums der ESL und der Variation der Anzahl der Lampen kann durch eine Veränderung der Parameter des Modells und Festlegung auf 3 Modellvarianten erreicht werden. Eine größere Anzahl von Modellvarianten würde die statistische Streuung der Lampen stärker unterstützen, doch muss Rücksicht auf die Größe und Komplexität des Gesamtmodells des Niederspannungsnetzes genommen werden (siehe folgende Kapitel).

4.2 Nachbildung eines Niederspannungsnetzes

4.2.1 Topologie

Das Niederspannungsnetz besteht typischerweise aus einer Reihe von Abzweigen, welche nur eine geringe Anzahl an Verzweigungen besitzen. Die Ausdehnung der Netze beträgt in städtischen Gebieten bzw. in dicht verbautem Siedlungsraum, wegen der höheren Anschlussleistungen pro Längensegment nur ca. 200 m bis 300 m. Ländlich strukturierte Netze erreichen größere Längen von über 600 m. Maximal ist jedoch mit einer Ausdehnung von 1 km zu rechnen, da sich ansonsten am Ende des Abzweiges die Spannungsabfälle auf der Leitung für den Verbraucher soweit auswirken, dass das Spannungsband von $\pm 10\%$ [6] nicht mehr gewährleistet werden kann. Spärlich besiedelte Gebiete werden zumeist mit Freileitungen an die Stromversorgung angebunden. Kabelnetze finden vor allem im städtischen Bereich und ländlichen Wohngebieten Anwendung, wobei der Unterschied von ländlichen zu städtischen Wohngebieten bei Kabelnetzen in der Leitungslänge und Dichte der Verbraucher und zugehörigen Lasten liegt.

Die Abzweige des Niederspannungsnetzes lassen sich so auf 4 grundlegende Typen reduzieren.

- Freileitung - ländlich
- Freileitung - Wohnsiedlung
- Kabel - ländliches Wohngebiet
- Kabel - Wohnsiedlung, städtisch

Die angenommene Netztopologie basiert auf einem realen Niederspannungsnetz. In Summe werden 6 Abzweige, die sich in drei Kabel und drei Freileitungsabzweige aufspalten, versorgt.

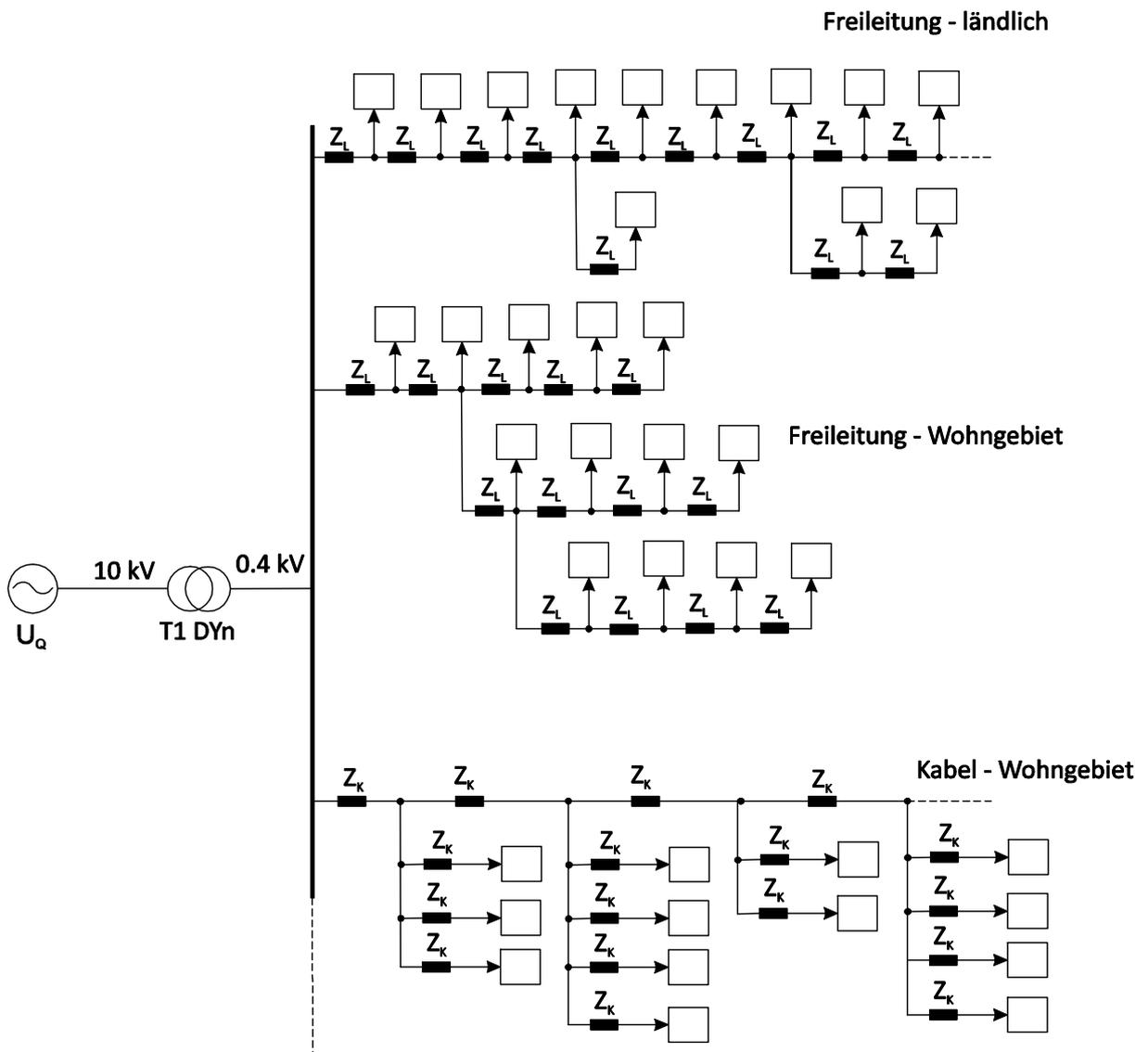


Abbildung 4.9 Darstellung von drei der insgesamt 6 Abzweige eines Niederspannungsnetzes

4.2.2 Impedanzen der Leitungen

Die Unterscheidungsmerkmale von Kabeln und Freileitungen sind die Impedanzen. Freileitungen besitzen einen um ca. Faktor 3 größeren Induktivitätsbelag. Da vor allem die Wirkung durch OS-Ströme untersucht werden, wirken sich die Induktivitäten proportional mit der Frequenz aus (Kapitel 3.4.2).

Ein reales Niederspannungsnetz dient als Vorlage für die Parameter der Simulation. Die verwendeten Leitungstypen liefern Informationen über die Impedanzbeläge (Tabelle 4.2).

Norm-Bezeichnung	Material	R/km	X/km
NS-Freileitung			
Al 4x25	Al	1.180	0.34
Al 4x50	Al	0.593	0.32
Al 4x70	Al	0.436	0.31
Al 4x95	Al	0.308	0.29
NS-Kabel			
YY 4x16	Al	1.141	0.09
AYY 4x25	Al	1.201	0.086
AYY 4x50	Al	0.642	0.083
AYY 4x150	Al	0.208	0.08

Tabelle 4.2 Impedanzen von Kabel- und Freileitungstypen

Die Angabe des Impedanzbelages in Tabelle 4.2 kann als Mitimpedanz Z^1 aufgefasst werden. Mit $Z^0 = 4 \cdot Z^1$ ergibt sich daraus die Nullimpedanz. Dieser Wert wird in allen gängigen Netzsimulationsprogrammen verwendet, da ein genauer Wert der Nullimpedanz weitgehend unbekannt ist. Eine Kenntnis der Nullimpedanz ist notwendig, da die Simulation des Netzes dreiphasig erfolgt. Durch die dreiphasige Simulation können die Kopplungen zwischen den Phasen berücksichtigt werden.

4.2.3 Transformator

Die wichtigsten Parameter des Transformators sind die Schaltgruppe und Kurzschlussspannung (Tabelle 4.3). Da die Simulation nur begrenzte Möglichkeiten in der Vorgabe einer Schaltgruppe besitzt, ist ein DYn11 anstelle eines DYn5-Transformators gewählt worden. Aus der Kurzschlussspannung und Nennleistung des Transformators lässt sich die Impedanz des Transformators bestimmen.

