



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 26. November 2009

Netzurückwirkungen von Energiesparlampen

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Elektrizitätstechnologien & -anwendungen
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Forschungsstiftung Mobilkommunikation
c/o ETH Zürich
Gloriastr. 35
CH-8092 Zürich
www.mobile-research.ethz.ch
maxwave AG
Zeughausstr. 43
CH-8004 Zürich
www.maxwave.ch

Autoren:

Dr. Gregor Dürrenberger, Forschungsstiftung Mobilkommunikation, c/o ETH Zürich,
gregor@mobile-research.ethz.ch
Dr. Georg Klaus, maxwave AG
klaus@maxwave.ch

BFE-Bereichsleiter: Dr. Michael Moser

BFE-Programmleiter: Roland Brüniger

BFE-Vertrags- und Projektnummer: 153426 / 102644

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	5
Resumé	6
Abstract.....	7
1. Ausgangslage	8
2. Ziel der Arbeit.....	9
3. Methode	10
3.1 Mögliche Netzurückwirkungen.....	11
3.1.1 Allgemeines	11
3.1.2 Effektivwert des Stroms	11
3.1.3 Spitzenwert resp. Flankensteilheit des Stroms.....	12
3.1.4 Blindleistung	14
3.1.5 Oberwellen.....	16
3.1.6 Hochfrequente Netzurückwirkungen.....	16
3.2 Messungen und Lampen	17
3.3 Graue Energie	18
4. Ergebnisse und Diskussion.....	19
4.1 Effektivwert des Stroms	19
4.1.1 Vorbemerkungen	19
4.1.2 Ergebnisse.....	19
4.1.3 Beurteilung und Interpretation	20
4.2 Spitzenwert und Flankensteilheit.....	22
4.2.1 Vorbemerkungen	22
4.2.2 Ergebnisse.....	22
4.2.3 Beurteilung und Interpretation	24
4.3 Leistungsparameter	27
4.3.1 Vorbemerkungen	27
4.3.2 Ergebnisse.....	27
4.3.3 Beurteilung und Interpretation	29
4.4 Oberwellen.....	30
4.4.1 Vorbemerkungen	30
4.4.2 Ergebnisse.....	30
4.4.3 Beurteilung und Interpretation	32
4.5 Hochfrequente Netzurückwirkungen.....	33
4.5.1 Vorbemerkungen	33
4.5.2 Ergebnisse.....	33
4.5.3 Beurteilung und Interpretation	35
4.6 Energiesparlampen im Dreiphasensystem	36
4.6.1 Vorbemerkungen	36
4.6.2 Ergebnisse.....	36
4.6.3 Beurteilung und Interpretation	37
4.7 Energiesparlampen im Verteilnetz.....	38
4.7.1 Vorbemerkungen	38
4.7.2 Ergebnisse und Interpretation.....	39

4.8 Graue Energie von Energiesparlampen	42
4.8.1 Bilanzierungsansätze.....	42
4.8.2 Ergebnisse.....	43
4.8.3 Vergleich graue Energie / Betriebsenergie	44
4.8.4 Schlussbemerkung	47
5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen.....	48
6. Abkürzungsverzeichnis	50
7. Referenzen	51
7.1 Literaturverzeichnis.....	51
7.2 Normen- und Richtlinienverzeichnis	52
8. Anhang	
8.1 Tabellarische Übersicht der Messergebnisse	
8.2 Lampenstrom und Momentanleistung	
8.3 Neutralleiterströme bei symmetrischer Belastung	
8.4 Spannungsabfall über Standardimpedanz	
8.5 Oberwellenströme 0Hz bis 10kHz	
8.6 Hochfrequente leitungsgeführte Störspannungen	
8.7 Hochfrequente, leitungsgeführte Störströme	

Zusammenfassung

Problemstellung

Im Gegensatz zur Glühlampe (G) benötigen Energiesparlampen (ESL) ein meist elektronisches Vorschaltgerät mit einer Betriebsfrequenz von etwa 40 kHz. Sowohl der Einschaltvorgang als auch der Dauerbetrieb führt zu Rückwirkungen auf das Energieversorgungsnetz. In diesem Projekt wurde gemessen, welche Netzurückwirkungen verschiedene ESL verursachen und es wurde abgeschätzt, ob der flächendeckende Ersatz von Glühlampen durch ESL die Spannungsqualität der Netzversorgung verringern kann und zu einer erhöhten Belastung der Zuleitungen führen könnte.

Sodann wurden auch die Gesamtenergiebilanzen von ESL und G verglichen, um den energetischen Mehraufwand für die Produktion von ESL dem geringeren Verbrauch im Betrieb gegenüberzustellen.

Hauptergebnisse

Wegen des geringeren Leistungsbedarf erzeugen ESL geringere Zuleitungsverluste als vergleichbare Glühlampen.

Die deutlichsten Netzurückwirkungen werden durch die schnellen Stromänderungen in der ESL erzeugt und können zu kurzzeitigen Spannungseinbrüchen führen, wobei die meisten heutigen Geräte mit derartigen Spannungsänderungen problemlos umgehen können. Trotz der im Einzelfall möglichen Spannungsbeeinflussungen drängen sich keine Massnahmen auf.

Die Netzurückwirkungen können wesentlich vermindert werden, wenn die maximalen Stromänderungen in der ESL reduziert werden. Es wurden diesbezüglich wesentliche Unterschiede zwischen verschiedenen Fabrikaten festgestellt.

Die hochfrequenten Netzurückwirkungen sind normativ geregelt (EN55015) und nicht grösser als beispielsweise bei einem Steckernetzteil. Zusatzstandards für ESL sind nicht notwendig.

Ebenfalls nicht nötig ist gegenwärtig eine Powerfaktorkorrektur.

Auch bei flächendeckendem Einsatz von ESL ist in der Praxis nicht zu erwarten, dass es zu problematischen Netzurückwirkungen kommen wird, insbesondere nicht im gut dimensionierten Schweizer Netz. Allerdings ist die Dimensionierung des Neutralleiters nach heutigem Standard nötig, d.h. es sollten keine Querschnittsreduktionen vorgenommen werden.

Aufgrund der Analyse zur grauen Energie drängen sich ebenfalls keine Massnahmen auf, da ESL fast in jeder Hinsicht besser abschneiden als Glühlampen.

Resumé

Position du problème

A l'inverse des lampes à incandescence classique (LIC), les ampoules basse consommation (ABC) ont généralement besoin d'un ballast électronique, fonctionnant à une fréquence d'environ 40 kHz. Aussi bien le cycle d'allumage que le régime établi perturbent le réseau de distribution d'électricité. L'objectif de ce projet était de mesurer quels sont les perturbations créées sur le réseau par diverses ABC, et d'évaluer si le remplacement à grande échelle des LIC par des ABC peut diminuer la qualité de fourniture d'électricité (distortion harmonique, déformation de tension et de courant), et conduire à une surcharge des lignes électriques.

Les bilans d'énergie globaux des LIC et des ABC ont été comparés, de façon à mettre en regard le surcoût énergétique de production des ABC et leur faible consommation lorsqu'elles sont en fonctionnement.

Principaux résultats

Grâce à une puissance plus faible, les ABC donnent lieu à moins de pertes de transmission que les LIC.

Les effets les plus visibles sur le réseau sont dus aux variations rapides de courant dans les ABC, et peuvent conduire à des chutes de tension, auxquelles la plupart des appareils actuels peuvent sans problème faire face. On ne peut pas exclure des cas pour lesquels il y aurait un problème, mais leur rareté est telle qu'aucune mesure n'est à envisager.

Les effets sur le réseau d'électricité peuvent largement être réduits, si la variation maximale du courant dans les ABC est limitée. D'importantes différences entre les divers produits ont d'ailleurs été mises en évidence.

Les perturbations à haute fréquence sur le réseau sont réglementées (norme EN55015) et ne doivent pas être supérieures à ce qui est créé par les transformateurs secteurs usuels. De nouvelles normes pour les ABC ne sont pas nécessaires. Une correction du facteur de puissance n'est à l'heure actuelle pas non plus nécessaire.

Dans la pratique, en cas d'utilisation généralisée des ABC, il ne faut pas s'attendre à des perturbations problématiques, et particulièrement pas dans le cas d'un réseau bien dimensionné, comme c'est le cas en Suisse. Toutefois, il faut mettre aux normes le régime de neutre dans les installations, en particulier, on ne doit pas rétrécir le diamètre des câbles électriques.

Sur la base de l'analyse de l'énergie grise, aucune mesure ne s'impose non plus, puisque les ABC sont, de quasiment tout point-de-vue, meilleures que les LIC.

Abstract

Definition of the Problem

In contrast to incandescent lamps (IL), energy-saving lamps (ESL) – also called compact fluorescence lamps – almost always require an electronic ballast with an operating frequency of about 40kHz. Both the starting process and continuous operation lead to repercussions in the power supply network. The network repercussions of different ESL will be measured in this project. It will also be assessed if a widespread replacement of incandescent lamps by ESL can reduce the voltage quality of the mains supply and lead to an increased load on the lines. Then the total energy balance of ESL and IL will be compared to show the additional energy needs in manufacture against the reduced consumption in operation.

Main Findings

Due to their lower energy requirements ESL create lower supply losses than comparable incandescent lamps.

The most noticeable network repercussions were caused by the rapid current variations in the ESL and can lead to temporary voltage drops. These current variations do not create a problem for the majority of modern appliances. Despite, in isolated cases, possible voltage interference no precautionary measures are needed.

The network repercussions can be considerably reduced when the greatest current changes in the ESL are reduced. In this respect considerable differences between the different makes were observed.

The high frequency network repercussions are regulated by a norm (EN55015) and are not greater than for example a power adapter. Additional standards for ESL are unnecessary.

At the moment a power factor correction is also unnecessary.

In the case of the use of ESL nationally, it is not to be expected that problematic circuit feedbacks will result in practice particularly not in the well-dimensioned Swiss network. However the dimensions of the neutral conductor must be of the current standards i.e. no reductions in the cross-section should be made.

In addition no measures are needed as a result of the embodied energy analysis as in almost every respect ESL perform better than incandescent lamps.

1. Ausgangslage

Die Absicht, die klassischen Glühlampen bis in einigen Jahren durch energieeffizientere Lampen zu ersetzen, führt dazu, dass sich künftig vermehrt Energiesparlampen (ESL) mit elektronischen Vorschaltgeräten im Netz befinden werden. Es bestehen Bedenken, dass die energieliefernden Werke dadurch vor Probleme gestellt werden könnten. Dies vor allem, weil befürchtet wird, dass der vermehrte Einsatz von ESL zu einer verminderten Spannungsqualität und zu einer erhöhten Belastung der Zuleitungen führen könnte.

Im Gegensatz zur Glühlampe, welche direkt und ohne Hilfelektronik mit Netzfrequenz betrieben wird, benötigen Energiesparlampen ein meist elektronisches Vorschaltgerät mit einer Betriebsfrequenz von etwa 40 kHz. Sowohl der Einschaltvorgang als auch der Dauerbetrieb führt zu gewissen Rückwirkungen auf das Energieversorgungsnetz. Primäre Ursache dieser Rückwirkungen sind Stromänderungen im Frequenzbereich zwischen 0 Hz und einigen zehn Megahertz

Sodann wird im Zusammenhang mit der Nutzung von ESL häufig auch die Frage vom Netto-spareffekt gestellt. Hier gilt es - im Vergleich zur Glühlampe - die höhere Energieeffizienz der ESL im Betrieb, dem grösseren Energiebedarf in Produktion und Entsorgung sowie den höheren Zuleitungsverlusten aufgrund der höheren Blindleistung entgegenzustellen

Bei den Untersuchungen der Netzurückwirkungen geht es weder um eine Gegenüberstellung oder einen Vergleich zwischen verschiedenen Produkten noch geht es darum abzuklären, ob und welche Geräte allenfalls normative Anforderungen mehr oder weniger gut einhalten.

2. Ziel der Arbeit

Folgende Ziele werden mit dem Projekt verfolgt:

- Das Projekt untersucht Netzzurückwirkungen. Dabei werden folgende Aspekte behandelt:
 - Einfluss der Oberwellenströme
 - Einfluss der im Verhältnis zur Wirkleistung erhöhten Zuleitungsverluste von Energiesparlampen gegenüber Glühlampen
 - Beeinflussung der Qualität der Versorgungsspannung durch die nicht sinusförmigen Betriebsströme der Energiesparlampen
 - Hochfrequente, leitungsgeführte Störaussendungen
- Ergänzend dazu werden in einem Literaturkapitel die relevanten Daten für eine Gesamtenergiebilanz-Betrachtung zusammengestellt. In einer solchen Betrachtung werden die Ersparnisse in der Wirkleistung während der Betriebsdauer von ESL den erhöhten Energieaufwänden für Produktion und Entsorgung sowie den Zuleitungsverlusten gegenübergestellt. Für diese ergänzende Betrachtung zur Thematik „Netzzurückwirkungen von ESL“ wird auf bestehende LCA-Daten (LCA: Lifecycle-Analysis) zurückgegriffen.
- Erarbeiten allfälliger Empfehlungen z.H. der Lampenhersteller, der Netzbetreiber und/oder der Gesetzgeber.

3. Methode

Folgende Arbeiten wurden methodisch wie folgt durchgeführt:

Thema	Inhalt / Umsetzung
Literatur- und Normenanalyse	Normen und Normenentwürfe betreffend Netzurückwirkungen von Beleuchtungseinrichtungen
Messung verschiedener ESL im Zeit- und Frequenzbereich 0Hz – 30MHz im Betriebszustand	Messung der Betriebsströme mittels Stromzange und Oszilloskop Messung der Spannungs-, Strom- und Leistungsparameter mittels "Power Harmonics Tester" Messung der leitungsgeführten Störspannungen mittels Netznachbildung und Messempfänger (in Anlehnung an EN 55015) im Frequenzbereich von 20 kHz – 30 MHz Messung der leitungsgeführten Gleich-, resp. Gegentaktströme mittels Stromzange und Messempfänger im Frequenzbereich von 20 kHz – 30 MHz Messung des Spannungsabfalls über einer "Standard-Impedanz"
Messung des Einschaltverhaltens von Energiesparlampen	Messung der Einschaltströme von ESL mittels Stromzange und Oszilloskop
Computerberechnungen aufgrund der mittels Oszilloskop gemessenen Betriebsströme	Berechnung der netzharmonischen Oberwellenströme 0 Hz – 10 kHz Berechnung der üblichen Oberwellenparameter wie THDI, etc. Berechnung der Netzurückwirkungen bei einer Standard-Netzimpedanz Berechnung der Neutralleiterströme zur Abschätzung der Rückwirkungen im Dreiphasennetz
Simulation von Netzurückwirkungen	Überprüfung der berechneten Netzurückwirkungen mittels Modellsimulationen (PSPice)
Analyse der grauen Energieverbräuche von Energiesparlampen und Glühlampen im Vergleich mit Betriebsenergie und (bei ESL) Netzverlusten	Literaturanalyse

Tabelle 1: Methodik

3.1 Mögliche Netzurückwirkungen

3.1.1 Allgemeines

Im Gegensatz zur Glühlampe, welche im Wesentlichen eine ohm'sche Last darstellt, ist die Energiesparlampe eine nichtlineare Last. So ist der Strom durch die Energiesparlampe alles andere als sinusförmig (Abbildung 1). Nichtlinearitäten führen in einer Frequenzbetrachtung zu neuen Frequenzen und damit zu Oberwellen.

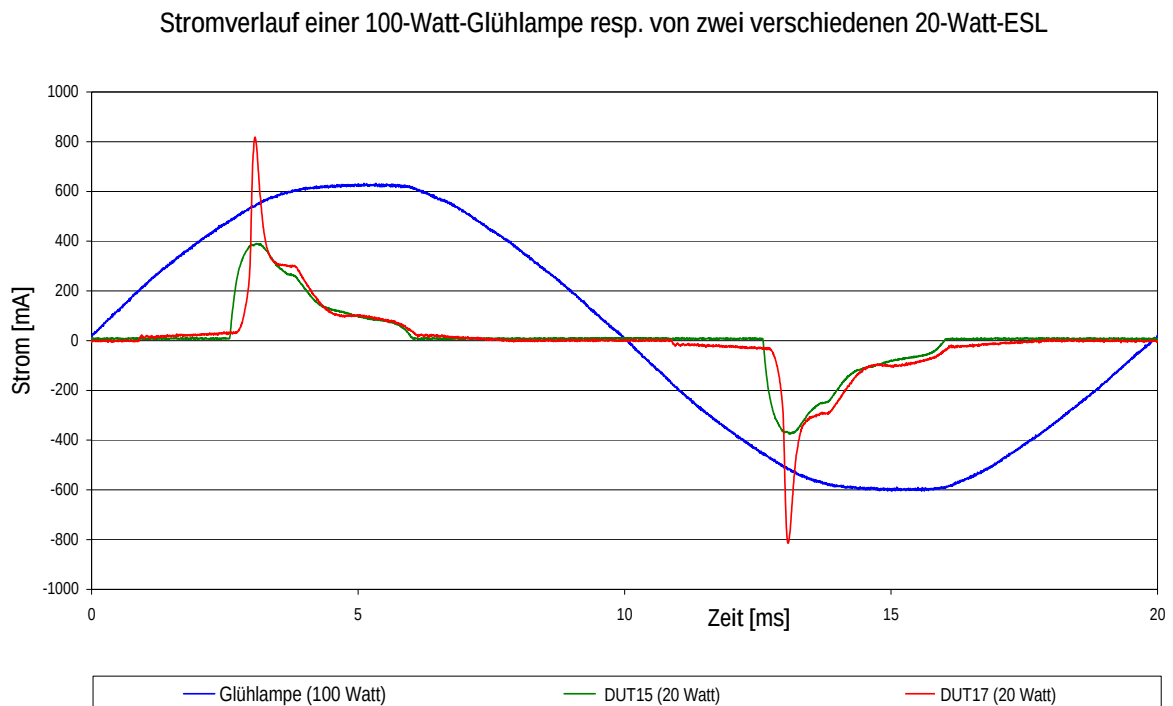


Abbildung 1: Stromverlauf einer 100-Watt-Glühlampe im Vergleich zum Stromverlauf von zwei verschiedenen 20-Watt-ESL (DUT = Device under Test, siehe Abschnitt 3.2). Der Stromverlauf ist typisch für Energiesparlampen ohne Leistungsfaktorkorrektur (Power Factor Correction, PFC)

Weil der Strom bei einer ESL stark von der Sinusform abweichen kann, sind für eine Beurteilung der Rückwirkungen insbesondere der Effektivwert ("true RMS"), der Spitzenwert und die grösste Flankensteilheit von Bedeutung. Die klassische Darstellung in Grund- und Oberwellen ist zwar auch hier möglich, jedoch teilweise weniger anschaulich.

Um die Auswirkungen von Glühlampen mit den Auswirkungen von Energiesparlampen vergleichen zu können, wird – wie von den meisten ESL-Herstellern deklariert – von einem Faktor 5 für die Wirkleistung ausgegangen. D.h., dass für einen Vergleich beispielsweise eine 100-Watt-Glühlampe mit einer 20-Watt-ESL gleichgesetzt wird.