T – DYn11	
S_T in kVA	250
P_{Cu} in kW	4.37
u_k in %	5.9
u_R in %	1.8
u_X in %	5.6

Tabelle 4.3 Daten für Transformator

$$Z_T = \frac{U_T^2}{S_T} \cdot u_k \tag{4.1}$$

$$u_k = \sqrt{u_R^2 + u_L^2} \tag{4.2}$$

$$u_R = \frac{P_{Cu}}{S_T} \tag{4.3}$$

$$R_T = \frac{U_T^2}{S_T} \cdot u_R \tag{4.4}$$

$$X_T = \frac{U_T^2}{S_T} \cdot u_L \tag{4.5}$$

Aus der Kenntnis der Schaltgruppe des Transformators mit DYn und der damit verbundenen Eigenschaft, dass keine OS mit 3. Ordnung aus dem MS in das NS übertragen werden (Abbildung 4.10) ergibt sich, dass alle OS dieser Ordnungszahlen ihre Quelle im NS-Netz besitzen. Sowohl 5. wie auch 7. OS besitzen ihre dominierende Quelle im MS-Netz.

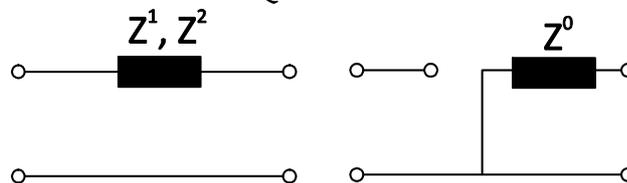


Abbildung 4.10 Mit-,Gegen und Nullsystem bei Transformatoren der Schaltgruppe DYn

Insgesamt liegen am Verteilnetztransformator für die Simulation 6 Abzweige mit durchschnittlich 15 Verbrauchern an (Abbildung 4.9). Bei der Verwendung eines 250-kVA-Transformators genügt die Anzahl von 90 Anschlüssen vollkommen. Der Auslastungsgrad des Transformators beträgt ca. 18 %. Im Mittel kann bei realen Verteilnetztransformatoren ein Auslastungsgrad von 10 bis 20 % angenommen werden. Für die Spitzenauslastung sind Werte von ca. 40 bis 50 % anzunehmen.

4.2.4 Speisung aus MS-Ebene

Die Speisung des Transformators aus dem Mittelspannungsnetz wird durch eine Spannungsquelle realisiert. Es wird eine Kurzschlussleistung von 200 MVA angenommen. Zusätzlich werden eine 5. und 7. Spannungsharmonische eingebracht, um die Vorbelastung aus der MS-Ebene vorzugeben.

	Betrag in %	Phasenlage für NS- Netz
U_5	1.7	$\approx 150^\circ$
U_7	0.2	$\approx -10^\circ$

Tabelle 4.4 Vorbelastung aus MS-Netz

4.3 Nachbildung der Ersatzlast eines Hausanschlusses

Für die gesamte Simulation des Niederspannungsnetzes müssen einige Überlegungen getroffen werden. Neben den ESL sind auch weitere Verbraucher eines Haushaltes zu berücksichtigen. Grundsätzlich können zwei weitere Typen ausgemacht werden, Schaltnetzteile (Gleichrichterschaltungen) und ohmsch-induktive Lasten (siehe Kapitel 2.6).

4.3.1 Modell für B2-Gleichrichter

Die Parameter der Gleichrichterschaltung stammen aus [8] und [9]. Durch Vergleichsmessungen an Bildschirmen und die Vorgaben durch Novellierungen von ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 [7] ist eine Abwandlung der Parameter notwendig (siehe Tabelle 4.5).

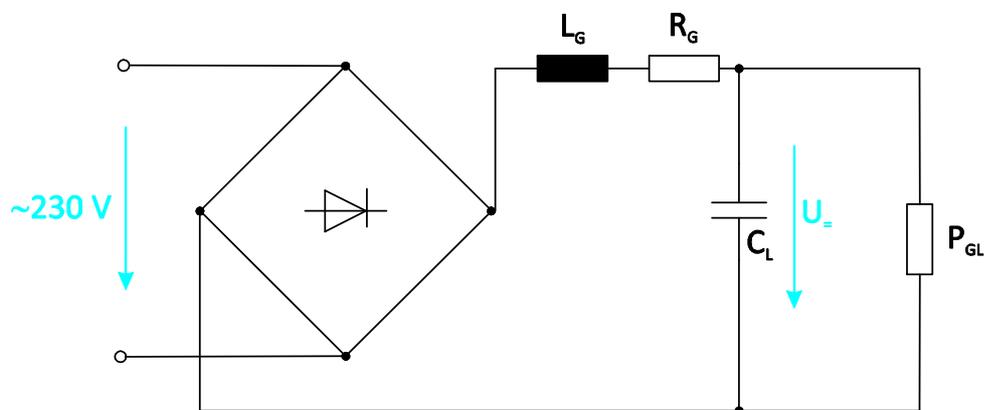


Abbildung 4.11 Ersatzschaltung für Netzteile ohne Leistungsfaktorkorrektur

Die Glättungsinduktivität L_G wird im Modell vernachlässigt, da der Einfluss auf die Schaltung im untersuchten Frequenzbereich zu gering ist.

Die Parameter in Tabelle 4.5 für die drei gewählten Varianten unterscheiden sich nur in R_G . Für C_L kann ein Wert von $230 \mu\text{F}/100 \text{ W}$ angenommen werden [8].

	R_G	C_L
	Ω/W	$\mu\text{F}/\text{W}$
1	0.17	2.3
2	0.71	2.3
3	1.43	2.3

Tabelle 4.5 Parameter für 3 Modelle der Gleichrichterschaltung

Abbildung 4.12 zeigt die Amplituden im Stromspektrum für die verschiedenen Gleichrichtermodele. Damit wird ein guter Querschnitt erreicht, da vergleichende Messungen an PC-Monitoren diese Werte bestätigen.

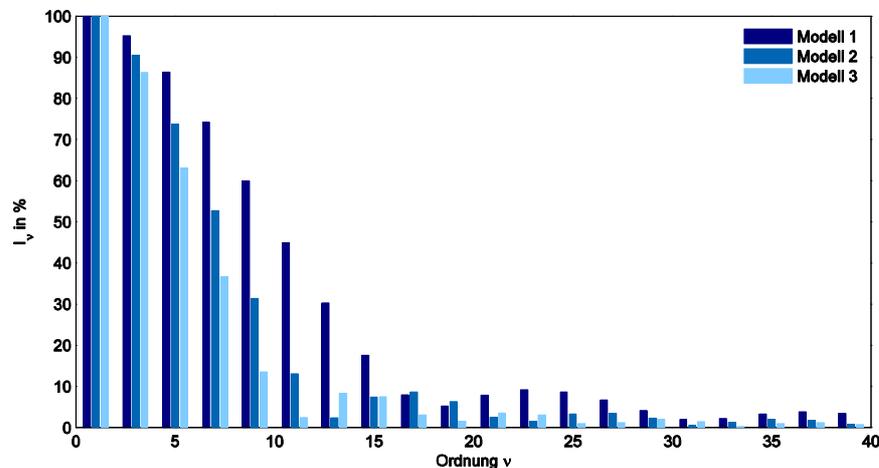


Abbildung 4.12 Frequenzspektrum der drei Modelle für Gleichrichter

Zusätzlich beinhaltet das Modell der Haushaltslast noch eine ohmsch-induktive Last, welche weitere Verbraucher wie Motoren (Waschmaschine) oder E- Herd beachtet. Diese Lasten wurden mit einem $\cos(\varphi)$ von 0.95 angenommen.

Verbrauchergruppen mit Gleichrichterbeschaltung über einer Nennleistung von 75 W werden aufgrund der gültigen Norm ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 [7] meist mit aktiver Leistungsfaktorkorrektur (active PFC) betrieben. Eine nahezu sinusförmige Stromaufnahme ist die Folge. Bei Verbrauchern mit PFC ist mit 8% der dritte Oberschwingungsstrom der größte. Für die Simulation werden diese Verbraucher in die ohmsch-induktive Last inkludiert.