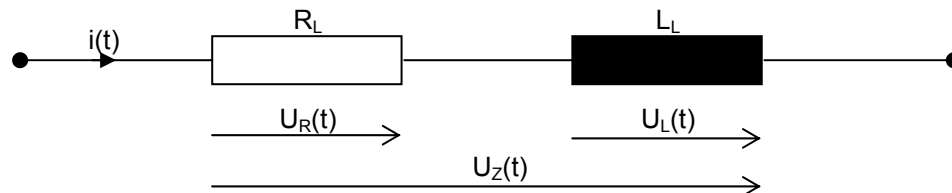
3.1.2 Effektivwert des Stromes

Der Effektivwert des Stromes ist insbesondere massgebend für die Verluste in den Zuleitungen (Erwärmung der Leiter) und damit auch für die Dimensionierung der Leiter. Wegen der nicht-sinusförmigen Stromkurve ist der Effektivwert bei einer ESL höher als bei einem ohmschen Verbraucher gleicher Leistung.

3.1.3 Spitzenwert resp. Flankensteilheit des Stromes

Der Spitzenwert und die Flankensteilheit des Stromes nehmen über die Netzimpedanz einen direkten Einfluss auf die Spannungsqualität.

Wird die Zuleitung vereinfacht durch die Serieschaltung eines Widerstandes (R_L) und einer Induktivität (L_L) charakterisiert, so verursacht der Spitzenwert des Stromes über R_L resp. die grösste zeitliche Stromänderung über L_L den maximalen Spannungsabfall (Abbildung 2).



$i(t)$: zeitlicher Stromverlauf

$U_R(t)$: Spannungsabfall über dem ohm'schen Anteil der Zuleitung: $U_R(t) = R_L \cdot i(t)$

$U_L(t)$: Spannungsabfall über dem induktiven Anteil der Zuleitung: $U_L(t) = L_L \cdot \frac{di}{dt}$

$U_Z(t)$: gesamter Spannungsabfall über der Zuleitungsimpedanz: $U_Z(t) = U_R(t) + U_L(t)$

Abbildung 2: Spannungsabfall über der Zuleitungsimpedanz

In Tabelle 2 sind die maximalen Netzimpedanzen gemäss IEC TR 60725:2005 für die Schweiz dargestellt:

% der Kunden	Maximale komplexe Impedanz bei 50 Hz	R_L [Ω]	L_L [μH]
95 %	$0.60 + j 0.36$	0.60	1150
90 %	$0.42 + j 0.25$	0.42	796
85 %	$0.30 + j 0.18$	0.30	573

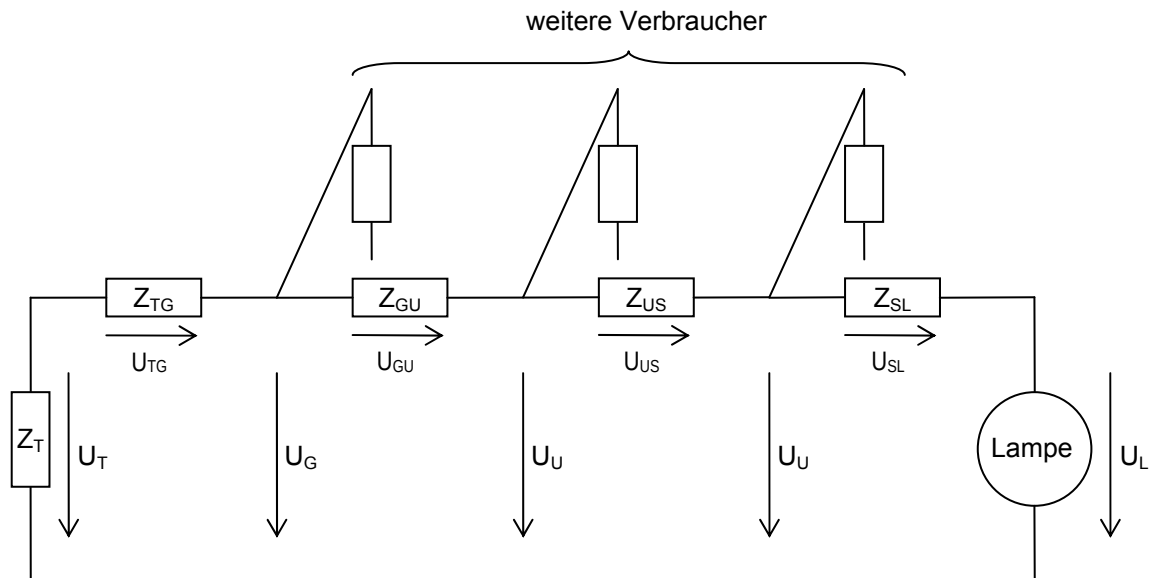
Tabelle 2: Netzimpedanzen in der Schweiz

Als "Standard-Impedanz", welche in verschiedenen Normen Eingang findet, wird eine komplexe 50-Hz-Impedanz von $0.40 + j 0.25$ Ohm verwendet. In ca. 90% der Fälle ist somit die Netzimpedanz für Schweizer Kunden kleiner oder gleich gross wie die "Standard-Impedanz". Die "Standard-Impedanz" wird dabei wie folgt auf Phasen- und Neutraleiter aufgeteilt:

$$Z_{\text{Phase}} = 0.24 + j 0.15 \Omega$$

$$Z_{\text{Neutral}} = 0.16 + j 0.10 \Omega$$

Die Beeinflussung der Spannungsqualität im praktischen Umfeld kann vereinfacht wie in Abbildung 3 dargestellt werden (einphasige Darstellung der Impedanzen und Spannungen):



- Z_T : Impedanzanteil des Transformators
- Z_{TG} : Impedanz der Zuleitung zwischen Transformator und Gebäude
- Z_{GU} : Impedanz der Zuleitung zwischen Gebäude-(Haupt-) Verteilung und Unterverteilung
- Z_{US} : Impedanz der Zuleitung zwischen Unterverteilung und Steckdose
- Z_{SL} : Impedanz der Zuleitung zwischen Steckdose und Lampe
- U_{TG} : Spannungsabfall über der Zuleitung zwischen Transformator und Gebäude
- U_{GU} : Spannungsabfall über der Zuleitung zwischen Gebäude-(Haupt-) Verteilung und Unterverteilung
- U_{US} : Spannungsabfall über der Zuleitung zwischen Unterverteilung und Steckdose
- U_{SL} : Spannungsabfall über der Zuleitung zwischen Steckdose und Lampe
- U_T : Spannung am Transformator (in der Regel fast sinusförmig)
- U_G : Spannung in der Gebäude-(Haupt-)Verteilung
- U_U : Spannung in der Unterverteilung
- U_S : Spannung an der Steckdose
- U_L : Spannung über der Lampe

Abbildung 3: Spannungsabfall über den Zuleitungsabschnitten

Der Lampenstrom erzeugt über den einzelnen Zuleitungsimpedanzen einen Spannungsabfall. Die Spannungsqualität für "weitere Verbraucher" ist im obigen Modell an der Steckdose am "Schlechtesten", weil die Impedanz zwischen Transformator und Steckdose und damit der Spannungsabfall am Grössten sind.

Neben dem Lampenstrom trägt natürlich auch der Strom von jedem anderen Verbraucher zur Spannungsqualität bei.

Aufgrund des nicht sinusförmigen Lampenstroms einer ESL wird die Spannungsqualität im Betriebszustand bei jeder Halbwelle der 50-Hz-Spannung beeinflusst.

Neben dem Stromverlauf im Betriebszustand beeinflusst auch der Strom im Einschaltmoment die Spannung. Diese Beeinflussung während dem Einschalten ist allerdings ein "vorübergehendes und kurzzeitiges" Ereignis.

3.1.4 Blindleistung

Bei linearen Verbrauchern ist die Blindleistung dadurch charakterisiert, dass eine Phasenverschiebung zwischen 50-Hz-Strom und 50-Hz-Spannung besteht (Verbraucher mit induktiven resp. kapazitiven Anteilen). Neben der Wirkleistung, welche den effektiven "Verbrauch" in der Last darstellt, beschreibt der 50-Hz-Blindleistungsanteil den pendelnden Energieaustausch zwischen induktiven und kapazitiven Elementen im Versorgungsnetz. Diese Energiependelung erzeugt einen zusätzlichen (Blind-) Strom und als Folge erhöhte Zuleitungsverluste (Abbildung 4).

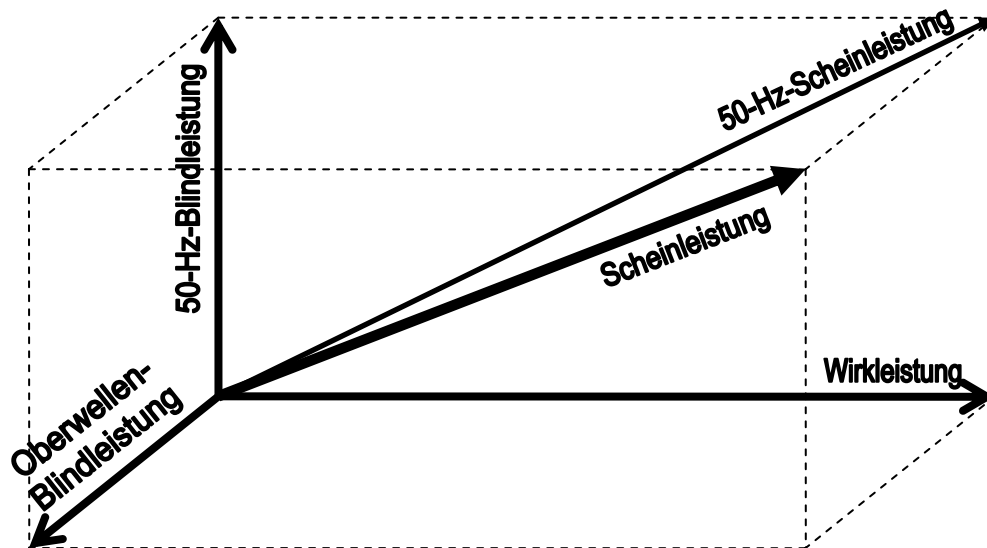


Abbildung 4: Prinzipieller Zusammenhang zwischen Wirk-, Blind- und Scheinleistung

Nichtlineare Vorgänge, wie sie in einer ESL auftreten, erzeugen neue Frequenzen (Oberwellen). Insbesondere ist der Strom durch eine ESL wie in Abbildung 1 dargestellt alles andere als sinusförmig. Die Oberwellenströme tragen bei einer reinen 50-Hz-Versorgungsspannung nur zur Blindleistung und nicht zur Wirkleistung bei. Der Blindleistungsanteil durch Oberwellen ist eine Folge des nicht sinusförmigen Stromverlaufs. Eine Interpretation der Blindleistung durch Energiependelung gilt nur für die 50-Hz-Blindleistung. Die Oberwellen-Blindleistung ist eine Folge der Darstellung eines nicht sinusförmigen Stromes im Frequenzbereich. Es wird deshalb oft – wie im folgenden Diagramm dargestellt – zwischen 50-Hz-Blindleistung und Oberwellen-Blindleistung unterschieden. Bei den meisten Energiesparlampen ist der Oberwellen-Blindleistungsanteil deutlich grösser als der 50-Hz-Blindleistungsanteil. Formell bilden Wirkleistung und Blindleistung zusammen die sogenannte Scheinleistung.

Die Momentanleistungen der Glüh- resp. Energiesparlampen aus Abbildung 1 haben folgenden zeitlichen Verlauf:

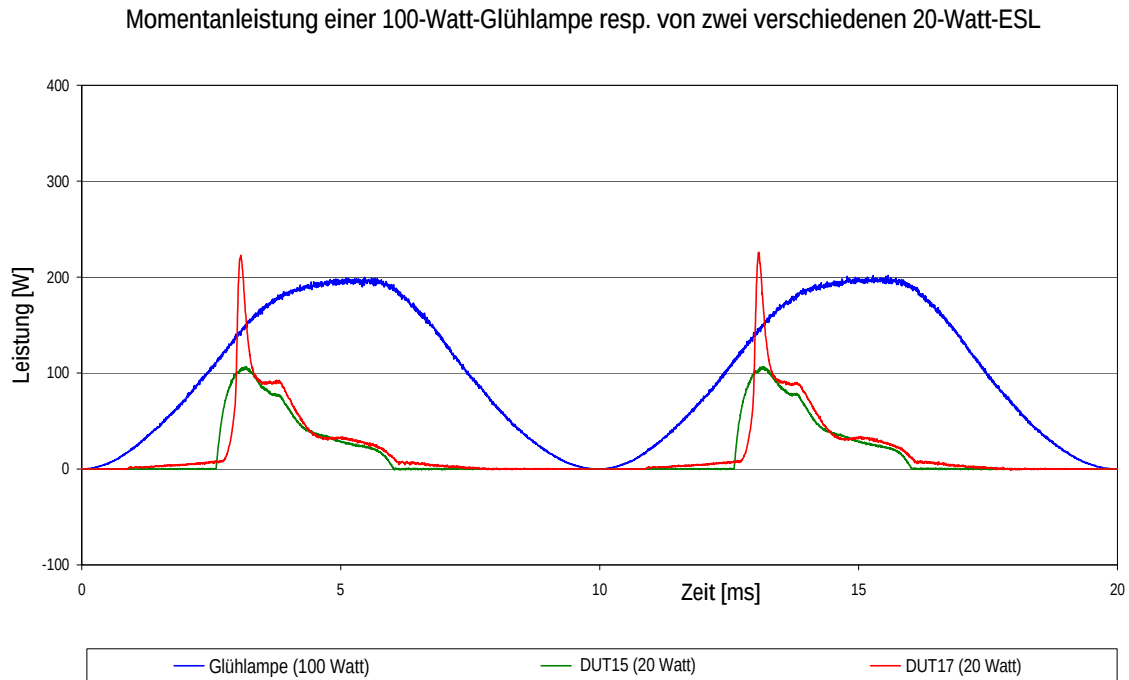


Abbildung 5: Momentanleistung einer Glühlampe im Vergleich zu zwei ESL (für den Stromverlauf siehe Abb. 1)

Die von einem Elektrozähler gemessene Energie entspricht der Fläche unter der jeweiligen Kurve in obiger Abb. 5. Da die Momentanleistungen praktisch nur positive Anteile besitzen, wird auch im Elektrozähler die "volle Fläche" gemessen und letztlich verrechnet. Dies gilt auch dann, wenn die Momentanleistung keinen sinusförmigen Verlauf besitzt. Der Oberwellenanteil des Stromes trägt damit nicht dazu bei, dass Energieanteile – beschrieben als Oberwellen-Blindleistung – durch die Stromverbrauchsmessung nicht erfasst werden könnten. Die klassische 50 Hz-Energiependelung (50 Hz-Blindleistung), welche die Zuleitungsverluste erhöht, aber nicht in die Elektro-Verbrauchsmessung im Elektrozähler eingeht, wird einzig durch die Phasenlage des 50-Hz-Stromanteils beschrieben. Die oberwellenbedingten Blindleistungsanteile tragen zwar zur Erhöhung der Zuleitungsverluste bei, jedoch ohne die Energiemessung zu "unterlaufen".

Formell lässt sich der beschriebene Sachverhalt wie folgt darstellen:

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

$p(t)$: Momentanleistung (Leistung als Funktion der Zeit)

$u(t)$: Spannungsverlauf über die Zeit (in den vorliegenden Betrachtungen als reine und damit sinusförmige 50-Hz-Spannung angenommen)

$i(t)$: Stromverlauf über die Zeit

$$W(T) = \int_{t_0}^{T+t_0} p(t) dt = U_{50RMS} \cdot I_{50RMS} \cdot \cos \varphi_{50} \cdot T$$

W : während der Dauer T bezogene elektrische Energie (="verrechnete Energie")

t_0 : Zeitpunkt des Beginns der Energiemessung

T : Dauer der Energiemessung

U_{50RMS} : Effektivwert der Versorgungsspannung

I_{50RMS} : Effektivwert des 50-Hz-Anteils des Stromes

$\cos \varphi_{50}$: Phasenverschiebung zwischen U_{50RMS} und I_{50RMS}

Da $p(t)$ praktisch nur positive Werte annimmt entspricht $W(T)$ der gesamten Fläche unter $p(t)$. Der Energiebezug lässt sich aus der 50-Hz-Spannung und dem 50-Hz-Anteil des Stromes beschreiben und umfasst die gesamte Fläche unter $p(t)$.

3.1.5 Oberwellen

Wie bereits erwähnt, führen nichtlineare Vorgänge und nichtlineare Schaltelemente in einer ESL zu neuen Frequenzen (lineare Lasten sind nicht in der Lage neue Frequenzen zu erzeugen). Letztlich sind die Oberwellenströme das Ergebnis der Fourierzerlegung eines nicht-sinusförmigen Stromverlaufs.

Je nach Problemstellung kann die direkte Verwendung der Stromkurve im Zeitbereich (mit Effektivwert, Spitzenwert, Flankensteilheit, etc.) schneller zum Ziel führen als eine Zerlegung der Stromkurve in Oberwellen. Bei Problemstellungen mit einem Frequenzgang kann die Oberwellenbetrachtung nützlicher sein. Beide Betrachtungsweisen beschreiben dasselbe Phänomen aus unterschiedlichen Blickwinkeln.

Im Dreiphasensystem der elektrischen Energieversorgung haben die ungradzahligen Vielfachen der 150-Hz-Oberwellenströme (150 Hz, 450 Hz, 750 Hz, ...) sowie der Gleichstromanteil (0 Hz) die Eigenschaft, dass sich diese Stromanteile im Neutralleiter summieren, während sich beispielsweise die 50-Hz-Grundwellenanteile kompensieren. Die Summierung der Ströme im Neutralleiter führt zu einer erhöhten Belastung und damit Erwärmung des Neutralleiters und über die Neutralleiter-Impedanz zu einem erhöhten Spannungsabfall.

Da die Stromkurve einer Energiesparlampe sehr stark von der Sinusform abweicht und bei vielen Sparlampen nur während einem Teil einer Halbwelle wesentliche Anteile besitzt, ist auch bezüglich der Neutralleiterströme eine direkte Betrachtung im Zeitbereich teilweise einfacher und anschaulicher.

3.1.6 Hochfrequente Netzzrückwirkungen

Das Leuchtrohr einer ESL wird mit einem nicht-sinusförmigen Signal mit einer Grundfrequenz von ca. 40 kHz zum Leuchten gebracht. Obwohl dieses Signal im Wesentlichen unabhängig von der 50-Hz-Netzfrequenz ist, sind gewisse Rückwirkungen technisch nicht zu vermeiden. Die Rückwirkungen äussern sich als Störsignale (vornehmlich Störströme) auf den Netzleitungen und breiten sich entlang der Netzleitungen vornehmlich leitungsgeführt aus. Diese Störsignale können – falls entsprechende Pegel erreicht werden – andere im Netz betriebene Geräte stören.

3.2 Messungen und Lampen

Insgesamt wurden 17 Energiesparlampen unterschiedlicher Bauart und Leistung gemessen. Zum Vergleich wurde eine konventionelle 100-Watt-Glühlampe und eine 70-Watt-Glühlampe vom Typ "Eco Classic30" gemessen. Die "EcoClassic30" entspricht einer konventionellen 100-Watt-Glühlampe, besitzt jedoch das Energie-Label "C" und wird im Folgenden als "70-Watt-Halogen-Glühlampe" bezeichnet.

Die Messungen der Strom- und Leistungsparameter wurden mit einem "Power Harmonics Tester" (Fluke 39) durchgeführt. Zusätzlich wurden Strom und Spannung sowohl im Betriebszustand als auch beim Einschalten mit einem Oszilloskop und damit im Zeitbereich gemessen.