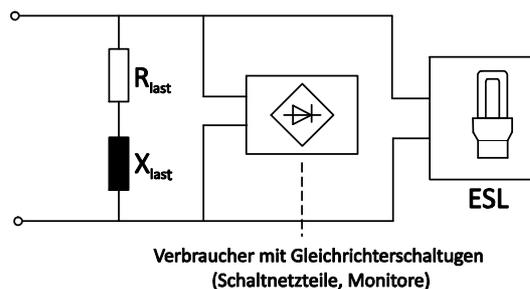


Abbildung 4.13 Schematische Darstellung der Zusammensetzung der Haushaltslast

4.4 Evaluierung der Simulationsergebnisse und der Messung

Ein Vergleich der Stromverläufe aus den Messungen an einem Verteilnetztransformator und simulierten Werte zeigt Abbildung 4.14. Trotz der einfachen Modellierung der Lasten kann die gleiche charakteristische Form beider Ströme festgestellt werden. Für die Gleichrichterlast kann ein Wert von 10 bis 15 % je nach Tageszeit angenommen werden. Der Simulation liegt ein Wert von 12.5 % zugrunde.

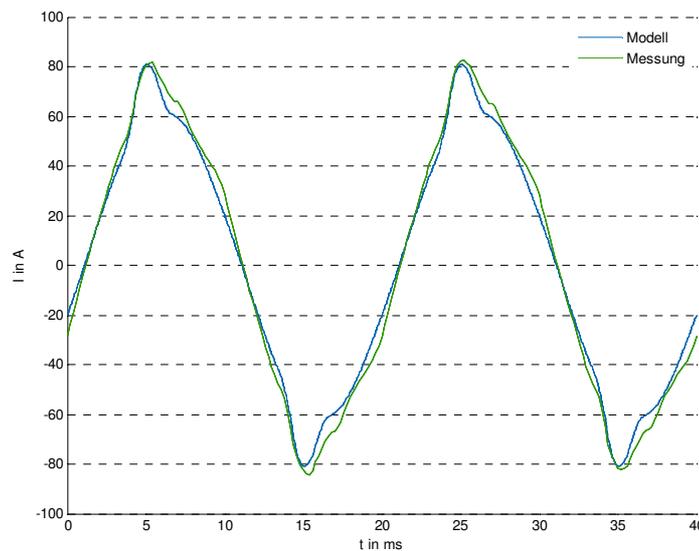


Abbildung 4.14 Vergleich des Stromes aus Messung an einem Transformator und Simulation ohne ESL

Eine Auswertung der OS-Ströme der Simulation zeigt die gute Näherung des Modells mit der Messung (Tabelle 4.6). Allein bei der 5. und 7. OS befinden sich die simulierten Beträge am Maximum der Messungen. Die maximalen Werte der Messungen ergeben sich im Zeitraum von 20 bis 21 Uhr, dies ist der Zeitraum ab dem aufgrund der Dämmerung die Beleuchtung in Räumen notwendig ist. Die Messwerte stammen aus einer Anfang Februar 2010 durchgeführten Messreihe an einem Verteilnetztransformator.

Ordnung v	Messung				Simulation	
	Betrag		φ		Betrag	φ
	Min in %	Max in %	Min in $^\circ$	Max in $^\circ$	in %	in $^\circ$
1	--	--	-22	-4	--	-16
3	6.6	15.3	-171	-152	9.1	-176
5	2.8	6.2	-66	36	6.2	9
7	1.4	3.8	-178	-135	4.1	-169
9	1.6	4.7	-33	15	2.3	13

Tabelle 4.6 Simulations- und Messergebnisse für Betrag und Phase von OS-Strömen im Niederspannungsnetz

5 Netzurückwirkung von Energiesparlampen

Der vermehrte Einsatz von ESL aufgrund des leistungsmäßigen Einsparungspotentials wird Änderungen in den Netzströmen hervorrufen. Derzeit werden etwa 9 % des Stromes für Beleuchtung in Österreich aufgewendet[1]. Da es sich dabei um einen Durchschnittswert handelt, können für Abendstunden höhere Anteile an der Gesamtlast angenommen werden. Für die Simulation werden eine schwache und eine starke Belastung mit ESL angenommen.

Ergebnisse für folgende drei Belastungsfälle liegen aus der Simulation vor:

- Referenzbelastung – ohne ESL
- zusätzliche Belastung mit ESL im Ausmaß von 5.3 %
- zusätzliche Belastung mit ESL im Ausmaß von 13.7 %

Die Angabe der zusätzlichen Belastung durch ESL bezieht sich auf die aufgenommene Wirkleistung. Die prozentuellen Lastanteile resultieren aus der unterschiedlichen Anzahl betriebener ESL pro Haushalt. Eine geringe Belastung von im Mittel 3 betriebenen ESL pro Haushalt mit jeweils 11 W pro ESL erzeugt im simulierten Fall eine Zunahme der Wirkleistung um 5.3 %. Bei durchschnittlich 8 in Betrieb befindlichen ESL bedeutet dies eine zusätzliche Last von 13.7 %. Für den zusätzlich aufgenommenen Strom und die Scheinleistung ergeben sich geringere Zunahmen. Grund dafür ist ein Kompensationseffekt der induktiven und kapazitiven Blindleistung. Dies führt zu einer Erhöhung des Leistungsfaktors im Niederspannungsnetz.

5.1 Erhöhung des Leistungsfaktors

Der Vorteil der geringeren Wirkleistungsaufnahme der ESL gegenüber der Glühlampe ist unbestritten. Der schlechte Leistungsfaktor von 0.5 bis 0.6 kann als Argument verwendet werden, dass damit mehr Blindleistung und Scheinleistung zur Verfügung gestellt werden muss. Blindleistung und Scheinleistung müssen vom Verbraucher nicht bezahlt werden, müssen aber im Netz für ausgeglichene Netzverhältnisse (Erzeugung = Verbrauch) vorhanden sein. Die Blindleistungskomponente der ESL, vor allem Q_L ist aber kapazitiv. Mit den im NS-Netz vorwiegend ohmsch-induktiven Verbrauchern ergibt sich eine Erhöhung des Leistungsfaktors durch die Kompensationseffekte von induktiver und kapazitiver Blindleistung (Tabelle 5.1 und Abbildung 5.1).

	I	ΔI	S	ΔS	P	ΔP	λ
	A	%	kVA	%	kW	%	-
ohne ESL	194.6	--	44.73	--	42.64	--	0.953
ESL (5.3 %)	202.7	4.2	46.61	4.2	44.89	5.3	0.963
ESL (13.7 %)	216.3	11.2	49.74	11.2	48.21	13.7	0.970

Tabelle 5.1 Angabe des Stroms, der Leistungen und des Leistungsfaktors anhand dreier Belastungsfälle – Angabe der Summenwerte der drei Phasen

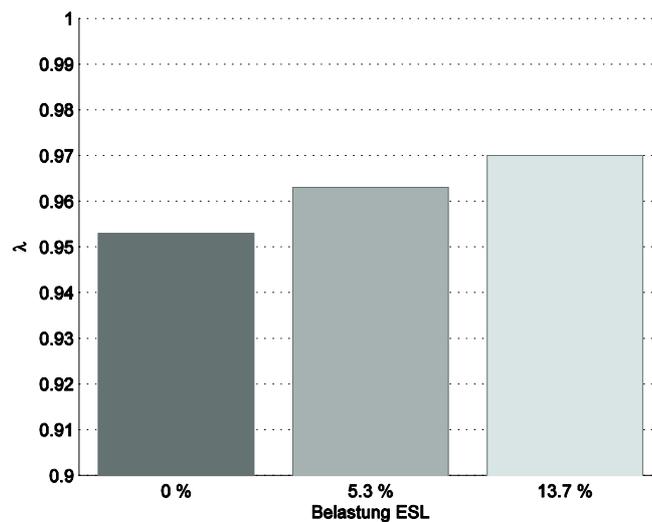


Abbildung 5.1 Entwicklung des Leistungsfaktors λ bei Erhöhung des Lastanteils von ESL

5.2 Veränderung der Oberschwingungsamplituden

Sind bislang Schaltnetzteile die dominierenden OS-Quellen im Niederspannungsnetz, kommen jetzt noch ESL hinzu. In Summe beutet dies eine Erhöhung des Gesamtstroms um 4.2 % bzw. 11.2 %. Jedoch für 5. und 7. OS-Strom kommt es zu einer Reduktion. (Tabelle 5.2 und Abbildung 5.2). Das genaue Ausmaß der Abnahme und Zunahme der Gesamtströme resultiert aus der Differenz der Phasenlagen der OS-Ströme von Gleichrichterschaltungen und Energiesparlampen. In Tabelle 5.2 finden sich die Werte der Harmonischen für den Gesamtstrom I, die Spannung U_{AT} am Abgang des Transformators und der Spannung U_{End} am Ende der Versorgungsleitung.