Die Datenanalyse hat gezeigt, dass die Messungen mittels Oszilloskop wesentlich genauere und plausiblere Ergebnisse liefern als die Messungen mit dem "Power Harmonics Tester". Aus diesem Grund werden im Folgenden ausschliesslich die Daten der Oszilloskop-Messung verwendet.

Die Leistungsparameter werden somit numerisch aus den digitalisierten Messdaten errechnet. Ebenso werden die Oberwellenanteile numerisch mittels Fourieranalyse bestimmt. Da die digitalisierten Messdaten über eine ausreichend hohe Auflösung verfügen, konnten die Oberwellen bis 10 kHz bestimmt werden.

Für nähere Angaben zu den Hochfrequenzmessungen wird auf Kap. 4.5 verwiesen.

Die vollständigen Messergebnisse sind im Anhang im Detail dargestellt und werden im Folgenden zusammengefasst und kommentiert.

Die gemessenen Lampen werden bewusst anonymisiert und mit DUT 1 bis DUT 19 bezeichnet (DUT: Device Under Test), wobei es sich bei DUT 6 um die 100-Watt-Glühlampe und bei DUT 19 um die 70-Watt-Halogen-Glühlampe handelt.

3.3 Graue Energie

Um die Einspareffekte eines Ersatzes von Glühlampen durch Energiesparlampen korrekt abzuschätzen, gilt es, dem niedrigeren Stromverbrauch von ESL die erhöhten Energieaufwendungen für deren Herstellung (graue Energie) sowie die höheren Netzverluste entgegenzustellen.

Zur Bestimmung der grauen Energie von Glühlampen und Energiesparlampen wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. In einer Literaturrecherche sind insgesamt 14 Publikationen mit Daten identifiziert worden (Tabelle 3). Eine Publikation (Ramroth 08) wurde für die Auswertung ausgeschlossen, weil die Resultate nur in CO₂-Äquivalenten vorlagen und die Umrechnung über Konversionsfaktoren sehr unsicher ist.

Die Tabelle zeigt, dass nur wenige Autoren eine vollständige, detaillierte und transparente Life Cycle Analyse (LCA) durchgeführt haben. Viele Arbeiten geben sich mit pauschalen Angaben zufrieden. Um eine minimale Vergleichbarkeit herzustellen, ist für die vorliegenden Zwecke nur die graue Energie der Produktion berücksichtigt worden, d.h., die Energieaufwendungen für die Fabrikation der verwendeten Materialien sowie für die Herstellung der Lampen (Prozessenergie). Distribution und Entsorgung wurden nicht berücksichtigt.

Studie	Typ	Grunddaten				Graue Energie (in kWh)						
		Watt	Brenn-dauer in h	Brenn-dauer normiert	Lumen	Mate-rial	Herstel-lung	Produk-tion	Entsor-gung	Prod. Ents.	Vertei-lung	Grau-/Mlmh***
EUP 08**	G	54	1000	1000	594	0.1	0.1	0.3	0.3	0.6	14.4	0.5
	ESL	13	6000	8000	600	2.8	0.6	3.3	0.0	3.3	14.7	0.7
Gydesen 91**	G	60	1000	1000	730	0.3	0.2	0.4	•	•	•	0.6
	ESL	15	10000	8000	900	1.7	1.4	3.1	•	•	•	0.4
Ramroth 08*	G	100	1000	1000	1200	?	0.4	0.4	•	•	1.2	0.3
	ESL	23	10000	8000	1200	?	?	15.0	•	•	?	1.6
Lange 98**	G	75	1000	1000	960	?	?	0.9	•	•	•	0.9
	ESL	15	15000	8000	900	?	?	3.4	•	•	•	0.5
Müller 08**	G	60	1000	1000	710	?	?	0.8	•	•	•	1.2
	ESL	11	15000	8000	660	?	?	4.0	•	•	•	0.8
Frischknecht 96**	G	60	1000	1000	710	?	?	•	?	0.8	?	1.2
	ESL	11	15000	8000	660	?	?	•	?	3.0	?	0.6
Tesco in: Matthews 09	G	60	1000	1000	710	?	?	0.9	•	•	•	1.3
	ESL	15	4000	8000	900	?	?	2.3	•	•	•	0.3
Sima-Pro in: Matthews 09	G	60	1000	1000	600	?	?	0.2	•	•	•	0.3
	ESL	11	8000	8000	600	?	?	2.2	•	•	•	0.5
RUMBA 07	G	60	1000	1000	710	?	?	0.8	•	•	•	1.2
	ESL	11	8000	8000	600	?	?	3.3	•	•	•	0.7
Königstein 09	G	60	1000	1000	600	?	?	•	?	0.8	?	1.3
	ESL	12	8000	8000	600	?	?	•	?	7.4	?	1.5
Parsons 06	G	100	2000	1000	1400	?	?	0.6	•	•	1.6	0.5
	ESL	18	8000	8000	1100	?	?	•	0.0	3.3	8.0	0.4
Mani 94**	G	75	1000	1000	960	0.5	0.1	0.6	-0.05	0.5	0.01	0.6
	ESL	15	8000	8000	900	7.9	1.6	9.5	-0.4	9.0	0.01	1.3
Frischknecht 06**	G	100	1000	1000	1000	?	?	0.4	0.03	0.4	0.1	0.4
	ESL	20	6000	8000	1000	?	?	3.6	0.1	3.7	0.2	0.4
Jolliet 01**	G	60	1000	1000	600	0.5	0.1	0.6	•	•	0.1	1.1
	ESL	11	6000	8000	600	4.1	2.9	7.1	•	•	0.3	1.5
Schnitt ohne Ramroth	G	68	1077	1000	791			0.6		0.6		0.8
	ESL	14	9000	8000	771			4.2		4.9		0.7

* Basis: CO₂e; Umrechnung über Konversionsfaktoren sehr unsicher

** Energiebasis graue Energie: inkl. Vorketten

*** Mlmh: 1 Mio. Lumenstunden

^ nur Material und Herstellung (Ausnahmen gelb markiert)

nicht berücksichtigt (siehe *)

Berücksichtigte Werte für graue Energie

Abweichend (Produktion UND Entsorgung)

Tabelle 3: Übersicht der Studien mit verfügbaren Daten (ESL=Energiesparlampe; G=Glühlampe)

4. Ergebnisse und Diskussion

4.1 Effektivwert des Stromes

4.1.1 Vorbemerkungen

Wie in Kap. 3.2 erwähnt, wurde der Effektivwert des Stromes numerisch aus den digitalisierten Messdaten im Zeitbereich berechnet ("True RMS").

In den folgenden Tabellen und Abbildungen werden die getesteten Lampen als DUT (Device under Test) bezeichnet. Die getestete Glühlampe wird mit "G" bezeichnet, die getestete Halogen-Glühlampe mit "H".

Um die verschiedenen Lampen vergleichen zu können, wird im Folgenden der gemessene Effektivwert des Stromes jeder ESL auf eine Leistung von 20 Watt normiert. Damit werden die Ergebnisse vergleichbar mit den Messergebnissen für die 100-Watt-Glühlampe resp. für die 70-Watt-Halogen-Glühlampe. Es gelten folgende Beziehungen:

"gemessen": gemessener Wert, dieser Wert ist auch anhängig von der Leistung der Lampe

"normiert": der "normierte" Wert ist der gemessene Wert multipliziert mit dem Hochrechnungsfaktor

Der Hochrechnungsfaktor wird wie folgt bestimmt:

$$\text{Hochrechnungsfaktor} = \frac{20 [\text{Watt}]}{\text{gemessene Leistung} [\text{Watt}]} ; \text{gilt für alle ESL}$$

$$\text{Hochrechnungsfaktor} = \frac{100 [\text{Watt}]}{\text{gemessene Leistung} [\text{Watt}]} ; \text{gilt für die 100-Watt-Glühlampe}$$

$$\text{Hochrechnungsfaktor} = \frac{70 [\text{Watt}]}{\text{gemessene Leistung} [\text{Watt}]} ; \text{gilt für die 70-Watt-Halogen-Glühlampe}$$

4.1.2 Ergebnisse

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
gemessene Leistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
Hochrechnungsfaktor	[---]	1.13	2.01	0.91	1.35	1.70	0.98	3.74	1.90	3.52	1.65
Effektivwert gemessen	[mA]	79.9	44.8	154.4	102.5	81.9	443.2	36.0	70.9	38.0	77.4
Effektivwert normiert	[mA]	90.6	90.2	140.6	137.9	139.2	435.1	134.5	135.0	133.6	127.7

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
gemessene Leistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
Hochrechnungsfaktor	[---]	1.86	1.65	1.12	2.09	1.14	1.55	0.97	1.44	0.96
Effektivwert gemessen	[mA]	78.5	84.2	119.3	66.4	122.0	61.1	146.8	96.4	315.6
Effektivwert normiert	[mA]	146.0	138.9	134.1	138.7	138.8	94.7	142.6	138.5	304.6

Tabelle 4: Effektivwerte der Lampenströme, (DUT = Device under Test, G = Glühlampe, H = Halogenglühlampe)

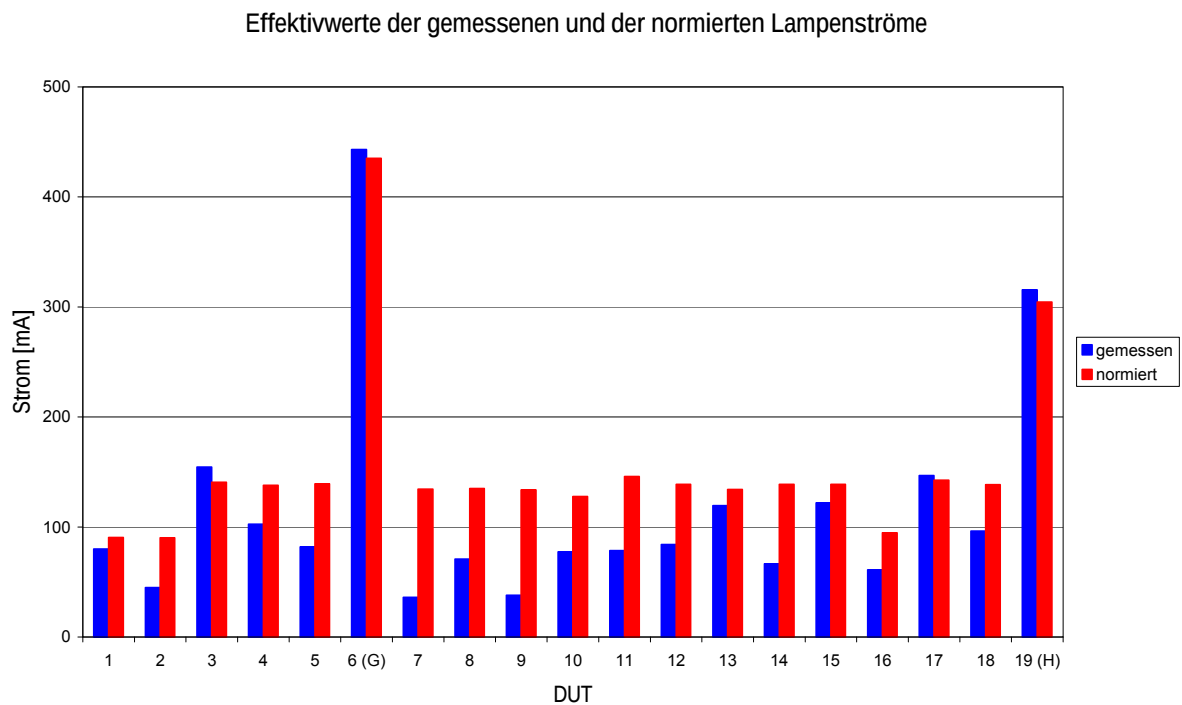


Abbildung 6: Effektivwert der Ströme

4.1.3 Beurteilung und Interpretation

Obwohl eine Energiesparlampe im Gegensatz zur Glühlampe einen wesentlichen, oberwellenbedingten "Blindstrom" bezieht, ist der Effektivwert des Stroms trotzdem geringer als bei vergleichbaren Glühlampen (Tabelle 4 resp. Abbildung 6). Wird eine Glühlampe also durch eine gleichwertige Energiesparlampe ersetzt, so sinkt der mittlere Zuleitungsverlust bei einer einphasigen Betrachtung. Für den mittleren Zuleitungsverlust gilt im Wesentlichen folgende Beziehung:

$$P_L = I_{RMS}^2 \cdot R_L \text{ resp. } P'_L = I_{RMS}^2$$

P_L : Verlustleistung in der Zuleitung [W]
 P'_L : spezifische Verlustleistung in der Zuleitung [W/Ω]
 R_L : ohm'scher Widerstand der Zuleitung
 I_{RMS} : Effektivwert des Stroms

Um die Verlustleistung in den Zuleitungen zu charakterisieren müssen die spezifischen Verlustleistungen verglichen werden (Tabelle 5, Abbildung 7):

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
gemessene Leistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
Hochrechnungsfaktor	[---]	1.13	2.01	0.91	1.35	1.70	0.98	3.74	1.90	3.52	1.65
P'_L gemessen	[mW/Ω]	6.4	2.0	23.8	10.5	6.7	196.4	1.3	5.0	1.4	6.0
P'_L normiert	[mW/Ω]	8.2	8.1	19.8	19.0	19.4	189.3	18.1	18.2	17.8	16.3

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
gemessene Leistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
Hochrechnungsfaktor	[---]	1.86	1.65	1.12	2.09	1.14	1.55	0.97	1.44	0.96
P'_L gemessen	[mW/Ω]	6.2	7.1	14.2	4.4	14.9	3.7	21.6	9.3	99.6
P'_L normiert	[mW/Ω]	21.3	19.3	18.0	19.2	19.3	9.0	20.3	19.2	92.8

Tabelle 5: spezifische Zuleitungsverluste verursacht durch die Lampenströme

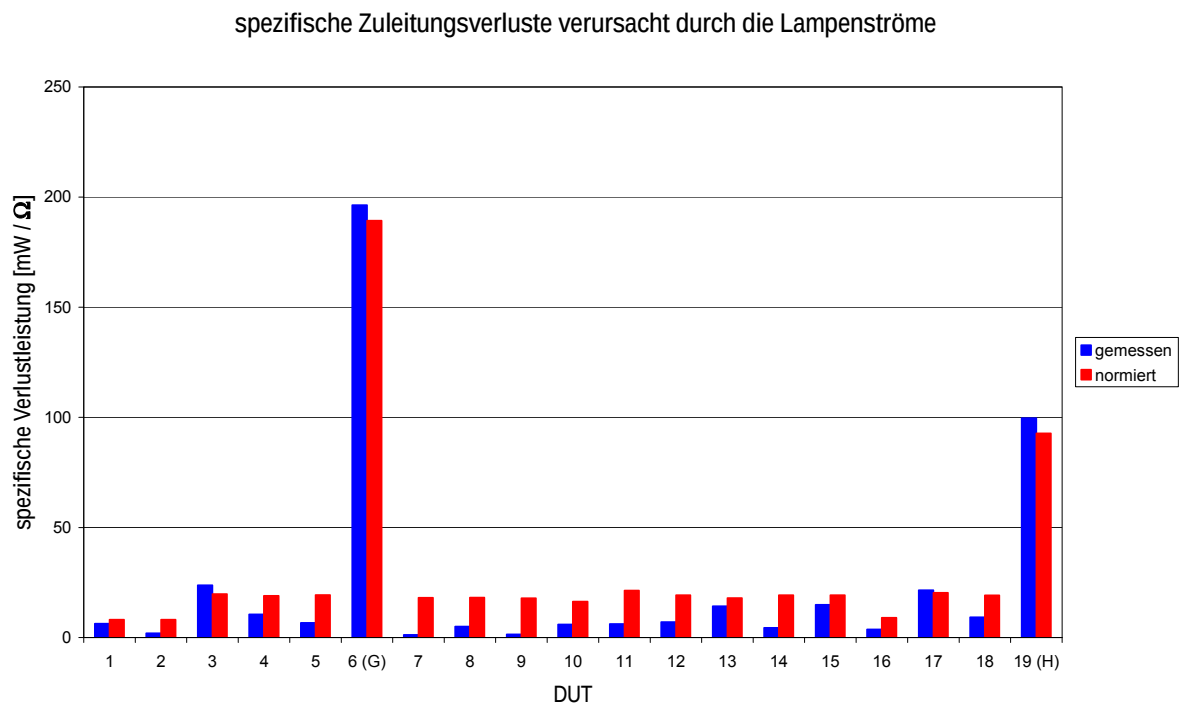


Abbildung 7: Spezifische Zuleitungsverluste

Betrachtet man die Situation hinsichtlich der "Stromrechnung" so werden bei einer Glühlampe (DUT 6) 100 Watt verrechnet, bei einem teilweise nicht verrechenbaren – spezifischen Zuleitungsverlust von ca. 190 mW/Ω. Bei einer Halogenglühlampe sind die Verhältnisse 70 Watt zu 93 mW/Ω. Bei vergleichbaren Energiesparlampen werden 20 Watt verrechnet, bei einem spezifischen Zuleitungsverlust von maximal 21.3 mW/Ω (DUT 11). Trotz des prozentual zur Leistung höheren Stroms bei einer ESL gegenüber Glühlampen werden - wegen des insgesamt geringeren Stroms - prozentual weniger Verluste in den Zuleitungen erzeugt (quadratische Abhängigkeit). Selbst relativ zur Leistung erzeugen Energiesparlampen also geringere ohm'sche Verluste als vergleichbare Glühlampen.

Die Betrachtungen in diesem Kapitel gelten für einphasige Netzbetrachtungen. Für Betrachtungen im Dreiphasennetz wird auf Kapitel 4.6 verwiesen.

4.2 Spitzenwert und Flankensteilheit

4.2.1 Vorbemerkungen

Für den Vergleich zwischen den Energiesparlampen und der Glühlampe werden im Folgenden die Spitzenwerte und die Flankensteilheiten wiederum auf die vergleichbare Leistung normiert. Insbesondere bezüglich der Flankensteilheit ist diese Normierung eine worst-case-Annahme, da eine grössere Leistung nicht zwangsläufig auch eine höhere Flankensteilheit zur Folge haben muss. Je nach Elektronik kann die Flankensteilheit im Wesentlichen auch unabhängig von der Leistung sein.

4.2.2 Ergebnisse

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
gemessene Leistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
Hochrechnungsfaktor	[---]	1.13	2.01	0.91	1.35	1.70	0.98	3.74	1.90	3.52	1.65
Effektivwert gemessen	[mA]	79.9	44.8	154.4	102.5	81.9	443.2	36.0	70.9	38.0	77.4
Effektivwert normiert	[mA]	90.6	90.2	140.6	137.9	139.2	435.1	134.5	135.0	133.6	127.7
Spitzenwert gemessen	[mA]	146.2	79.6	619.1	296.6	246.1	618.9	97.1	186.5	101.5	199.2
Spitzenwert normiert	[mA]	165.6	160.1	563.9	398.9	418.4	607.5	362.8	355.1	357	328.7
max. di/dt gemessen	[A/s]	949	1033	6415	3116	2627	198	1811	1635	1784	1516
max. di/dt normiert	[A/s]	1075	2077	5843	4191	4466	194	6765	3113	6274	2502
Anstiegszeit 10/90	[ms]	4.212	3.948	0.172	0.136	0.236	3.1	0.068	0.116	0.072	0.208

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
gemessene Leistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
Hochrechnungsfaktor	[---]	1.86	1.65	1.12	2.09	1.14	1.55	0.97	1.44	0.96
Effektivwert gemessen	[mA]	78.5	84.2	119.3	66.4	122.0	61.1	146.8	96.4	315.6
Effektivwert normiert	[mA]	146.0	138.9	134.1	138.7	138.8	94.7	142.6	138.5	304.6
Spitzenwert gemessen	[mA]	335.5	251.6	343.0	193.9	384.1	145.1	820.6	289.1	440.4
Spitzenwert normiert	[mA]	624.2	415.1	385.5	405	436.9	224.9	797.4	415.5	425
max. di/dt gemessen	[A/s]	2777	3036	2230	2445	2329	372	8362	3562	141
max. di/dt normiert	[A/s]	5165	5009	2507	5106	2649	577	8125	5119	136
Anstiegszeit 10/90	[ms]	0.116	0.132	0.256	0.12	0.28	4.02	0.196	0.112	3.01

Tabelle 6: Spitzenwert und Flankensteilheit der Lampenströme

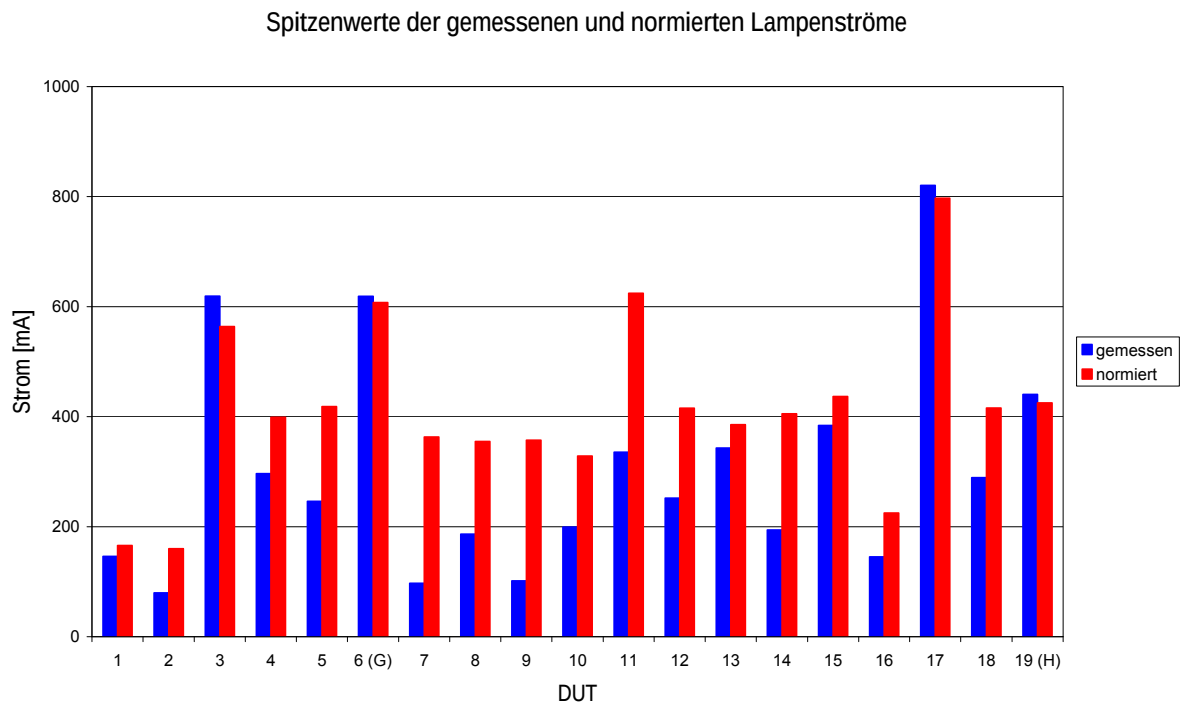


Abbildung 8: Spitzenwerte der Lampenströme

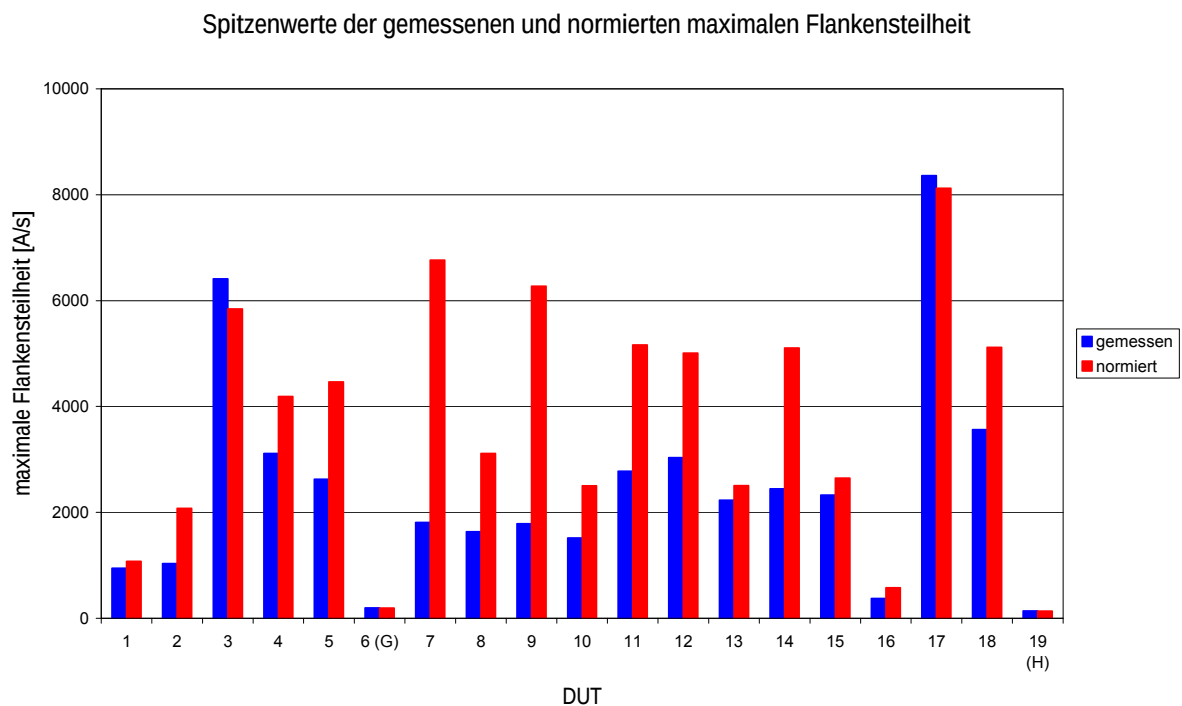


Abbildung 9: maximale Flankensteilheit der Lampenströme (maximale zeitliche Stromänderung)

4.2.3 Beurteilung und Interpretation

Wie aus Abbildung 1 und Abbildung 8 ersichtlich ist, kann der Spitzenwert des Stromes bei einer ESL höher sein als bei einer vergleichbaren Glühlampe (z.B. DUT 17). Wegen der ca. fünfmal kleineren Leistung ist bei den meisten Energiesparlampen der Spitzenwert jedoch kleiner als bei einer vergleichbaren Glühlampe.

Deutliche Unterschiede zwischen ESL und Glühlampe bestehen hinsichtlich der Flankensteilheit (Abbildung 9). Ausser bei den ESL mit "Power Factor Correction (PFC)" (DUT 1, DUT 2 und DUT 16) ist die Flankensteilheit deutlich grösser als bei Glühlampen. Die schnelle Stromänderung führt zu einem Spannungsabfall über der Zuleitungsimpedanz. Unter Berücksichtigung der "Standard-Impedanz" und der Formeln gemäss Kap. 4.2 werden die maximalen Spannungsabfälle wie folgt berechnet:

$$U_R(t) = R_L \cdot i(t) \text{ mit } R_L = 0.40 \Omega$$

$$U_L(t) = L_L \cdot \frac{di}{dt} \text{ mit } L_L = 796 \mu H$$

$$\Delta U_{\max} = \max(U_{R(t)} + U_{L(t)})$$

Die nachfolgenden Werte " $\Delta U_{\max}$ aus Strommessung" und " $\Delta U_{\max}$ normiert" wurden numerisch gemäss obigen Formeln aus den gemessenen Strömen ermittelt. Zusätzlich wurde der Spannungsabfall auch direkt über einer "Standard-Impedanz" gemessen.

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
gemessene Leistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
Hochrechnungsfaktor	[---]	1.13	2.01	0.91	1.35	1.70	0.98	3.74	1.90	3.52	1.65
Spitzenwert gemessen	[mA]	146.2	79.6	619.1	296.6	246.1	618.9	97.1	186.5	101.5	199.2
Spitzenwert normiert	[mA]	165.6	160.1	563.9	398.9	418.4	607.5	362.8	355.1	357	328.7
Flankensteilheit gemessen	[A/s]	949	1033	6453	3187	2627	227	1855	1637	1784	1542
Flankensteilheit normiert	[A/s]	1075	2077	5878	4286	4466	222	6932	3116	6274	2543
Anstiegszeit 10/90	[ms]	4.212	3.948	0.172	0.136	0.236	3.1	0.068	0.116	0.072	0.208
$\Delta U_{\max}$ aus Strommessung	[V]	0.75	0.81	5.29	2.53	2.08	0.50	1.48	1.33	1.43	1.27
$\Delta U_{\max}$ normiert	[V]	0.85	1.64	4.82	3.41	3.54	0.49	5.51	2.53	5.03	2.10
$\Delta U_{\max}$ gemessen	[V]	1.66	3.8	4.26	2.3	2.12	0.848	1.7	3.52	1.36	1.38

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
gemessene Leistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
Hochrechnungsfaktor	[--]	1.86	1.65	1.12	2.09	1.14	1.55	0.97	1.44	0.96
Spitzenwert gemessen	[mA]	335.5	251.6	343.0	193.9	384.1	145.1	820.6	289.1	440.4
Spitzenwert normiert	[mA]	624.2	415.1	385.5	405	436.9	224.9	797.4	415.5	425
Flankensteilheit gemessen	[A/s]	2777	3036	2231	2445	2329	374	8362	3562	164
Flankensteilheit normiert	[A/s]	5165	5009	2507	5106	2649	580	8125	5119	158
Anstiegszeit 10/90	[ms]	0.116	0.132	0.256	0.12	0.28	4.02	0.196	0.112	3.01
$\Delta U_{\max}$ aus Strommessung	[V]	2.27	2.43	1.79	1.97	1.86	0.31	6.82	2.86	0.36
$\Delta U_{\max}$ normiert	[V]	4.23	4.01	2.02	4.11	2.11	0.47	6.63	4.11	0.35
$\Delta U_{\max}$ gemessen	[V]	6.18	1.94	2.02	1.74	1.8	1.16	4.82	2.38	0.672

Tabelle 7: Spannungsabfall über der "Standard-Netzimpedanz"

Spannungsabfall direkt gemessen resp. aus Lampenstrom berechnet

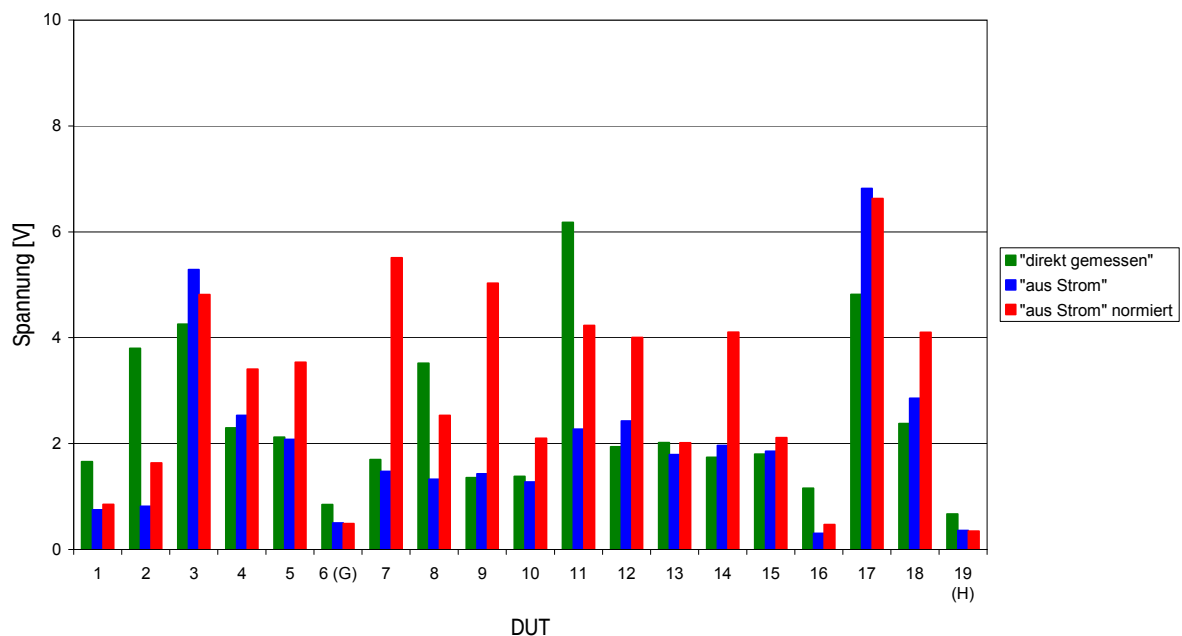


Abbildung 10: Spannungsabfall über der Standard-Impedanz

Die maximalen Spannungsabfälle von fast 7 Volt (DUT 17) scheinen durchaus beachtlich zu sein. Die Spannungseinbrüche sind jedoch kurzzeitig. Bei den Energiesparlampen mit den stärksten Spannungseinbrüchen dauern diese Spannungseinbrüche etwa 100 – 200 μ s. Der Stromscheitelwert und die maximale Stromänderung treten zudem erst etwa 3 ms nach dem Spannungsnulldurchgang auf. Zu diesem Zeitpunkt besitzt die Spannung bereits einen Momentanwert von über 250 Volt. Die relative, kurzzeitige Spannungsänderung beträgt damit maximal etwa 3% und ist kaum sichtbar (siehe Abbildung 11).

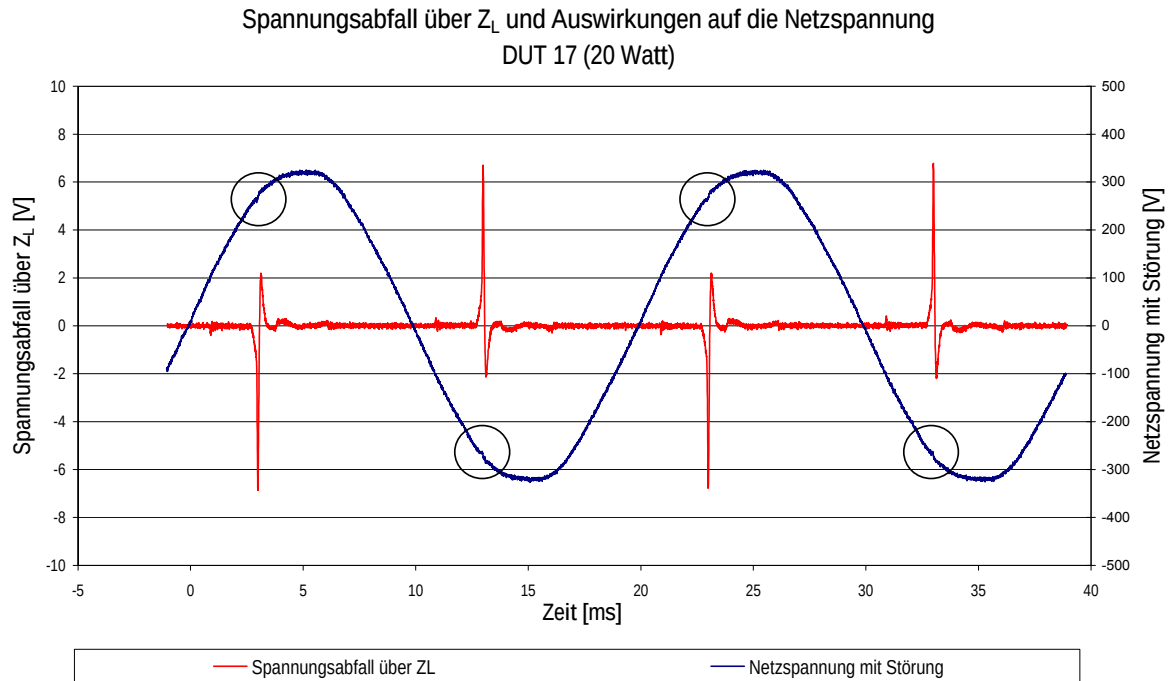


Abbildung 11: Störspannung verursacht durch DUT 17 mit Einfluss auf die Netzspannung (markierte Stellen)

Vergleicht man die über der Standard-Impedanz gemessenen Spannungsabfälle mit den mittels Lampenstrom berechneten Spannungsabfällen (Vergleich von "direkt gemessen" mit "aus Strom" in Abbildung 10), so fallen bei den DUT 1, DUT 2, DUT 8, DUT 11 und DUT 16 wesentliche Unterschiede auf. Der Grund liegt darin, dass bei den direkten Messungen Schwingungen festgestellt wurden, welche die Messergebnisse dominieren (siehe Abbildung 12 als Beispiele). Die genaue Ursache für die Schwingungen wurde nicht näher untersucht. Es wird ein Zusammenhang mit der "Lampen-Elektronik" vermutet.

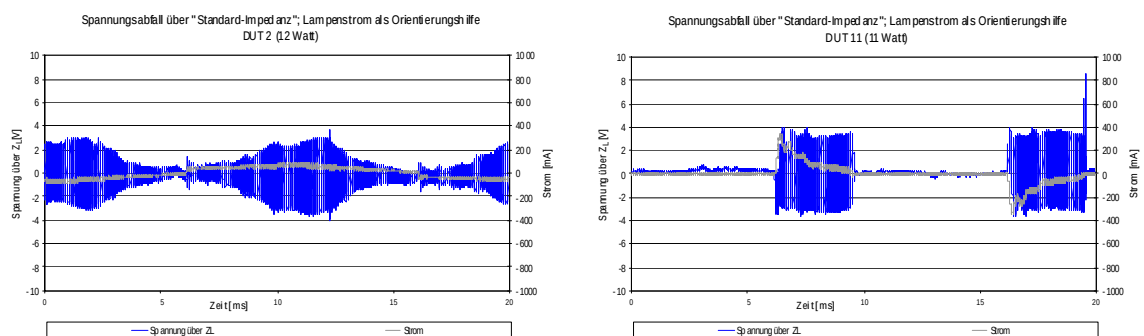


Abbildung 12: gemessene Spannung über der Standard-Impedanz bei DUT 2 resp. DUT 11

4.3 Leistungsparameter

4.3.1 Vorbemerkungen

Die im Folgenden verwendeten Leistungsparameter wurden rechnerisch aus den Strom- und Spannungsmessungen ermittelt (Tabelle 8). Die Messungen mit dem "Power Harmonics Tester" ergaben teilweise gut übereinstimmende Ergebnisse und teilweise erhebliche Unterschiede. Die Oszilloskop-Messungen erwiesen sich als anschaulich und plausibel. Wieso der "Power Harmonics Tester" zu teilweise nicht nachvollziehbaren Unterschieden führte, konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht näher untersucht werden.