Ordnung v	ohne ESL			ESL (5.3 %)			ESL (13.7 %)		
	I	U_{AT}	U_{End}	I	U_{AT}	U_{End}	I	U_{AT}	U_{End}
	A	in %		A	in %		A	in %	
3	5.86	0.2	0.46	6.69	0.23	0.5	9.31	0.31	0.60
5	4.14	1.8	1.86	2.69	1.73	1.75	1.80	1.62	1.63
7	3.00	0.15	0.15	2.80	0.26	0.3	3.33	0.43	0.48
9	1.51	0.15	0.36	2.46	0.25	0.6	3.88	0.39	0.72

Tabelle 5.2 Zusammenfassung der Beträge für OS-Ströme und OS-Spannungen für 3 Arten der Belastung

Die Verringerung des 5. und 7. OS-Stromes bedeutet für den Gesamtverzerrungsgrad des Stromes (THD_I) im Fall der geringeren Belastung mit ESL ein geringes Sinken von 12.30 % auf 12.27 % (Tabelle 5.3). Obwohl bei 3. und 9. Harmonischen des Stromes ein Anstieg zu verzeichnen ist, kompensieren dies 5. und 7. Bei stärkerer Belastung kommt es aber dann doch zu einer Erhöhung der THD_I auf 15.7 %

	ohne ESL	ESL (5.3 %)	ESL (13.7 %)
THD_I in %	12.30	12.27	15.70

Tabelle 5.3 Werte für THD_I bei 3 Belastungsfällen

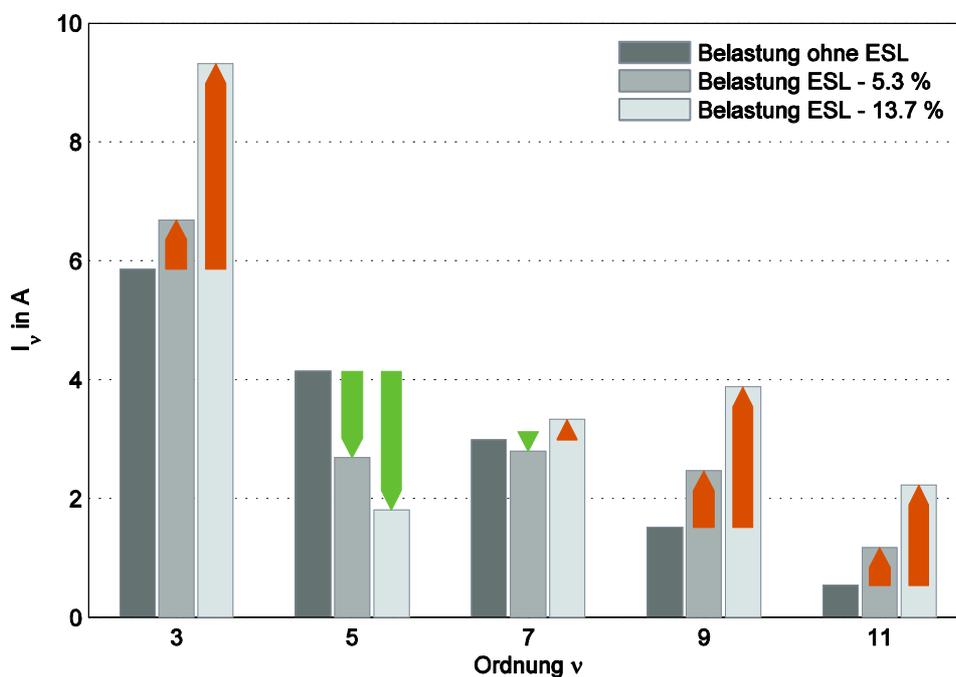


Abbildung 5.2 Amplituden der OS-Ströme im Niederspannungsnetz ohne ESL und mit Belastung von ESL für zwei Belastungsfälle (5.3 % und 13.7 %)

Eindeutige Tendenzen sind in Abbildung 5.2 an 3., 5. und 9. OS des Stroms feststellbar. Die Ströme der dritten und 9. Harmonischen nehmen zu. Der Grund dafür ist die Lage der Stromzeiger. Die Stromzeiger für ESL und GR in Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4 verdeutlichen grafisch die Ursachen für die Änderungen der Stromüberschwingungen.

Die Stromzeiger der dritten OS liegen im gleichen Quadranten, besitzen aber noch eine Phasendifferenz von rund 80° . Es kommt zu keiner linearen Überlagerung, führt aber dennoch zu einer Erhöhung. Im Fall der 9. Harmonischen des Stroms ist die Phasendifferenz der beiden Stromzeiger von ESL und GR mit 35° deutlich geringer. Damit ergibt sich auch die starke Zunahme für I_9 .

Eine Phasendifferenz von ca. 160° ergibt sich zwischen den Stromzeigern der 5. OS-Ströme. Dadurch kommt es bei I_5 zu einer signifikanten Abnahme. Bei der siebten Stromüberschwingung sind sowohl eine Zu- wie Abnahme erkennbar, die Lage des Stromzeigers der ESL etwas unter 90° ist die Ursache dafür. Für die Belastung mit wenigen ESL (5.3 %) ist sogar eine Abnahme des

Stromes erkennbar (Abbildung 5.2). Mit größer werdender Belastung kehrt sich dieser Effekt um und es kommt zu einer geringen Erhöhung der 7.OS des Stromes.

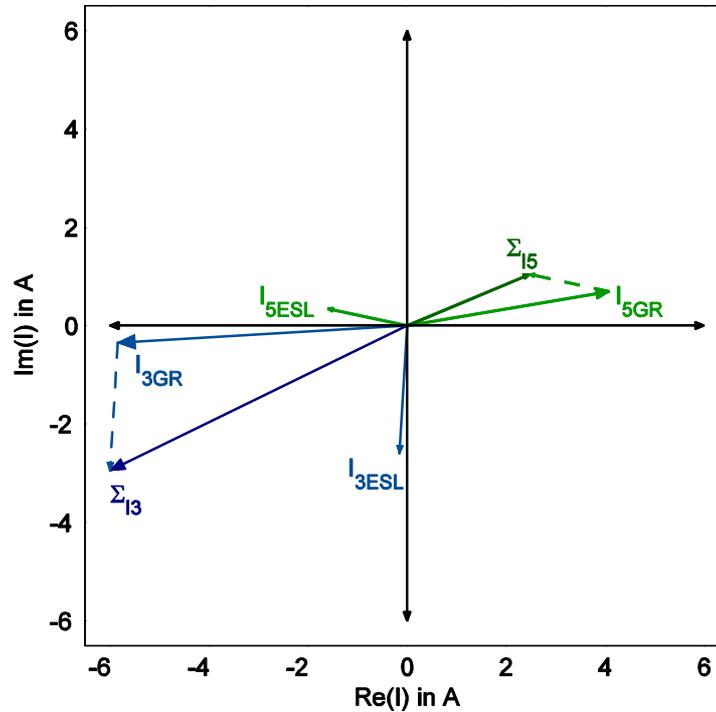


Abbildung 5.3 Stromzeiger von ESL und Gleichrichter der 3. und 5. OS und deren vektorielle Summe

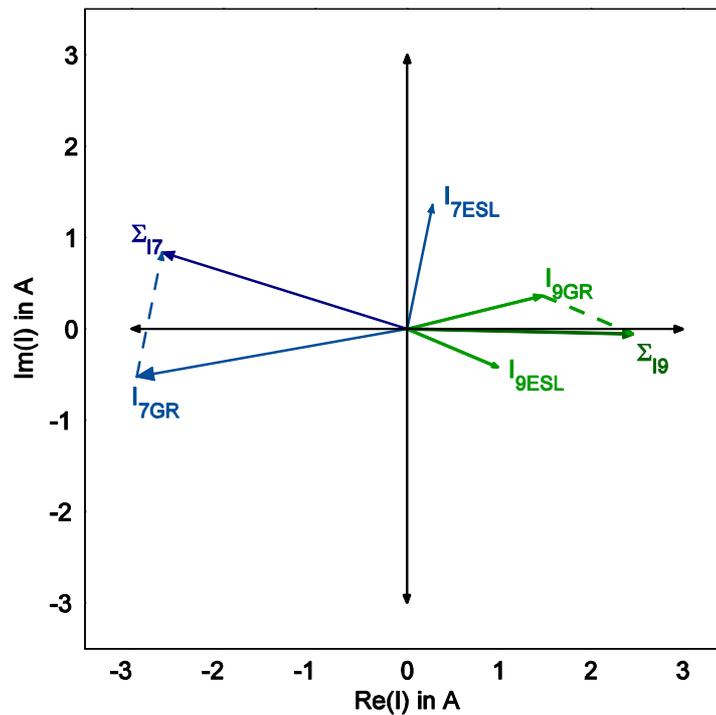


Abbildung 5.4 Stromzeiger von ESL und Gleichrichter der 7. und 9. OS und deren vektorielle Summe