4.3.2 Ergebnisse

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
Wirkleistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
50-Hz-Blindleistung	[Var]	2.8	1.9	10.3	6.8	5.4	0.9	2.7	6.3	3.0	5.4
50-Hz-Scheinleistung	[VA]	20.3	20.4	22.1	22.0	22.0	100.0	22.5	23.3	22.6	21.9
50-Hz-cos φ (cos φ_{50})	[---]	0.99	0.98	0.90	0.91	0.91	1.00	0.89	0.86	0.88	0.91
Oberwellen-Blindleistung	[Var]	4.9	3.9	23.6	22.9	23.3	3.5	21.3	20.5	20.8	19.5
Scheinleistung	[VA]	20.8	20.7	32.3	31.7	32.0	100.1	30.9	31.0	30.7	29.4
"power factor" (PF)	[---]	0.96	0.96	0.62	0.63	0.62	1.00	0.65	0.64	0.65	0.68

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
Wirkleistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
50-Hz-Blindleistung	[Var]	4.4	5.3	7.7	4.6	6.9	3.1	7.5	6.3	2.5
50-Hz-Scheinleistung	[VA]	21.6	21.8	21.8	22.2	21.5	20.6	21.3	22.0	70.0
50-Hz-cos φ (cos φ_{50})	[---]	0.92	0.92	0.92	0.90	0.93	0.97	0.94	0.91	1.00
Oberwellen-Blindleistung	[Var]	25.7	23.3	21.8	23.0	23.6	7.2	25.0	23.1	1.0
Scheinleistung	[VA]	33.6	31.9	30.8	31.9	31.9	21.8	32.8	31.9	70.0
"power factor" (PF)	[---]	0.60	0.63	0.65	0.63	0.63	0.92	0.61	0.63	1.00

Tabelle 8: Leistungsparameter

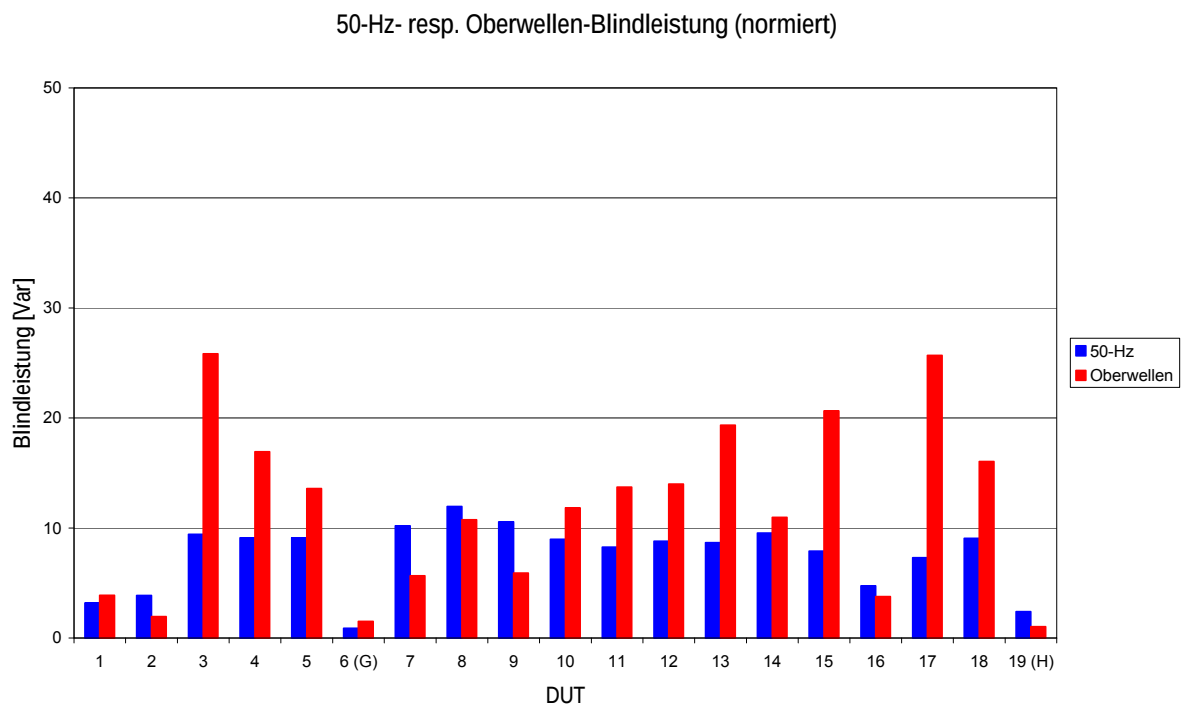


Abbildung 13: 50-Hz-Blindleistung resp. Oberwellen-Blindleistung

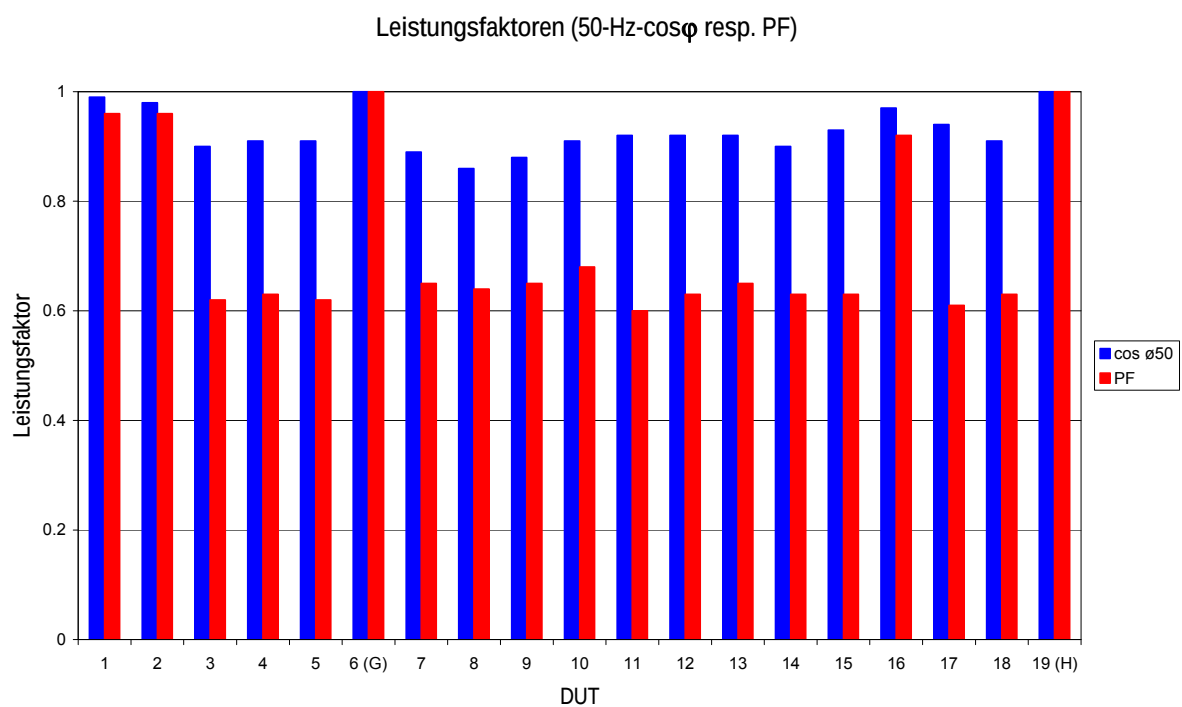


Abbildung 14: Leistungsfaktoren

Die in Abbildung 14 dargestellten Leistungsfaktoren werden wie folgt bestimmt (s.a. Abbildung 4):

$$\cos \varphi_{50} = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{"50-Hz-Scheinleistung"}}$$

$$PF = \frac{\text{Wirkleistung}}{\text{Scheinleistung}}$$

4.3.3 Beurteilung und Interpretation

Wie in Kap. 3.1.4 beschrieben, kommt insbesondere dem $\cos \varphi$ des 50-Hz-Stroms ($\cos \varphi_{50}$) eine gewisse Bedeutung zu. Der $\cos \varphi_{50}$ liegt im schlechtesten Fall bei ca. 0.86 (kapazitiv). Die damit zusammenhängende Energiependelung führt zu etwas erhöhten Verlusten in den Zuleitungen. Einen weit stärkeren Einfluss auf die Verluste in den Zuleitungen hat die Oberwellen-Blindleistung. Wie bereits in Kap. 4.1.3 dargelegt, sind die Verluste jedoch auch relativ zur Leistung kleiner als bei Glühlampen. Die "klassischen" Blindleistungsbetrachtungen für lineare Verbraucher sind mit Vorsicht zu genießen, weil der Oberwellenblindleistung eine andere Bedeutung zukommt als der 50-Hz-Blindleistung.

4.4 Oberwellen

4.4.1 Vorbemerkungen

Die Zerlegung der Stromkurve in Oberwellenströme (Tabelle 9 resp. Abbildung 15) entspricht eigentlich einer Transformation der Zeitsignale in den Frequenzbereich. Bei stark von der Sinusform abweichenden Stromkurven ist eine Frequenzbetrachtung jedoch oft weder informativ noch anschaulich.

Für eine "perfekte" Bestimmung der Oberwellenströme muss die Versorgungsspannung ohne Oberwellen sein und die Zuleitungsimpedanz muss Null sein. Ist dies nicht der Fall werden sich Oberwellenanteile, welche in der Versorgungsspannung vorhanden sind, auch im Oberwellenstrom niederschlagen. Die Messungen wurden im Labor mit der im Labor vorhandenen Spannungsqualität durchgeführt. Da bei den Strommessungen gleichzeitig immer auch die Spannung gemessen wurde, wurde auch der Oberwellenanteil der Spannung bestimmt und damit die gemessenen Oberwellenströme "korrigiert". Die Oberwellen-Analysen basieren damit auf einer – im Rahmen der Messunsicherheit – idealen Spannung.

Die im vorliegenden Bericht dargestellten Zeitsignale werden hingegen nicht korrigiert, weshalb insbesondere bei den Glühlampen die Kurvenverläufe leicht von der Sinusform abweichen. Der Einfluss der schwach oberwellenbehafteten Spannung auf die Zeit-Diagramme der ESL ist vernachlässigbar.

4.4.2 Ergebnisse

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
Wirkleistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
50-Hz-Strom	[mA]	77.7	44.0	105.5	71.0	56.2	443.0	26.1	53.2	28.0	57.8
Oberwellenströme	[mA]	16.1	8.0	111.2	72.8	58.4	1.7	24.3	46.2	25.3	50.8
THDI	[%]	20.8	18.2	105.3	102.5	104.0	0.4	93.0	86.9	90.7	87.9
150Hz-Oberwellenströme	[mA]	8.5	4.1	85.7	57.7	46.3	1.2	19.4	37.1	20.3	41.5
150Hz-Oberwellenströme relativ zum 50-Hz-Strom	[%]	10.9	9.2	81.2	81.3	82.5	0.3	74.3	69.7	72.4	71.9

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
Wirkleistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
50-Hz-Strom	[mA]	50.6	57.6	84.3	46.1	82.2	57.7	95.3	66.4	315.6
Oberwellenströme	[mA]	59.1	60.2	83.2	47.2	88.8	15.7	110.7	69.1	1.1
THDI	[%]	116.9	104.6	98.7	102.3	108.1	27.2	116.2	104.0	0.3
150Hz-Oberwellenströme	[mA]	45.0	47.7	67.1	37.3	69.9	10.3	80.1	54.8	0.8
150Hz-Oberwellenströme relativ zum 50-Hz-Strom	[%]	88.9	82.9	79.6	80.9	85.1	17.9	84.0	82.5	0.2

Tabelle 9: Oberwellenströme

Strom-Klirrfaktoren: THDI resp. 150-Hz-Oberwellen (in % des 50-Hz-Stromes)

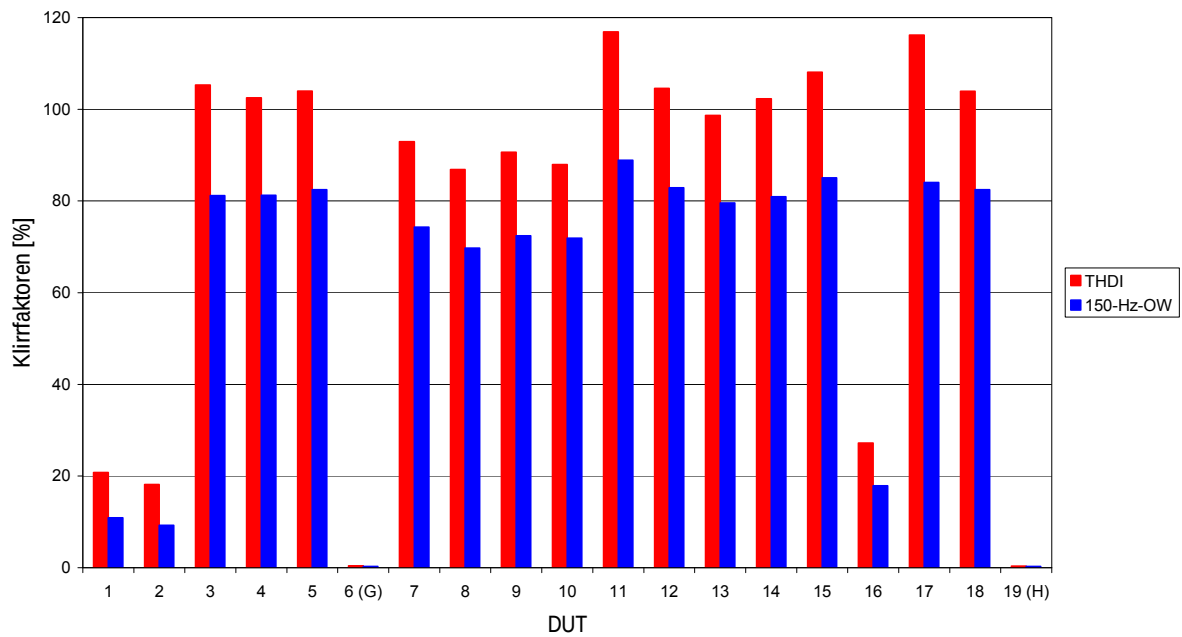


Abbildung 15: Oberwellenanteile der Lampenströme

Maximalwerte der Oberwellen aller Lampen bezogen auf 50-Hz-Strom (0 Hz-10 kHz)

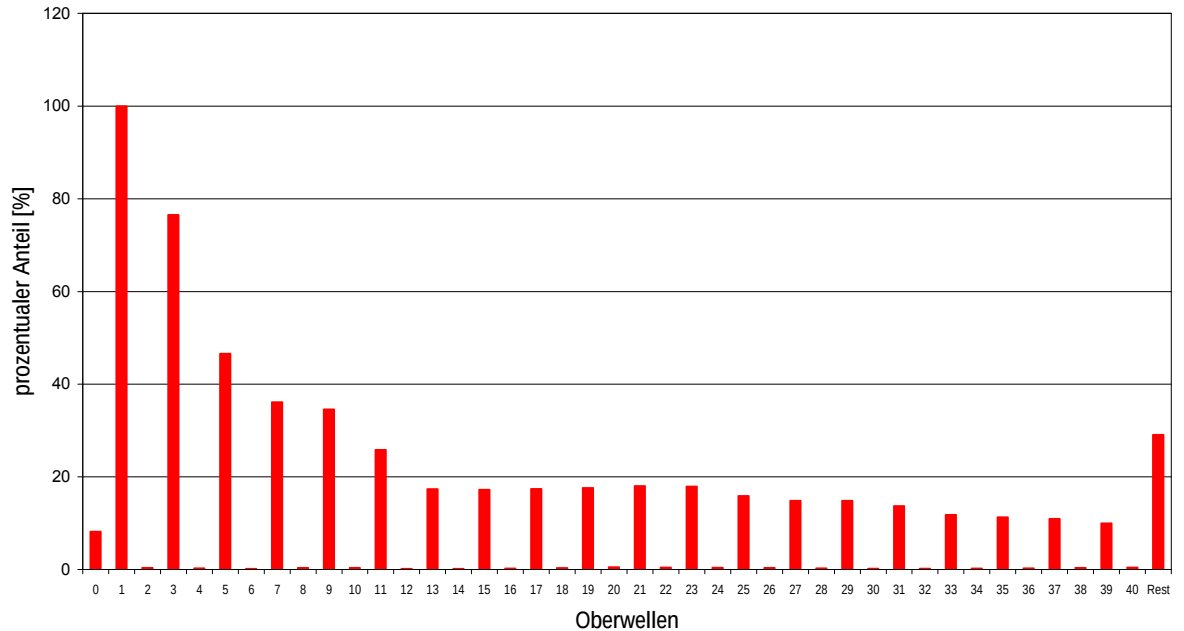


Abbildung 16: Maximalwerte der Oberwellenströme bezogen auf den 50-Hz-Strom

4.4.3 Beurteilung und Interpretation

Bezüglich der maximal zulässigen Oberwellenanteile sind normative Anforderungen einzuhalten.

Gemäss IEC 61000-3-2 sind für Beleuchtung (Klasse-C-Geräte) folgende Anforderungen resp. Grenzwerte vorgegeben:

Auszug aus IEC 61000-3-2:

Limits for Class C equipment

a) Active input power $>25\text{ W}$

...

b) Active input power $\leq 25\text{ W}$

Discharge lighting equipment having an active input power smaller than or equal to 25 W shall comply with one of the following two sets of requirements:

- *the harmonic currents shall not exceed the power-related limits of Table 3, column 2, or:*
- *the third harmonic current, expressed as a percentage of the fundamental current, shall not exceed 86 % and the fifth harmonic current shall not exceed 61 %. Also, the waveform of the input current shall be such that it reaches the 5 % current threshold before or at 60°, has its peak value before or at 65° and does not fall below the 5 % current threshold before 90°, referenced to any zero crossing of the fundamental supply voltage. The current threshold is 5 % of the highest absolute peak value that occurs in the measurement window, and the phase angle measurements are made on the cycle that includes this absolute peak value. See Figure 2.*

Table 3 – Limits for Class D equipment

Harmonic order n	Maximum permissible harmonic current per watt mA/W	Maximum permissible harmonic current A
3	3.4	2.30
5	1.9	1.14
7	1.0	0.77
9	0.5	0.4
11	0.35	0.33
$11 \leq n \leq 39$ (odd harmonics only)	$\frac{3.85}{n}$	See Table 1

Bei allen betrachteten ESL handelt es sich um Lampen mit einer Wirkleistung ≤ 25 Watt. Wie aus Abbildung 16 hervorgeht, werden die Anforderungen an die dritte und fünfte Oberwelle ($\leq 86\%$ resp. $\leq 61\%$) von allen untersuchten Lampen eingehalten.

Die Lampen mit PFC (DUT1, DUT2 und DUT16) haben wegen des Stromverlaufs die Anforderungen gemäss "Table 3, column 2" zu erfüllen. Die Anforderungen werden eingehalten.

4.5 Hochfrequente Netzurückwirkungen

4.5.1 Vorbemerkungen

Die leitungsgeführten Störspannungen wurden in Anlehnung an EN 55015 gemessen (Messung an einer Netznachbildung). Da es sich bei den vorliegenden Messungen (Abbildung 17) nicht um EMV-Kontrollmessungen, sondern um die Beurteilung von Netzurückwirkungen handelt, wurde mit Spitzenwertdetektor und bei einer 15-kHz-Messbandbreite gemessen. Damit ist sichergestellt, dass die Maximalwerte beurteilt werden können; da die Betriebsfrequenz von ESL (ca. 40 kHz) nicht stabil oder moduliert ist. Ein Vergleich der Messergebnisse mit den normativen Grenzwerten ist unzulässig und die Grenzwerte haben rein orientierenden Charakter. Es steht mit Sicherheit fest, dass normative Messungen, insbesondere unter 150 kHz, zu tieferen Werten führen; dies sowohl wegen der kleineren Messbandbreite als auch wegen der Quasipeak-Bewertung gemäss EN55015.

Neben den leitungsgeführten Störspannungen wurden auch die leitungsgeführten Störströme gemessen (Tabelle 10, Abbildung 18). Bei den Störströmen wurden einerseits der Gleichtakt-Störstrom und andererseits der Gegentakt-Störstrom gemessen.

Während der Gegentakt-Störstrom mehr die mögliche Beeinflussung anderer Geräte via gemeinsame Netzimpedanz beschreibt (Beeinflussung via Spannungsabfall), beschreibt der Gleichtakt-Störstrom mehr die möglicherweise abgestrahlte Energie, welche beispielsweise in der Nähe betriebene Radio- oder Funkempfänger stören könnte.

4.5.2 Ergebnisse

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
Wirkleistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
maximale Störspannung	[V]	1.22	1.72	1.03	0.77	0.82	0.06 ¹⁾	0.87	0.72	0.51	0.46
Maximaler Gleichtakt-Störstrom	[mA]	0.19	0.20	0.21	0.19	0.19	0.19 ¹⁾	0.19	0.19	0.19	0.19
maximaler Gegentakt-Störstrom	[mA]	13.09	18.97	5.40	4.84	5.71	0.25 ¹⁾	4.81	4.34	4.54	4.16

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
Wirkleistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
maximale Störspannung	[V]	0.67	0.74	0.48	0.51	0.37	0.79	1.10	0.96	0.03 ¹⁾
maximaler Gleichtakt-Störstrom	[mA]	0.19	0.19	0.20	0.19	0.19	0.19	0.19	0.20	0.19 ¹⁾
maximaler Gegentakt-Störstrom	[mA]	3.32	5.43	4.02	4.74	4.17	6.68	9.68	4.95	0.25 ¹⁾

¹⁾ Glühlampen erzeugen keine hochfrequenten Störungen. Die Werte entsprechen dem Rauschpegel am Messempfänger bei der gewählten Geräteeinstellung.

Tabelle 10: Maximalwerte der hochfrequenten Signalanteile

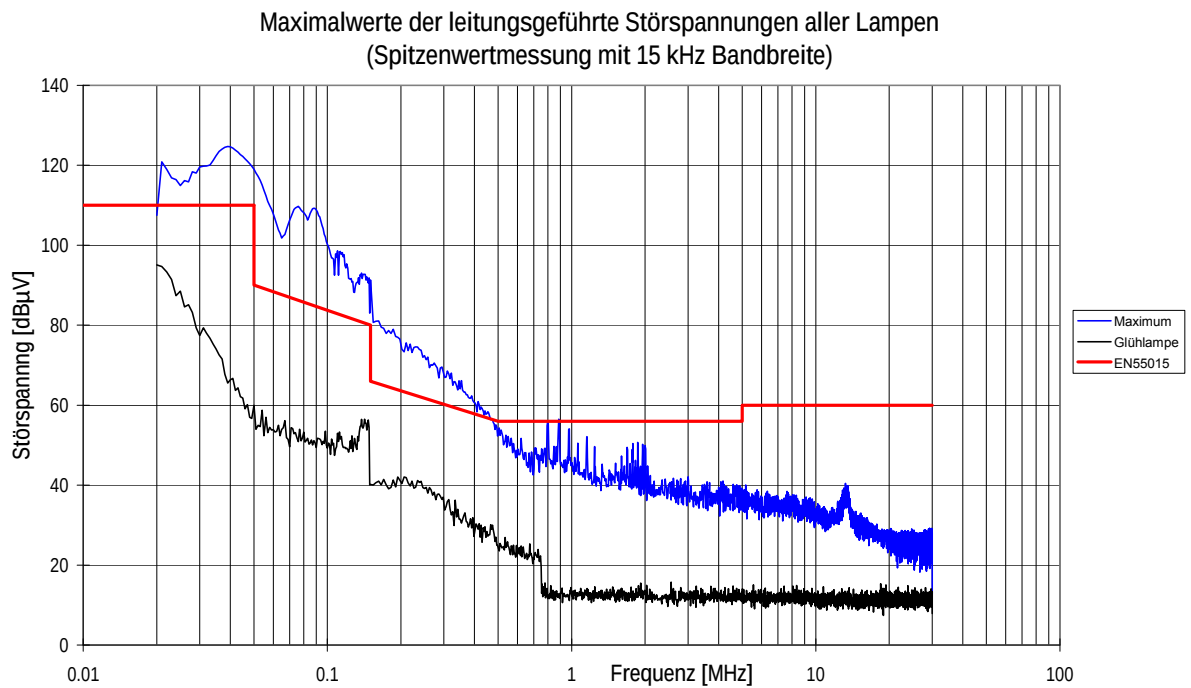


Abbildung 17: Maximalwerte der Störspannungen aller Lampen

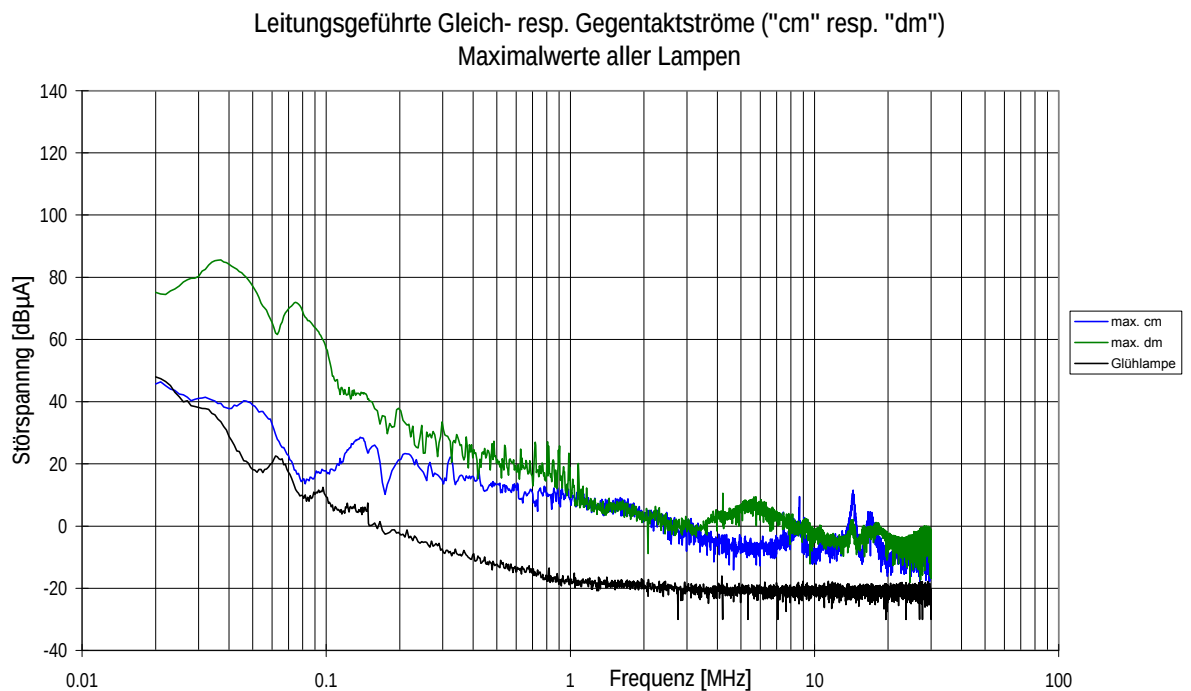


Abbildung 18: Maximalwerte der Störströme aller Lampen

4.5.3 Beurteilung und Interpretation

Die höchste Störspannung wird von DUT 2 mit etwa 1.7 V bei ca. 40 kHz erzeugt, "gefolgt" von DUT 1 mit etwa 1.2 V. Alle übrigen ESL erzeugen maximale Störspannungen von ca. 1 Volt oder weniger.

Der Gleichtaktstrom ("common mode") ist unterhalb von 100 kHz gering und ab etwa 1 MHz bei tiefem Niveau etwa gleich gross wie der Gegentaktstrom. Dies ist ein sehr typisches Verhalten für Geräte mit einem vergleichbaren Funktionsprinzip (z.B. geschaltete Netzgeräte wie sie heute in Computern oder als Ladegeräte verwendet werden).

Der Gegentaktstrom zeigt unterhalb von 500 kHz ein ähnliches Profil wie die Störspannung (Abbildungen 17 und 18).

Die höchsten Pegel der hochfrequenten, leitungsgeführten Störaussendung fallen in den Langwellenfunkbereich.

Die normativen Anforderungen hinsichtlich der Störaussendung sind oberhalb von 150 kHz im Wesentlichen gleich wie die Anforderungen für andere Geräte im Haushalt oder Bürobereich. Andere Geräte wie Netzteile und Ladegeräte erzeugen vergleichbare Störsignale. Zwischen 10 kHz und 150 kHz bestehen für Beleuchtungseinrichtungen Grenzwerte, während z.B. für Ladegeräte und Netzteile keine Grenzwerte bestehen oder noch nicht bestehen. Es gibt keinen Grund zur Annahme, dass Geräte für welche keine normativen Grenzwerte gelten, weniger strahlen sollten als Geräte mit normativen Anforderungen. Deshalb darf angenommen werden, dass Energiesparlampen nicht grundsätzlich stärkere Störsignale aussenden als andere im Haushalt- und Bürobereich sehr verbreitete Geräte.

Obwohl uns bei den gemessenen Pegeln keine Störungen von anderen Geräten bekannt sind, kann nicht in jedem Fall und bei jeder Lampe ausgeschlossen werden, dass der – heute allerdings sehr seltene – Langwellenempfang gestört werden könnte, wenn eine ESL in der Nähe des Empfängers betrieben wird.

Erste Grobuntersuchungen zur möglichen Störung von "Power Line Communication (PLC)"-Übertragungen zeigten keine nachteiligen Ergebnisse.

4.6 Energiesparlampen im Dreiphasensystem

4.6.1 Vorbemerkungen

Im Dreiphasen-Stromversorgungssystem der Schweiz werden einphasige Verbraucher meist verteilt über die drei Phasen angeschlossen. Die Ströme linearer 50-Hz-Verbraucher kompensieren sich dabei im Neutralleiter. Erzeugen die Verbraucher Oberwellenströme, so summieren sich die 150-Hz-Ströme und die ungradzahligen Vielfachen von 150 Hz (0 Hz, 450 Hz, 750 Hz, etc.). Dies kann zu einer erhöhten Neutralleiterbelastung führen.

In Normen und Vorschriften ist es sehr verbreitet die Problematik der Netzrückwirkungen mittels Oberwellengehalt zu beschreiben. Da die meisten ESL einen stark nicht-sinusförmigen Stromverlauf besitzen, ist eine direkte Betrachtung im Zeitbereich jedoch anschaulicher.

4.6.2 Ergebnisse

DUT-Nr.		1	2	3	4	5	6 (G)	7	8	9	10
deklarierte Leistung	[W]	20	12	20	15	12	100	5	10	5	11
Wirkleistung	[W]	17.7	9.9	22.0	14.9	11.8	101.9	5.4	10.5	5.7	12.1
Phasenleiterstrom	[mA]	79.9	44.8	154.4	102.5	81.9	443.2	36.0	70.9	38.0	77.4
Neutralleiterstrom ¹⁾	[mA]	22.3	12.0	258.8	174.3	139.9	10.5	58.6	111.9	61.1	125.5
Verhältnis zwischen obigen Neutralleiterstrom- und Phasenleiterstrom im Dreiphasensystem bei symmetrischer Last	[---]	0.28	0.27	1.68	1.70	1.72	0.02	1.63	1.58	1.61	1.62

DUT-Nr.		11	12	13	14	15	16	17	18	19 (H)
deklarierte Leistung	[W]	11	11	21	11	20	15	20	14	70
Wirkleistung	[W]	10.8	12.1	17.8	9.6	17.6	12.9	20.6	13.9	72.5
Phasenleiterstrom	[mA]	78.5	84.2	119.3	66.4	122.0	61.1	146.8	96.4	315.6
Neutralleiterstrom ¹⁾	[mA]	135.7	143.9	202.5	112.6	210.8	28.2	241.5	165.1	6.8
Verhältnis zwischen obigen Neutralleiterstrom- und Phasenleiterstrom im Dreiphasensystem bei symmetrischer Last	[---]	1.73	1.72	1.70	1.70	1.73	0.47	1.64	1.71	0.02

¹⁾ Neutralleiterstrom, wenn an jeder Phase eine identische ESL betrieben wird.

Tabelle 11: Ströme im Phasen- resp. Neutralleiter (Effektivwerte)

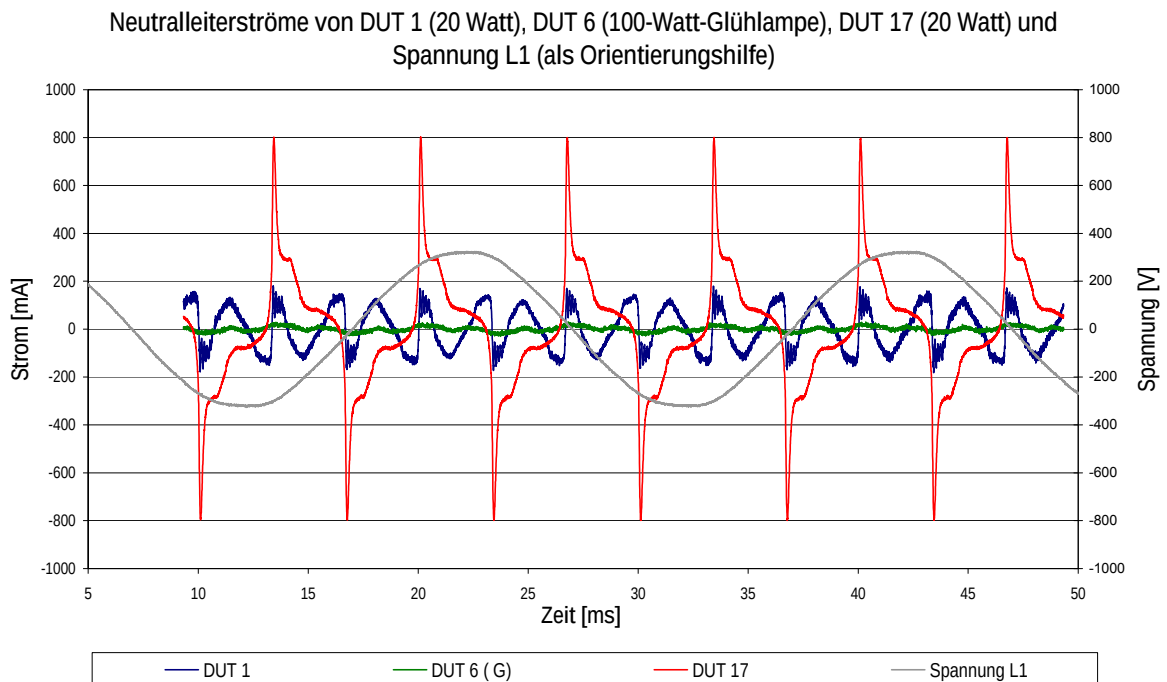


Abbildung 19: Neutralleiterströme im Dreiphasensystem bei Belastung jeder Phase mit einer ESL desselben Typ

4.6.3 Beurteilung und Interpretation

Während sich die Lampenströme im Neutralleiter bei einer symmetrischen Belastung durch Glühlampen (DUT 6) fast vollständig und bei ESL mit PFC (z.B. DUT 1) zumindest sichtbar reduzieren, findet diese Reduktion bei den übrigen ESL kaum statt (z.B. DUT 17).

Bei einer symmetrischen Verteilung eines ESL-Typs ohne PFC wird der Effektivwert des Gesamtstroms im Neutralleiter sogar etwas grösser als der Strom im Phasenleiter (Tabelle 11, letzte Zeile). Auch aus Sicht der ESL-Anwendung sollte der Neutralleiterquerschnitt gegenüber dem Phasenleiterquerschnitt nicht reduziert werden!

Die gesamten Zuleitungsverluste werden im Dreiphasensystem trotzdem etwas geringer als bei drei gleichphasig angeschlossenen Lampen, weil der Strom-Effektivwert im Neutralleiter nicht den dreifachen Wert des Phasenleiters erreicht, wie das bei einer rein einphasigen Belastung der Fall wäre.

Der Einfluss auf die Spannungsqualität ändert sich im Dreiphasensystem insofern, als sich der Spannungsabfall im Neutralleiter auf alle einphasigen Verbraucher auswirkt. Die gemeinsame Neutralleiterimpedanz führt zu einem Übersprechen zwischen den einzelnen Phasen. In Abbildung 20 ist dies klar ersichtlich.

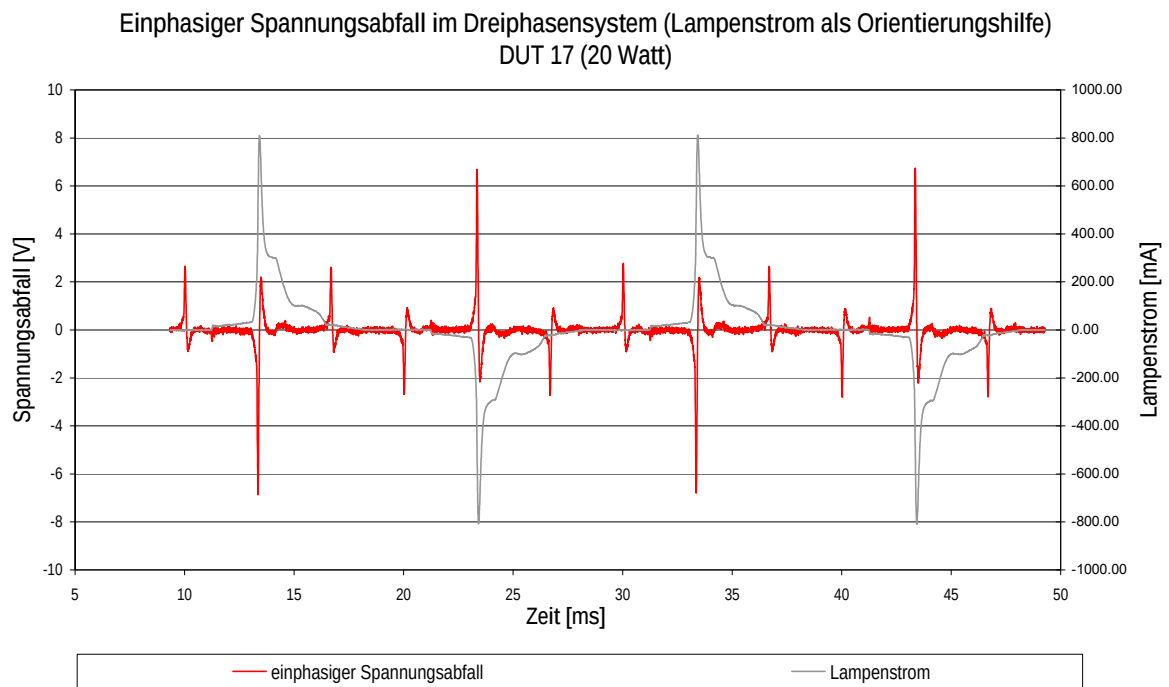


Abbildung 20: Einphasiger Spannungsabfall im Dreiphasen-System bei symmetrischer ESL-Verteilung.