Eine Veränderung der Amplituden der OS-Ströme zieht auch eine Änderung der Amplituden für die OS-Spannungen nach sich. Jetzt kommen die Impedanzen im Netz zum Tragen. Ströme höherer Ordnung wirken sich wegen den induktiven Leitungsbelägen stärker aus, das ist an den Unterschieden der Zunahme von 3. und 9. OS-Spannung erkennbar. Diese beiden Spannungen verhalten sich gleich wie ihre zugehörigen Ströme, da keine Vorbelastung aus dem MS-Netz vorliegt. An der 5. OS-Amplitude der Spannung kann wie beim Strom eine Abnahme beobachtet werden (Abbildung 5.5). Die Vorbelastungen aus dem MS-Netz spielen vorwiegend bei der 7. OS der Spannung eine Rolle. In einem Belastungsfall (ESL 5.3 %) kann eine Abnahme von I_7 beobachtet werden. Trotz der Verringerung des 7.OS-Stromes ergibt sich eine Erhöhung der 7. Spannungsharmonischen. Der zugehörige Spannungsabfall über die Impedanzen, also die Komponente für U_7 aus dem NS-Netz ($U_{7GR,ESL}$), addiert sich jetzt aber günstiger zur Komponente von U_{7MS} welche aus dem MS-Netz übertragen wird (siehe Abbildung 5.6).

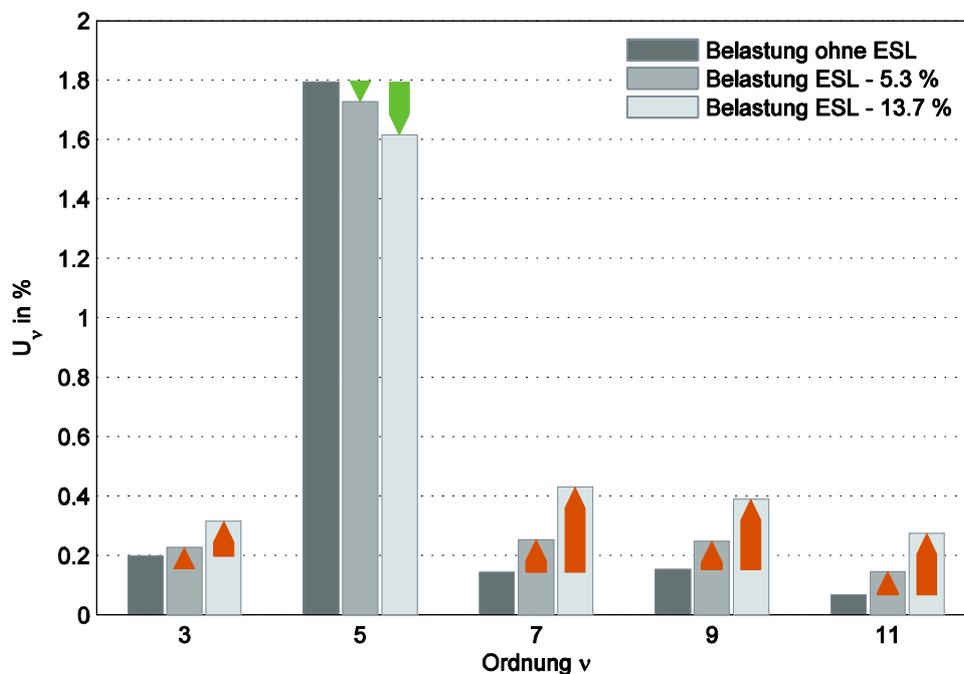


Abbildung 5.5 Beträge der Oberschwingungsspannungen an der NS-Seite des Transformators für drei Belastungsfälle

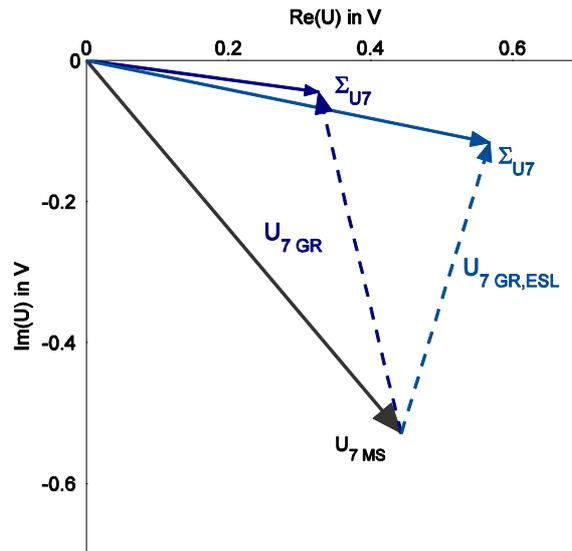


Abbildung 5.6 Darstellung der Addition der Spannungszeiger für die 7. OS bei zwei Belastungsfällen (Referenz und 5.3 % ESL)

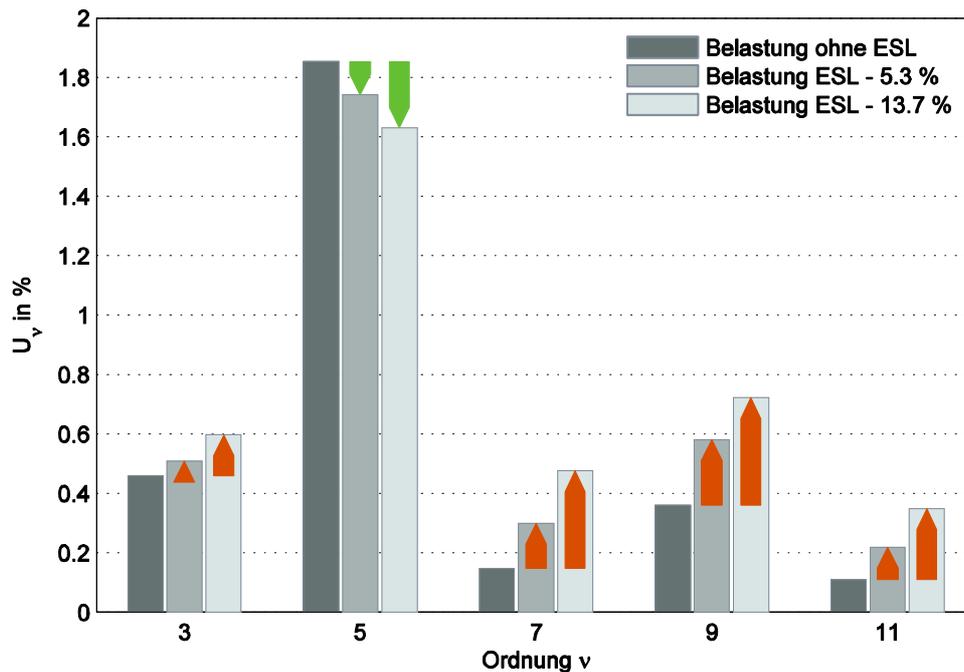


Abbildung 5.7 Beträge der Oberschwingungsspannungen am Ender der Leitung bei drei Belastungsfällen

Am Ender der Versorgungsleitung ergeben sich ähnliche Verhältnisse für die OS-Spannungen wie am Beginn, nur dass durch die zusätzlichen Leitungsimpedanzen die auftretenden Effekte verstärkt werden.