4.7 Energiesparlampen im Verteilnetz

4.7.1 Vorbemerkungen

Im Laufe der kommenden Jahren dürften eine grosse Zahl von Glühlampen durch Energiesparlampen ersetzt werden. Wie aus den vorangehenden Abschnitten hervorgeht, erzeugen ESL andere Arten der Netzurückwirkung als Glühlampen.

Während die Zuleitungsverluste mit dem Austausch von Glühlampen mit ESL sinken, kommen die direkte Beeinflussung der Spannungsqualität durch schnelle Stromänderungen neu hinzu. Die folgenden dargestellten Abklärungen und Ergebnisse konzentrieren sich daher auch auf diesen Sachverhalt.

Zur Untersuchung der Einflüsse können einerseits die allgemein gültigen Ergebnisse der vorangehenden Kapitel auf grössere Netze extrapoliert werden. Dazu wurden auch Simulationsrechnungen durchgeführt.

Die Simulationen wurden auf das Niederspannungsversorgungsnetz begrenzt. Die Einflüsse im Mittelspannungs- und Hochspannungsnetz sind insofern kleiner, als die Störströme der ESL die Transformatoren zu passieren haben. Zum einen werden die Ströme bei der Transformation reduziert, zum anderen werden die Oberwellen in den Transformatoren gedämpft.

Für die näheren Untersuchungen wurden Energiesparlampen ohne PFC verwendet. Der Stromverlauf dieser Lampen lässt sich durch den Ladevorgang eines Kondensators mittels Diode vereinfacht darstellen.

Die Zuleitungen wurden mittels Impedanzen charakterisiert. Die Untersuchungen wurden weiter im einphasigen Netz durchgeführt, weil damit das Störpotential von ESL ausreichend beschrieben werden kann.

Neben den Computersimulationen wurde eine Versuchsaufbau mit 10 parallel geschalteten Energiesparlampen vom selben Typ erstellt (DUT 3) und es wurde der Gesamtstrom und der Spannungsabfall über der Standard-Impedanz gemessen.

4.7.2 Ergebnisse und Interpretation

Erste Simulationen mit einem Lampentyp haben zu sehr hohen Störspannungen geführt. Wenn exakt derselbe Lampentyp verwendet wird, dann werden in der Simulation auch exakt dieselben Lampenströme verwendet, welche alle im Wesentlichen phasenstarr sind (alle Lampen schalten exakt im selben Moment und mit derselben Stromkurve). Unterschiede an Verknüpfungspunkten – wo auch andere Verbraucher angeschlossen sein könnten – entstehen einzig durch unterschiedliche Leitungslängen. Da die kleinsten relevanten Wellenlängen sehr gross sind gegenüber den Leitungslängen in einem Gebäude oder selbst in einem Quartier – eine Anstiegszeit von $100\mu\text{s}$ ergibt Frequenzen um die 10 kHz und damit Wellenlängen um 30km – ist der Einfluss realistischer Unterschiede in den Leitungslängen nicht sehr gross. Dies führt dazu, dass in der Simulation die Lampenströme linear superponiert werden. Die Abbildungen 21 und 22 zeigen die recht dramatischen Einflüsse. Bereits 10 an derselben Phase angeschlossene ESL vom Typ DUT 3 würden kurzzeitige Spannungseinbrüche von etwa 50 V erzeugen (Abbildung 19).

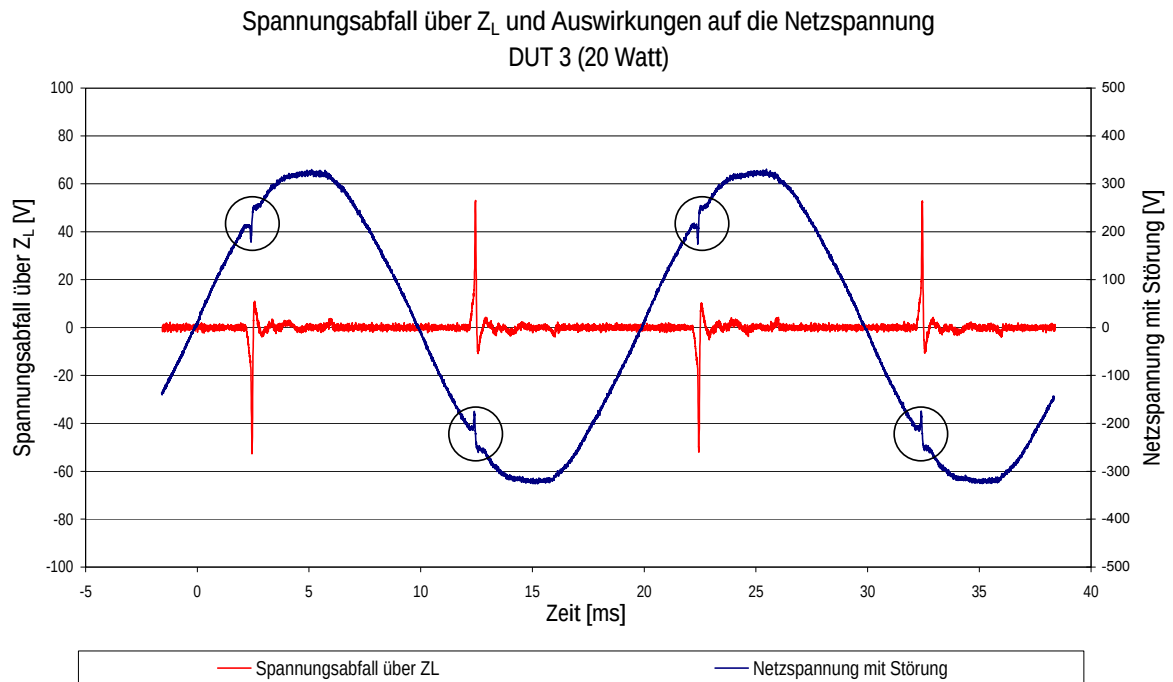


Abbildung 21: Einphasiger Spannungsabfall, wenn 10 identische DUT 3 in einem Netz mit Standard-Impedanz parallel betrieben werden (DUT 3 wird verwendet, weil diesbezüglich auch Messungen durchgeführt wurden).

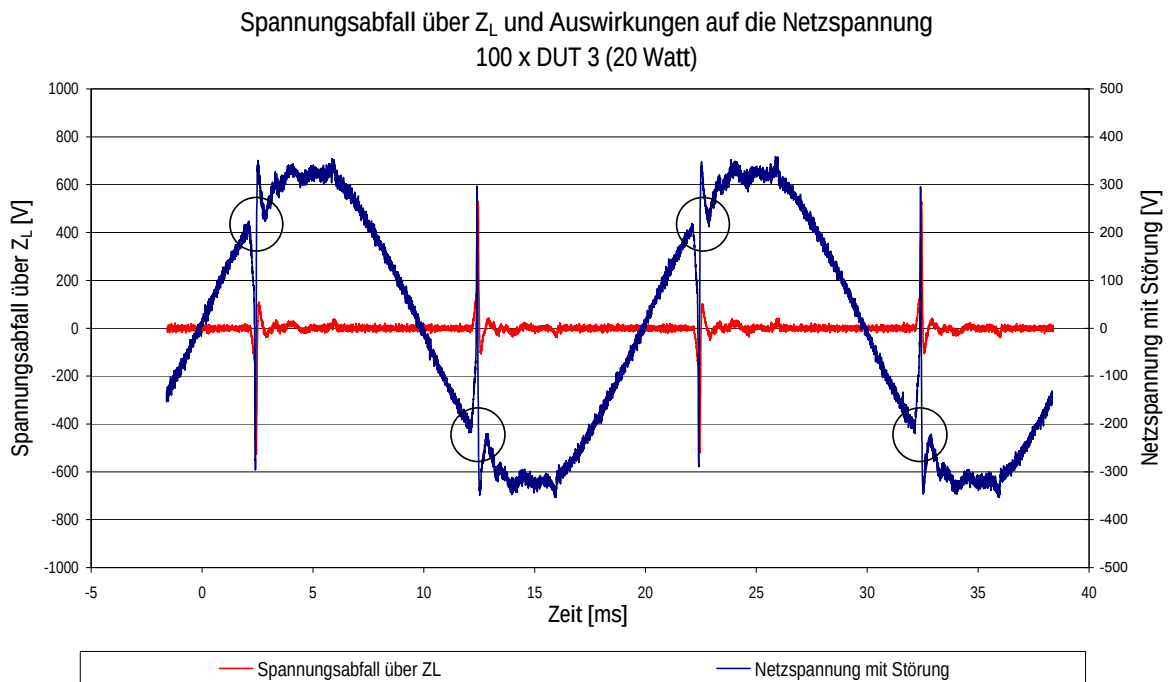


Abbildung 22: Einphasiger Spannungsabfall, wenn 100 identische DUT 3 in einem Netz mit Standard-Impedanz parallel betrieben werden.

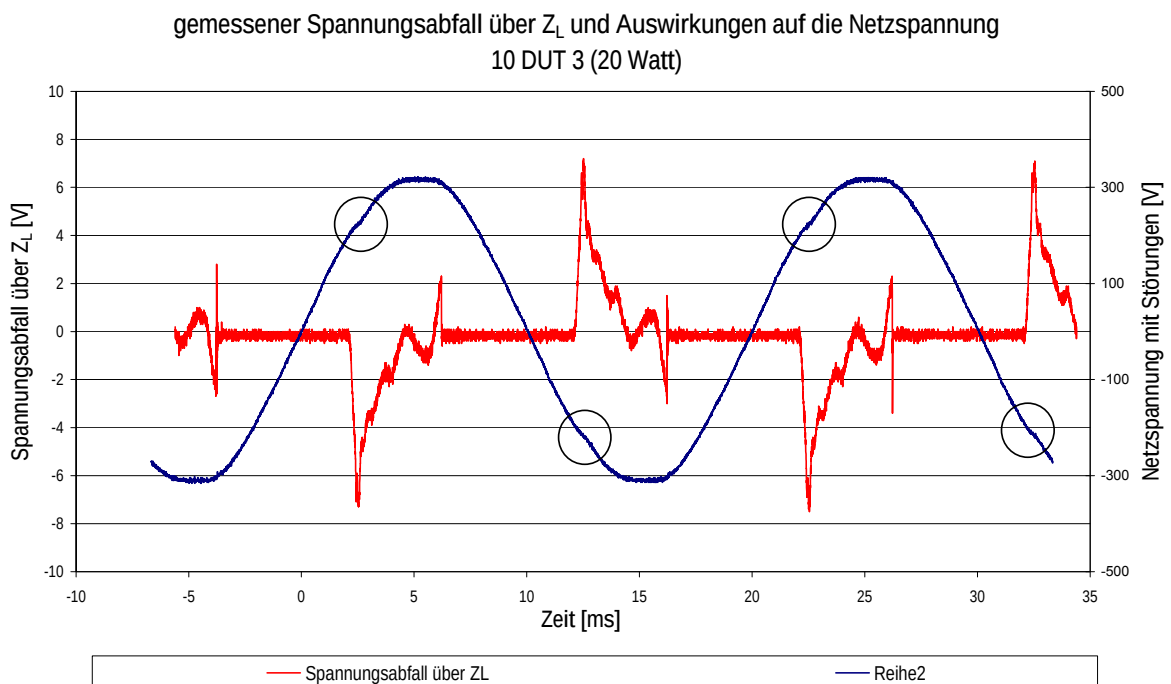


Abbildung 23: Gemessener Spannungsabfall, wenn 10 reale DUT 3 in einem Netz mit Standard-Impedanz parallel betrieben werden. Die Ergebnisse können direkt mit Abb. 21 verglichen werden. Man beachte dabei die unterschiedliche vertikale Skalierung für den Spannungsabfall.

Die Berechnungen gemäss Abbildungen 21 und 22 widersprechen den Erfahrungen aus der Praxis. Um die Spannungsqualität zu überprüfen, wenn eine grössere Anzahl ESL an derselben Phase betrieben werden, wurden 10 DUT 3 parallel geschaltet. Sieben ESL wurden an einem zentralen Versorgungspunkt über Lampenkabel mit einer Länge von etwa 150 cm angeschlossen. Die restlichen drei Lampen wurden über eine kurze Distanz von etwa 20 cm mit dem Versorgungspunkt verbunden. Der Versorgungspunkt selbst wurde über die Standard-Impedanz mit dem Stromnetz verbunden.

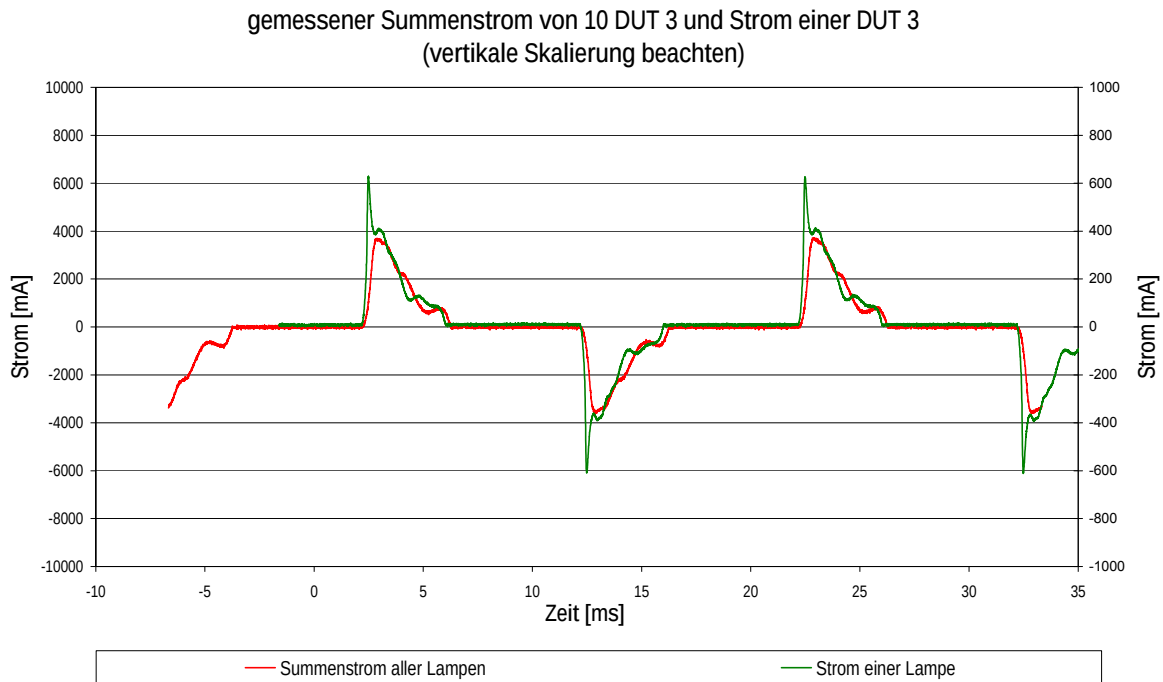


Abbildung 24: Gemessener Summenstrom von 10 DUT 3 und Lampenstrome von einer einzelnen Lampe (man beachte die unterschiedliche vertikale Skalierung links und rechts).

Die rechnerischen Simulationen zeigen erst dann Resultate, welche mit den Messungen vergleichbar sind, wenn für die Parameter der einzelnen Lampen eine Streuung in den Werten für die Komponenten eingeführt wird. Diese Komponentenstreuung führt dazu, dass der "Schaltzeitpunkt" und die Flankensteilheit variieren. Damit werden die einzelnen Lampenströme "deckungsgleich" superponiert und es sinkt sowohl der Scheitelwert und – wegen den zeitlichen Variationen der Flanken – auch die maximale Stromänderung (Abbildung 24). Die maximale Stromänderung ist jene Grösse, welche als Spannungsabfall über der Zuleitungsinduktivität am stärksten zum Gesamtergebnis beiträgt.

Die in Abbildung 23 dargestellte Spannungsänderung von ca. 7 Volt bei einem Niveau der Versorgungsspannung von über 200 Volt ist eine "harmlose Angelegenheit". Es ist zusätzlich zu beachten, dass die Standard-Impedanz einen relativ ungünstigen Fall darstellt und dass die Mehrheit der Stromanschlüsse kleinere Impedanzen aufweist, was zu kleineren Spannungsabfällen führt. Weiter bewegen sich die relevanten Netzzurückwirkungen der ESL in einem Frequenzbereich, in welchem die Standard-Impedanz eine zu strenge Anforderung sein kann, weil sich die Störungen eher als leitungsgeführte Wellen ausbreiten.

Die Störungen werden in vielen Fällen auch durch andere parallel im Netz arbeitende Verbraucher, insbesondere wegen paralleler Kapazitäten und wegen der unterschiedlichen Stromkurve, weiter reduziert. Dieses Verhalten wird auch in ELCF (2009) dargestellt.

Nichtsdestotrotz sind Situationen denkbar, bei denen sich die Störungen von mehreren ESL superponieren und dadurch kurzzeitige Spannungseinbrüche bei jeder Halbwelle entstehen. Wegen der kurzen Dauer der Spannungseinbrüche können viele Geräte mit derartigen Störungen problemlos umgehen. Störfestigkeit ist jedoch immer auch eine Frage von Statistik und Wahrscheinlichkeit und es kann nie ganz ausgeschlossen werden, dass ein Gerät in speziellen Situationen und Betriebszuständen spezielle Empfindlichkeiten aufweist.

Das Störpotential kann ganz erheblich reduziert werden, wenn ESL mit einer "moderaten" Flankensteilheit eingesetzt werden. Wie aus den Messergebnissen im Anhang zu erkennen ist, bestehen diesbezüglich erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Fabrikaten.

4.8 Graue Energie von Energiesparlampen

4.8.1 Bilanzierungsansätze

Zur Bestimmung der grauen Energie von Glühlampen (G) und Energiesparlampen (ESL) wurde auf Literaturdaten zurückgegriffen. In Kapitel 3.3 ist die Literatursauswahl und die in den Arbeiten verwendeten Bilanzierungsmethodik dargestellt worden. Insgesamt sind 14 Publikationen mit Daten identifiziert worden (Tabelle 3). Eine Publikation wurde für die Auswertung ausgeschlossen (siehe Kapitel 3.3).

Die Mehrheit der Studien hat die Herstellungsenergie inklusive Vorketten bilanziert (graue Energie der Energieproduktion – siehe Fussnote in Tabelle 3; bei den nicht gekennzeichneten Studien ist unklar ob End- oder Primärenergieaufwendungen berücksichtigt wurden; Parsons 06 basiert auf Endenergie).