Der Gesamtverzerrungsgrad der Spannung erhöht sich bis zum Ende der Leitung, aufgrund der Spannungsabfälle der OS-Ströme an den Leitungsimpedanzen. Eine merkbare Änderung des Gesamtverzerrungsgrades durch die zusätzliche Belastung mit ESL lässt sich nur am Ende der Leitung erkennen. Die Spannung direkt an den Transformatorabgängen ändert zwar ihre spektrale Zu-

sammensetzung, doch da vor allem die Zunahmen der meisten OS-Spannungsamplituden im Bereich von 0.2 % bis 0.4 % liegen wirkt sich dies nur wenig aus. Die Abnahme der 5. OS von 1.8 auf 1.6 % kompensiert dies.

		Abgang Transformator	Ende der Leitung
THD _U ohne ESL	in %	1.82	1.96
THD _U mit ESL (5.3 %)	in %	1.80	2.00
THD _U mit ESL (13.7 %)	in %	1.81	2.06

Tabelle 5.4 Werte aus der Simulation für THD

5.3 Ergebnisse anderer Studien

Die in Kapitel 1.5 angeführten Studien und Untersuchungen an der ESL sind ein Beweis für die lange und weltweite Beschäftigung mit diesem Thema.

Bereits 1995 beschäftigte sich eine österreichische Studie im Auftrag der Energieforschungsgemeinschaft des VEÖ mit den Wirkungen durch Energiesparlampen [15]. Die Ergebnisse dieser Studie basieren auf einer Vielzahl von Messungen mit einem 1440 Lampen umfassenden Kollektiv. Die in [15] festgestellten Abweichungen anhand von Einzelmessungen in der Stromform und dem Zeitpunkt der Stromaufnahme sind in dieser Deutlichkeit nicht mehr vorhanden (Abbildung 3.3). Auch die Normung in ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 [7] für Beleuchtungseinrichtungen unter 25 W trägt dazu bei, ein immer einheitlicheres Verhalten für den Stromfluss der ESL zu erzeugen.

Die Messungen in [15] zur Netzurückwirkung erfolgten an drei verschiedenen Arten von Netzformen (großstädtisches NS-Netz mit hoher Wohndichte, ländliches Niederspannungsnetz, Gebäudeinstallation mit hoher Beleuchtungsinstallation und hohem Anteil sonstiger nichtlinearer Verbraucher), um die unterschiedlichen Vorbelastungen der OS-Pegel und Auslastungsgrade des Netzes zu berücksichtigen.

Der Einsatz der ESL führte in den ländlich geprägten Netzen zu einem deutlicheren Anstieg im Verzerrungsfaktor des Stromes. Im städtischen Bereich kommt es zu Überlagerungseffekten bei 5. und 7. OS-Strömen, wodurch teilweise der Verzerrungsgrad des Transformatorstroms sank.

Um diesen Effekt aufzuklären wurde im Rahmen der Arbeit der Strom eines TV-Gerätes analysiert. Durch die zeitliche Verschiebung und unterschiedliche Kurvenform der 5. und 7. OS-Ströme von ESL und TV-Gerät ergibt sich für beide eine überwiegende Auslöschung, da sie in Gegenphase liegen. Die Auslöschungseffekte der 5. OS können anhand der Simulation und vergleichenden Messungen an ESL und PC-Monitoren nachvollzogen werden. Bei der 7. OS ergibt sich ein differenziertes Bild. Die Ströme der 7. OS von ESL und Verbrauchern mit Schaltnetzteilen liegen nicht mehr so stark in Gegenphase. Zusätzlich hat die Novellierung der ÖVE/ÖNORM 61000-3-2 [7] eine Reglementierung für OS-Emission für Verbraucher über 75 W geschaffen. Diese Verbraucher sind heute zumeist mit einer aktiven Leistungsfaktorkorrektur (Active PFC) versehen. Damit fallen größere Verbraucher wie TV-Geräte und PC weg.

Eine aktuellere Studie aus dem Jahr 2007 [12] kommt zu ähnlichen Ergebnissen. Die Ergebnisse dieser Arbeit deuten für dritte und neunte Oberschwingung auf eine Erhöhung hin und für fünfte und siebte Oberschwingung der Versorgungsspannung auf eine Reduktion.

Damit unterscheiden sich das Ergebnis für die Entwicklung der 7. OS der Spannung der Studie [12] von dem in der vorliegenden Arbeit. Unterschiede in der Herangehensweise und Behandlung dieser Thematik können ausgemacht werden.

Die Nachbildung der ESL für die Simulation in [12] wurde mit einem variablen Reaktanz realisiert, der aus den gemessenen Verläufen für $u_{(t)}$ und $i_{(t)}$ von 8 ESL gemittelt wurde. Eine Berücksichtigung der Verzerrung der Spannung ist damit nicht gegeben. Weiters ist der Verzerrungsgrad der Versorgungsspannung mit 5.1 % ohne die Belastung mit ESL am Ende der Versorgungsleitung deutlich höher als die 2.0 % in der vorliegenden Arbeit. Mit den Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit, von den Einflüssen der Oberschwingungsbelastung der Spannung auf die Stromaufnahme der ESL, ist dies der Grund für die Unterschiede in den Detailergebnissen.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wird versucht das Verbrauchsverhaltens von ESL darzustellen und ein Modell zu erstellen, welches die Auswirkungen auf den Einsatz der ESL in den Niederspannungsnetzen zeigt. Neben den Unterschieden in der Stromaufnahme der ESL aufgrund unterschiedlicher Typen, werden Abhängigkeiten der Stromaufnahme durch verschiedene Faktoren der versorgenden Spannung, wie z.B. deren Amplitude und Oberschwingungsbelastung festgestellt. Die abschließende Simulation des vermehrten Einsatzes der Energiesparlampe in Haushalten zeigt wie sich die Oberschwingungspegel in den Niederspannungsnetzen durch den vermehrten Einsatz von ESL entwickeln werden.

Stromaufnahme der Energiesparlampe

Bei den am Markt erhältlichen ESL ist durchgehend eine gewisse Einheitlichkeit der Stromaufnahme zu erkennen. An allen untersuchten Lampentypen zeigt sich sowohl im zeitlichen Verlauf des Stromes wie in weiterer Folge in dessen Spektrum kein grundlegend unterschiedliches Verhalten. Die Unterschiede von 16 ESL und deren Amplituden der Stromspektren liegen, wenn diese auf die aufgenommene Wirkleistung bezogen werden, innerhalb einer zu erwartenden statistischen Schwankungsbreite.

Die Abweichungen der Phasenlagen der Oberschwingungsströme sind von größerer Bedeutung, da sich damit Summationseffekte bzw. Auslöschungseffekte nachvollziehen lassen. Eine geringe Abweichung der Phasenlagen wie z.B. bei ESL gleichen Typs ermöglicht eine lineare Addition von OS-Strömen. Hingegen müssen bei unterschiedlichen Typen von ESL die Phasenlagen stärker berücksichtigt werden. Vor allem die OS-Ströme ab der 9. Ordnung nehmen dadurch bei Summenbildung von unterschiedlichen ESL ab. Für eine Simulation eines NS-Netzes welche Energiesparlampen als Last berücksichtigt sind diese Effekte zu beachten.

Einfluss der Versorgungsspannung auf die Stromaufnahme

Die Amplitude der Versorgungsspannung, die OS-Pegel und deren Phasenlage haben einen großen Einfluss auf die Stromaufnahme der ESL. Den wichtigsten Beitrag steuern dabei die Oberschwingungsspannungen des Versorgungsnetzes bei. Die Wechselwirkungen zwischen einzelnen OS-Spannungen und OS-Strömen sind in erster Linie von der Höhe der Amplitude der eingebrachten OS-Spannung abhängig. Eine Erhöhung der OS-Belastung der Spannung führt zu einem linearen Verhalten der OS-Ströme der ESL. Wie stark oder wie schwach die Zunahme oder Abnahme von Strömen ist hängt von zwei weiteren Faktoren ab. Eine höhere Ordnung der OS-Spannungen scheint einen stärkeren Einfluss zu nehmen und zusätzlich ist noch die Phasenlage der Spannungsharmonischen entscheidend. Der Strom der ESL kann keineswegs als konstanter Faktor gesehen werden. Messungen an Punkten im Niederspannungsnetz zeigen Schwankungen der OS-Pegel in Betrag und Phase. Selbst wenn sich die Schwankungen von Amplituden und Phasenlagen der OS in der Versorgungsspannung nicht in einem so großen wie in der Arbeit betrachteten Bereich befinden, können auch geringe Schwankungen zu Änderungen im Spektrum des

Stromes der ESL führen. Bei weiterer Beobachtung zeigt sich, dass bei Überlagerung von Oberschwingungen im Netz, die Änderungen nicht durch eine Addition der festgestellten Effekte einzelner Spannungsharmonischer beschreibbar sind, beziehungsweise sind die Abweichungen von berechneten Werte zu den Gemessenen mit über 10 % zu groß, als dass von einer ausreichend genauen Näherung ausgegangen werden kann.

Gesamtverzerrung der Spannung

Die Messungen der verzerrten Spannungen durch ESL über eine bekannte Leitungsimpedanz sind der erste Schritt in Richtung der Erfassung von Netzurückwirkungen. Die Messungen zeigen, dass der Verzerrungsgrad der Spannung durch die zusätzliche Belastung mit ESL steigt. Sättigungseffekte in einem Bereich von 8 % der THD_U konnten nicht festgestellt werden (siehe Kapitel 3.4.2). Im Zuge dieser Messungen ist zu Demonstrationszwecken rechnerisch die Abhängigkeit der Stromaufnahme der ESL von der THD_U vernachlässigt worden. Ergibt die Messung, dass sich der Gesamtverzerrungsgrad der Spannung durch zusätzlich ESL erhöht, deuten die Ergebnisse der Rechnung mit konstantem THD_I auf einen Sättigungseffekt und sogar Abnahmen der THD_U durch zusätzliche ESL hin.

Die Betrachtung einzelner OS in der Auswertung zeigt, dass sich die OS nicht im gleichen Maße ändern. Aus einer Änderung des Verzerrungsgrades der Spannung lässt sich somit keine Aussage treffen, ob und wie stark sich die Amplituden der einzelnen OS-Ströme ändern.

Netzurückwirkung

Die Simulation der Wirkung der ESL in einem Niederspannungsnetz gibt eine genaue Auskunft über die Änderung einzelner OS-Spannungen und beschränkt sich nicht nur auf den zu allgemein gefassten Wert des Verzerrungsgrades. Bei zunehmendem Anteil von ESL im NS-Netz ist mit einer Erhöhung der 3. und 9. OS-Komponente zu rechnen. Wie stark diese Erhöhung ausfällt ist von der Anzahl von ESL abhängig. Die 7. Oberschwingung der Spannung zeigt eine zwiespältige Tendenz. Trotz Abnahme des Stromes gleicher Ordnung erhöht sich der Pegel der 7. in der Spannung. Der Grund liegt in der Überlagerung mit der Komponente welche aus dem MS-Netz in das NS-Netz übertragen wird. Die ESL bewirken zusammen mit anderen Gleichrichterlasten (z.B. Schaltnetz-teile) eine Änderung der Phasenlage des Gesamtstromes für die 7. Ordnung und in Folge der zugehörigen Spannung. Die Anteile der 5. OS des Stromes und der Spannung im NS-Netz hingegen zeigen eine klare Tendenz zu einer Reduktion. Da die 5. OS in der Spannung die vorherrschende Ordnung mit einem Pegel von 1.5 % bis 2.0 % ist, wirken sich die Erhöhung anderer Ordnungen, welche in einem Bereich von 0.2 % bis 0.5 % liegen auf eine Änderung der THD_U nur gering aus.

Ausblick

Für eine exaktere Berechnung vor allem der 7. Spannungsharmonischen wäre ein Ausweitung der Simulation auf die Mittelspannungsebene notwendig. Damit könnten Entstehung von Amplitude und Phasenlage der 5. und speziell der 7. Spannungsharmonischen besser nachvollzogen werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] Statistik Austria. (2009) Strom und Gastagebuch. [Online]. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/energie_und_umwelt/energie/energieeinsatz_der_haushalte/index.html
- [2] EU-Kommision. (2009) Verordnung 244/2009 zur Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung von Haushaltslampen mit ungebündeltem Licht. [Online]. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:DE:PDF>
- [3] Europäisches Parlament und Rat. (2009) Richtlinie 2009/125/ EG - Anforderungen an umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. [Online]. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:DE:PDF>
- [4] Deutsche Energie-Agentur dena. (2009) Hintergrundpapier zu Verordnung 244/2009. [Online]. http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Download/Dokumente/Gesetze/Hintergrundpapier-Haushaltsbeleuchtung-EU_09-08-13.pdf
- [5] HyCentA - Hydrogen Center Austria. (2009) Wirkungsgrade und CO₂-Emission verschiedener Energieketten. [Online]. <http://www.hycenta.tugraz.at/Image/Report%20Hy8-2009%20HyCentA%20Research%20GmbH.pdf>
- [6] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik , ÖNORM 50160 , Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen, Mai 2008.
- [7] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, ÖNORM 61000-3-2, EMV; Grenzwerte für Oberschwingungsströme - Geräte Eingangsstrom kleiner 16 A je Leiter, 2005.
- [8] Kerschberger T., "Oberschwingungsspannungen aufgrund von einphasigen Brückengleichrichtern in städtischen Verteilnetzen," TU Graz, Diplomarbeit 2001.
- [9] Gretsch R., "Oberschwingungsverhalten von Verbrauchern mit Spitzenwert-Gleichrichtung am realen Netz," *Elektrizitätswirtschaft - VDEW*, pp. 851 - 857, Oktober 1986.
- [10] Kainka B. (2009) Die Energiesparlampe. [Online]. <http://www.b-kainka.de/bastell12.htm>
- [11] Zawuschnigg Hans, "Beobachtungen an ESL und konventionellen Leuchtstofflampen," in *44. Konferenz für Effizienz in Technik und Wirtschaft*, Wien, 2008, pp. 1-51.
- [12] Matvoz D. and Maksic M., "Impact of CFL on the electric Power Network," , Ljubljana, Slovenia, 2007.
- [13] Watson N. R., Scott T. L., and Hirsch S., "Implications for Distribution Networks of High Penetration of CFL," in *Power Delivery, IEEE Transactions Volume 24 Issue 3*, 2009, pp. 1521-1528.
- [14] Munasinghe K.D.A. and Abeyratne S.G., "Power Quality and Harmonic Loads," in *International Conference on Industrial and Informations Systems*, Sri Lanka, 2006, pp. 52-57.

- [15] Brauner G. and Wimmer K., "Netzurückwirkung von KLL in Niederspannungsnetzen," Schriftenreihe der Energieforschungsgemeinschaft im VEÖ, Wien, Studie 1995.
- [16] Acharya J. Nassif A.B., "An Investigation on the Harmonic Attenuation Effect of Modern CFL," in *Harmonics and Quality of Power, ICHQP 2008*, Wollongong, NSW, 2008, pp. 1-6.
- [17] ÖVE - Österreichischer Verband für Elektrotechnik, ÖNORM 61000-4-7, EMV; Allgemeiner Leitfaden für Messung von Oberschwingungen und Geräten in Energieversorgungsnetzen., 2010.
- [18] DEWETRON Ges.m.b.H. (2009) Technische Referenz für DEWE-Module. [Online]. [http://download.dewetron.com/ media/files/products/signal/daqp/manuals/german/lowres/de-we-modules_techref_223g.pdf](http://download.dewetron.com/media/files/products/signal/daqp/manuals/german/lowres/de-we-modules_techref_223g.pdf)

8 Anhang

Die im Anhang angeführten Grafiken zeigen, dass die in Kapitel 3.3.2 und 3.3.4 getroffenen Vereinfachungen bei Betrachtung nur einer Lampe nur den Informationsverlust der Streuung beinhalten. Das Vorhandensein einer Streuung bei unterschiedlichen Lampentypen wird in Kapitel 3.2.1 behandelt.

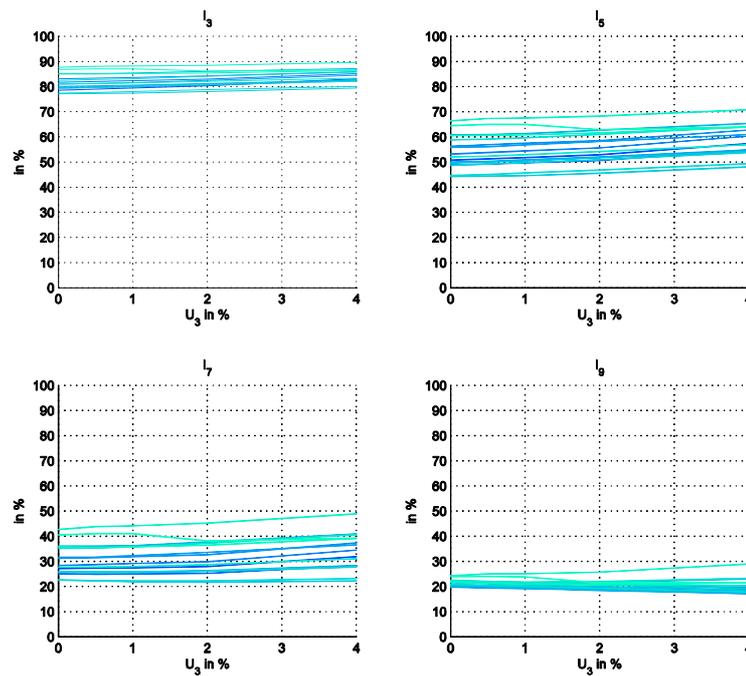


Abbildung 8.1 Darstellung der Oberschwingungsströme in Abhängigkeit der 3. Oberschwingungsspannung für 16 Lampen

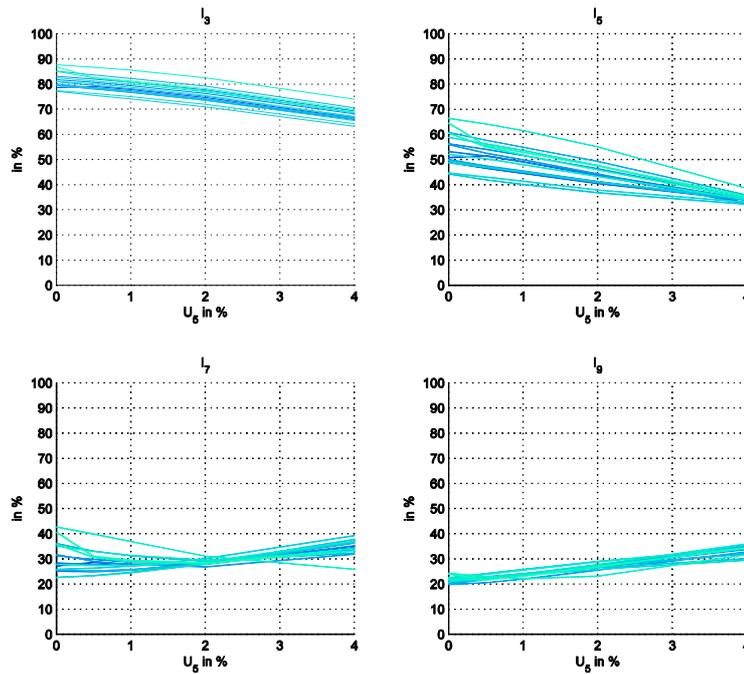


Abbildung 8.2 Darstellung der Oberschwingungsströme in Abhängigkeit der 5. Oberschwingungsspannung für 16 Lampen

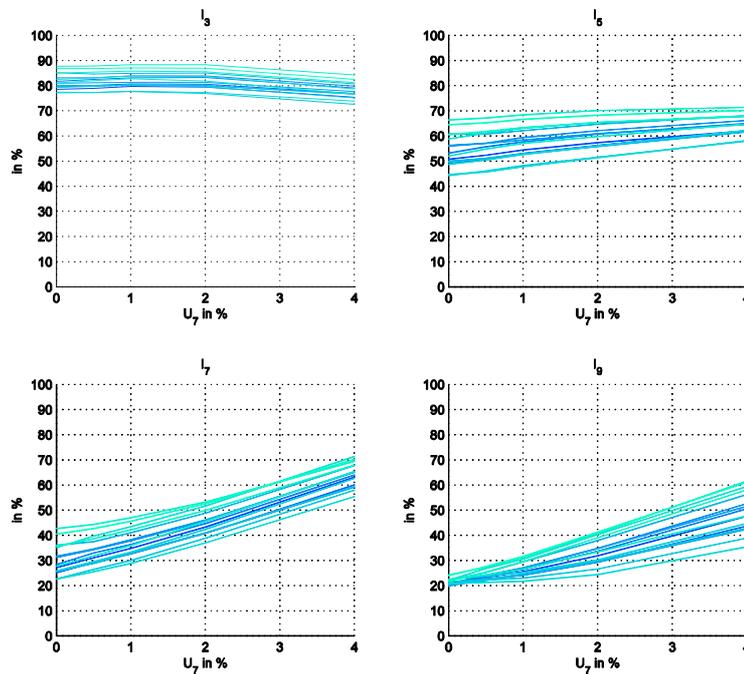


Abbildung 8.3 Darstellung der Oberschwingungsströme in Abhängigkeit der 7. Oberschwingungsspannung für 16 Lampen

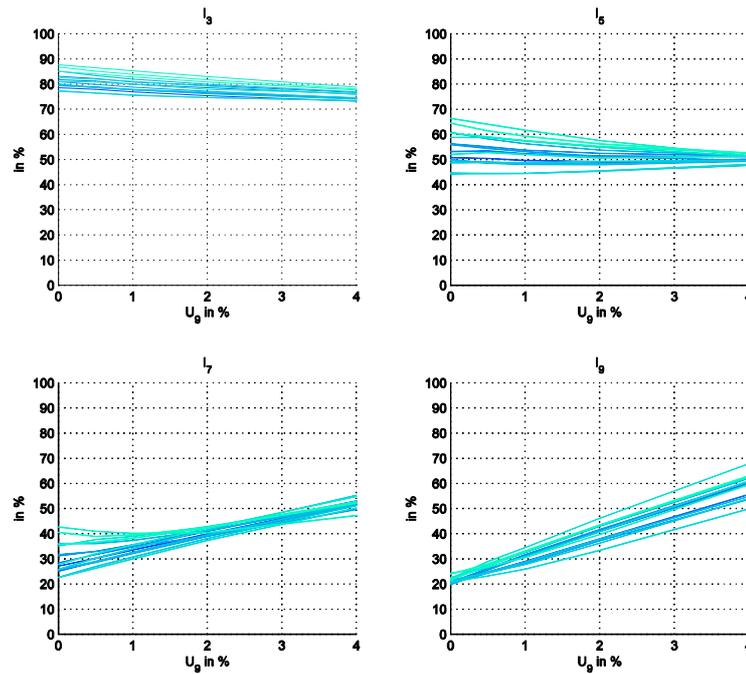


Abbildung 8.4 Darstellung der Oberschwingungsströme in Abhängigkeit der 9. Oberschwingungsspannung für 16 Lampen

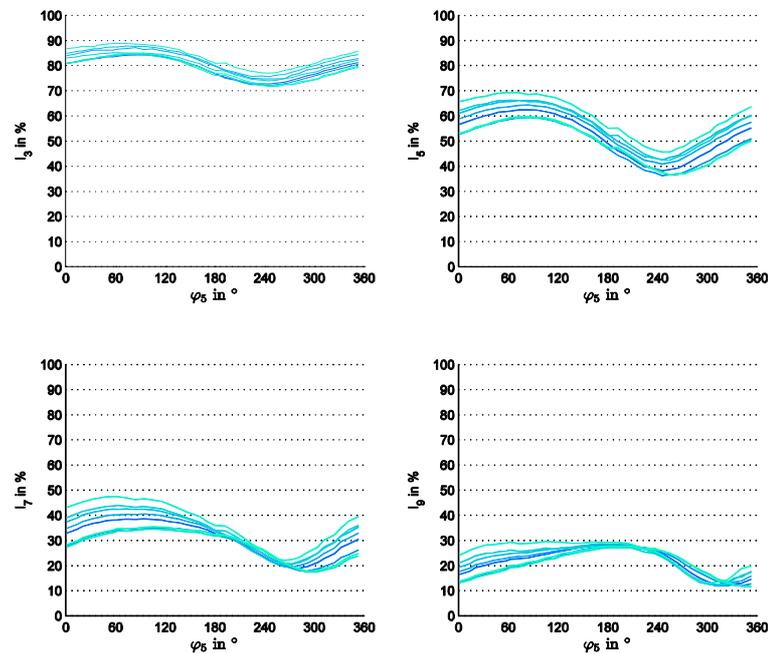


Abbildung 8.5 Darstellung der Oberschwingungsströme in Abhängigkeit der Phasenlage der 5. Oberschwingungsspannung an 8 Energiesparlampen