Studie	Typ	Grunddaten				Graue Energie (in kWh)						
		Watt	Brenn-dauer in h	Brenn-dauer normiert	Lumen	Mate-rial	Herstel-lung	Produk-tion	Entsor-gung	Prod. Ents.	Vertei-lung	Grau^/ Mlmh***
EUP 08**	G	54	1000	1000	594	0.1	0.1	0.3	0.3	0.6	14.4	0.5
	ESL	13	6000	8000	600	2.8	0.6	3.3	0.0	3.3	14.7	0.7
Gydesen 91**	G	60	1000	1000	730	0.3	0.2	0.4	*	*	*	0.6
	ESL	15	10000	8000	900	1.7	1.4	3.1	*	*	*	0.4
Ramroth 08*	G	100	1000	1000	1200	?	0.4	0.4	*	*	1.2	0.3
	ESL	23	10000	8000	1200	?	?	15.0	*	*	?	1.6
Lange 98**	G	75	1000	1000	960	?	?	0.9	*	*	*	0.9
	ESL	15	15000	8000	900	?	?	3.4	*	*	*	0.5
Müller 08**	G	60	1000	1000	710	?	?	0.8	*	*	*	1.2
	ESL	11	15000	8000	660	?	?	4.0	*	*	*	0.8
Frischknecht 96**	G	60	1000	1000	710	?	?	*	?	0.8	?	1.2
	ESL	11	15000	8000	660	?	?	*	?	3.0	?	0.6
Tesco in: Matthews 09	G	60	1000	1000	710	?	?	0.9	*	*	*	1.3
	ESL	15	4000	8000	900	?	?	2.3	*	*	*	0.3
Sima-Pro in: Matthews 09	G	60	1000	1000	600	?	?	0.2	*	*	*	0.3
	ESL	11	8000	8000	600	?	?	2.2	*	*	*	0.5
RUMBA 07	G	60	1000	1000	710	?	?	0.8	*	*	*	1.2
	ESL	11	8000	8000	600	?	?	3.3	*	*	*	0.7
Königstein 09	G	60	1000	1000	600	?	?	*	?	0.8	?	1.3
	ESL	12	8000	8000	600	?	?	*	?	7.4	?	1.5
Parsons 06	G	100	2000	1000	1400	?	?	0.6	*	*	1.6	0.5
	ESL	18	8000	8000	1100	?	?	*	0.0	3.3	8.0	0.4
Mani 94**	G	75	1000	1000	960	0.5	0.1	0.6	-0.05	0.5	0.01	0.6
	ESL	15	8000	8000	900	7.9	1.6	9.5	-0.4	9.0	0.01	1.3
Frischknecht 06**	G	100	1000	1000	1000	?	?	0.4	0.03	0.4	0.1	0.4
	ESL	20	6000	8000	1000	?	?	3.6	0.1	3.7	0.2	0.4
Jolliet 01**	G	60	1000	1000	600	0.5	0.1	0.6	*	*	0.1	1.1
	ESL	11	6000	8000	600	4.1	2.9	7.1	*	*	0.3	1.5
Schnitt ohne Ramroth	G	68	1077	1000	791			0.6		0.6		0.8
	ESL	14	9000	8000	771			4.2		4.9		0.7

* Basis: CO₂e; Umrechnung über Konversionsfaktoren sehr unsicher

** Energiebasis graue Energie: inkl. Vorketten

*** Mlmh: 1 Mio. Lumenstunden

^ nur Material und Herstellung (Ausnahmen gelb markiert)

nicht berücksichtigt (siehe *)

Berücksichtigte Werte für graue Energie

Abweichend (Produktion UND Entsorgung)

Tabelle 3: Übersicht der Studien mit verfügbaren Daten (ESL=Energiesparlampen, G=Glühlampen)

Die Energieaufwendungen für Distribution und Entsorgung wurden für unsere Zwecke nicht berücksichtigt. Zum einen sind dazu nur wenige Daten verfügbar. Zum anderen sind für den Vergleich zwischen G und ESL diese zwei Stadien im Lebenszyklus weniger bedeutsam. Die Entsorgung schlägt gemäss den verfügbaren Literaturdaten energetisch kaum zu Buche bzw. wird als Gewinn bewertet (gemäss mündlicher Aussage eines Industriexperten rechnen die Hersteller allerdings grob mit 1kWh für die Entsorgung). Sodann schwanken die Daten zur grauen Energie für die Distribution (Transport) zwischen den wenigen Publikationen stark. Die Angabe von Parsons 06 zu ESL ist verglichen mit der Angabe zu Glühlampen unplausibel. Die grosse Differenz zwischen EUP 08 auf der einen Seite und Mani 94, Frischknecht 06 sowie Jolliet 01 auf der anderen liegt in der Methodik begründet: während bei EUP

die Transportleistungen auf Volumen basieren, basieren sie bei den anderen Autoren auf Gewicht.

Für die Ergebnisdarstellung haben wir als funktionale Einheiten sowohl die Einzellampe als auch 1 Mio. Lumenstunden verwendet (siehe nächstes Kapitel). Für eine Gesamtenergiebetrachtung spielt letzteres die entscheidende Rolle, weil die Lebensdauer der Lampe mitberücksichtigt ist.

Aufgrund der Ausführungen zu Netzverlusten in den vorangehenden Kapiteln kann dieser Aspekt hier vernachlässigt werden: Trotz der z.T. sehr hohen Oberwellen-Blindströme von ESL (von ESL ohne power factor correction - PFC) fallen diese verlustbehafteten Ströme durch den insgesamt deutlich niedrigeren Strombedarf von ESL kaum ins Gewicht (sie liegen im tiefen einstelligen Prozentbereich; VITO 08a rechnet konservativ mit 5%, Parsons 06 und Hänssler et al. 08 mit 1%) und werden in einer Gesamtbetrachtung durch die Reduktion der Zuleitungsverluste mehr als kompensiert.

4.8.2 Ergebnisse

Abbildung 25 zeigt einen Vergleich der publizierten grauen Energien (Material plus Herstellung) für G und ESL.

Eine ESL benötigt im Durchschnitt dieser Studien 7 mal soviel Energie zur Herstellung wie eine G (4.2kWh verglichen mit 0.6kWh). Die Abweichungen zwischen den Studien sind allerdings beträchtlich. Dort, wo detaillierte Zahlen verfügbar sind, zeigt sich dass es die Bilanzierung des Vorschaltgerätes ist, welche stark abweichend bewertet wird. Bei Mani 94 und Jolliet 01 beruhen die Berechnungen auf Durchschnittszahlen zu in der Elektronik verwendeten Materialien. Weil die Vorschaltgeräte im Vergleich zu Computern und anderen elektronischen Waren einfach sind, dürften die Durchschnittszahlen die verwendeten energetischen Aufwendungen überschätzen. In zwei Publikationen sind aus diesem Grunde die entsprechenden Kennzahlen angepasst worden. Setzt man den verwendeten Reduktionsfaktor 3 für elektronische Materialien auf die Resultate von Mani und Jolliet an, so würde der Energieaufwand auf ca. 5 bzw. 4.5kWh fallen. Der Wert in der Publikation Königstein ist nicht interpretierbar, da nur eine Pauschalangabe ohne Erläuterung vorliegt.

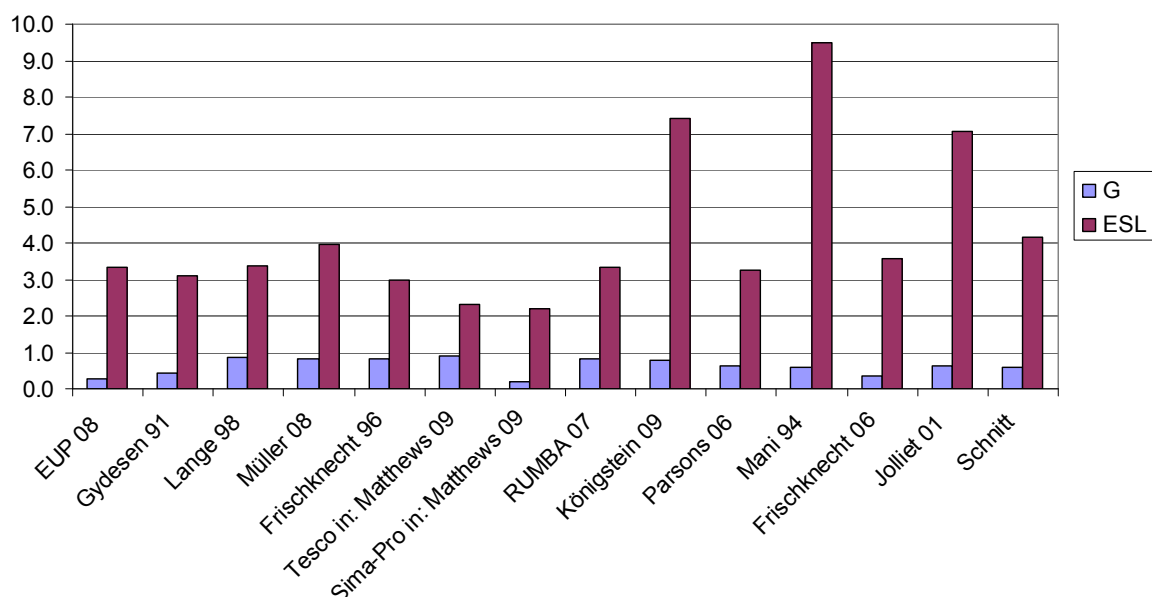


Abbildung 25: Graue Energie (Material plus Herstellung) von G und ESL in kWh

Vor diesem Hintergrund kann als plausible „worst-case“ Abschätzung der grauen Energie (Material und Herstellung) bei ESL von 5-6kWh, bei G von 0.8-1kWh ausgegangen werden.

Diese Energieaufwendungen sind jedoch im Verhältnis zur Lebensdauer und zur Lichtleistung zu beurteilen. Wir haben deshalb den Vergleich auf 1 Mio. Lumenstunden bezogen wobei wir die Lebensdauern der Lampen normiert haben (ESL = 8000 Stunden, G = 1000 Stunden). Eine G erzeugt bei einer Lebensdauer von 1000 Stunden und einer Lichtleistung von 1000 Lumen 1 Mio. Lumenstunden (Mlmh). Die Ergebnisse sind in Abbildung 26 zusammengestellt. Die Daten der Studien sind z.T. sehr unterschiedlich. Ein zentraler Faktor hier sind die teilweise unterschiedlichen Lichtleistungen bei identischen Leistungen der Lampen. Das kann fabrikatsbedingt sein, vom ausgemessenen Lampentyp abhängen (klare Lampen versus matte Lampen) und/oder auch methodisch bedingt sein, indem wie bei EUP 08 nicht die Lichtleistung der Neulampe sondern die durchschnittliche Lichtleistung über die Lebensdauer der Lampe, also mit Berücksichtigung der gebrauchsbedingten Glastrübung, berücksichtigt worden ist.

Über alle Studien gemittelt schneiden G und ESL hinsichtlich grauer Energie, bezogen auf Lumenstunden und Lebensdauer der Lampen gleich ab: pro 1 Mio. Lumenstunden beträgt die graue Energie (Material und Herstellung) in der Grössenordnung von 0.8kWh.

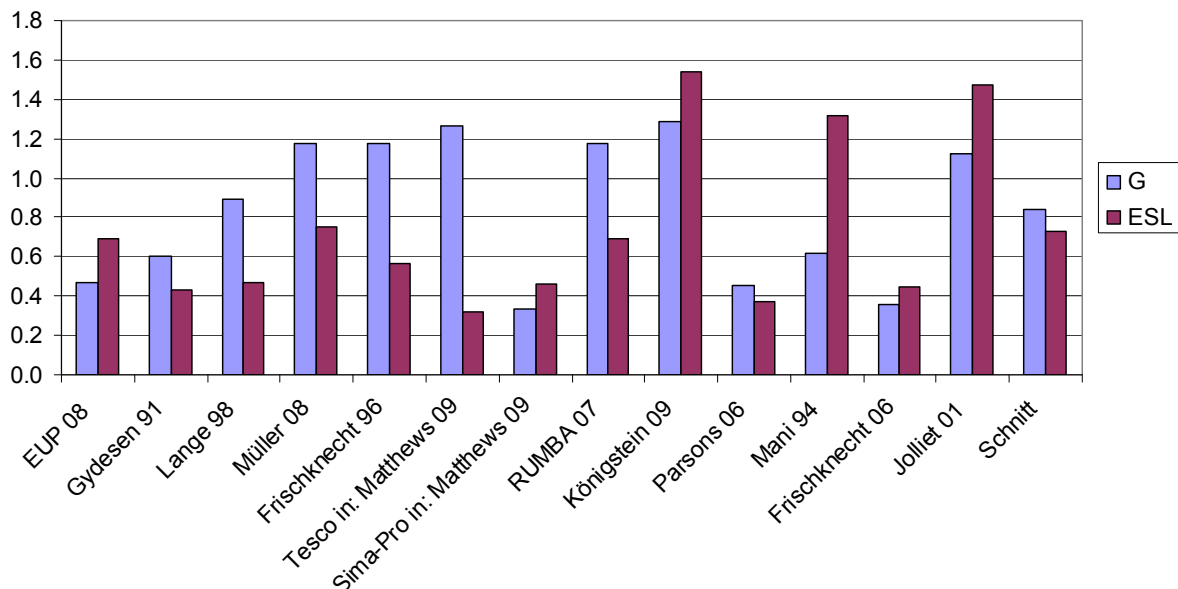


Abbildung 26: Graue Energie (Material plus Herstellung) von G und ESL in kWh für 1 Mio. Lumenstunden

4.8.3 Vergleich graue Energie / Betriebsenergie

Als nächstes soll das Verhältnis zwischen grauer Energie und Betriebsenergie betrachtet werden. Für die Berechnung der Betriebsenergie haben wir die konsumierte Endenergie in Primärenergie, also Endenergie inklusive Vorkette (Basis: eingesetzte nicht-erneuerbare Energieträger) umgerechnet (Tabelle 12). Der entsprechende Konversionsfaktor beträgt im 'Verbrauchermix' der Schweiz 2.53 (Ecoinvent 2.01). Das ist deutlich mehr als der entsprechende Faktor für den Produktionsmix (1.75) beträgt. Der Grund hierfür sind die Stromhandelsverhältnisse der Schweiz mit einem Export von Strom aus Wasserkraft, und einem Import von Strom aus Atom- und fossilen Kraftwerken.

Abbildung 27 stellt für Glühlampen die Betriebsenergie der grauen Energie gegenüber, Abbildung 28 zeigt dasselbe für ESL. Die Daten beziehen sich in beiden Fällen auf 1 Mio. Lumenstunden. Der Anteil der grauen Energie am Gesamtenergieverbrauch ist sowohl für G als auch für ESL verschwindend klein. Für G beträgt er ca. 0.5%, für ESL ca. 1.5%. Die Größenordnungen blieben auch erhalten, wenn der Vergleich auf dem Endenergiekonsum basieren würde: der Beitrag der grauen Energie bliebe im tiefen einstelligen Prozentbereich.

Studie	Typ	Grunddaten			Verbrauch		Total inkl. grau	
		Watt	Brenn- dauer normiert	Lumen	kWh/ Lampe	kWh/ Mlmh***	kWh/ Lampe	kWh/ Mlmh***
EUP 08**	G	54	1000	594	137	230.0	136.9	230.5
	ESL	13	8000	600	263	54.8	266.5	55.5
Gydesen 91**	G	60	1000	730	152	207.9	152.2	208.5
	ESL	15	8000	900	304	42.2	306.7	42.6
Ramroth 08*	G	100	1000	1200	253	210.8	253.4	211.2
	ESL	23	8000	1200	466	48.5	480.5	50.1
Lange 98**	G	75	1000	960	190	197.7	190.6	198.6
	ESL	15	8000	900	304	42.2	307.0	42.6
Müller 08**	G	60	1000	710	152	213.8	152.6	215.0
	ESL	11	8000	660	223	42.2	226.6	42.9
Frischknecht 96**	G	60	1000	710	152	213.8	152.6	215.0
	ESL	11	8000	660	223	42.2	225.6	42.7
Tesco in: Matthews 09	G	60	1000	710	152	213.8	152.7	215.1
	ESL	15	8000	900	304	42.2	305.9	42.5
Sima-Pro in: Matthews 09	G	60	1000	600	152	253.0	152.0	253.3
	ESL	11	8000	600	223	46.4	224.8	46.8
RUMBA 07	G	60	1000	710	152	213.8	152.6	215.0
	ESL	11	8000	600	223	46.4	226.0	47.1
Königstein 09	G	60	1000	600	152	253.0	152.6	254.3
	ESL	12	8000	600	243	50.6	250.3	52.1
Parsons 06	G	100	1000	1400	253	180.7	253.6	181.2
	ESL	18	8000	1100	364	41.4	367.6	41.8
Mani 94**	G	75	1000	960	190	197.7	190.3	198.3
	ESL	15	8000	900	304	42.2	312.6	43.5
Frischknecht 06**	G	100	1000	1000	253	253.0	253.4	253.4
	ESL	20	8000	1000	405	50.6	408.4	51.0
Joliet 01**	G	60	1000	600	152	253.0	152.4	254.1
	ESL	11	8000	600	223	46.4	229.7	47.9
Schnitt ohne Ramroth	G	68	1000	791	172.0	221.6	172.7	222.5
	ESL	14	8000	771	277.1	45.4	281.4	46.1

* Basis: CO2e; Umrechnung über Konversionsfaktoren sehr unsicher

nicht berücksichtigt (siehe *)

** Energiebasis graue Energie: inkl. Vorketten

Abweichend (Produktion UND Entsorgung)

*** Mlmh: 1 Mio. Lumenstunden

Tabelle 12: Betriebsenergie (Primärenergiebedarf) von G und ESL mit normierten Brenndauern

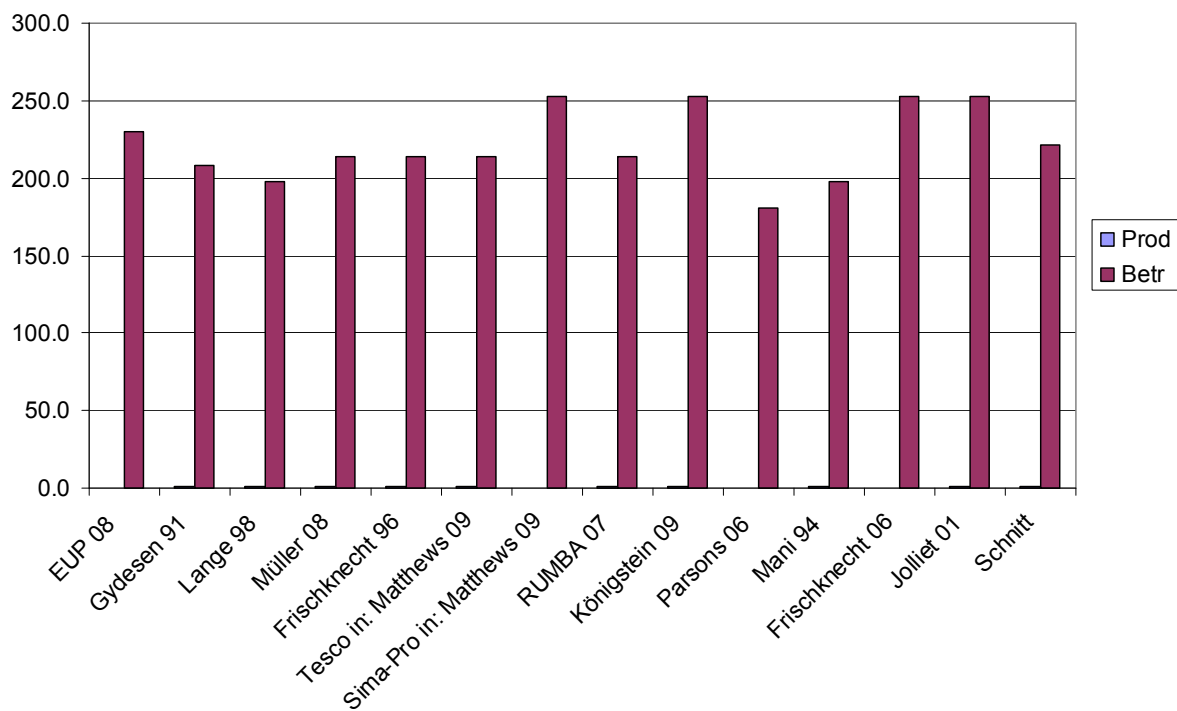


Abbildung 27: Energieverbrauch von G (Produktion und Betrieb) in kWh für 1 Mio. Lumenstunden

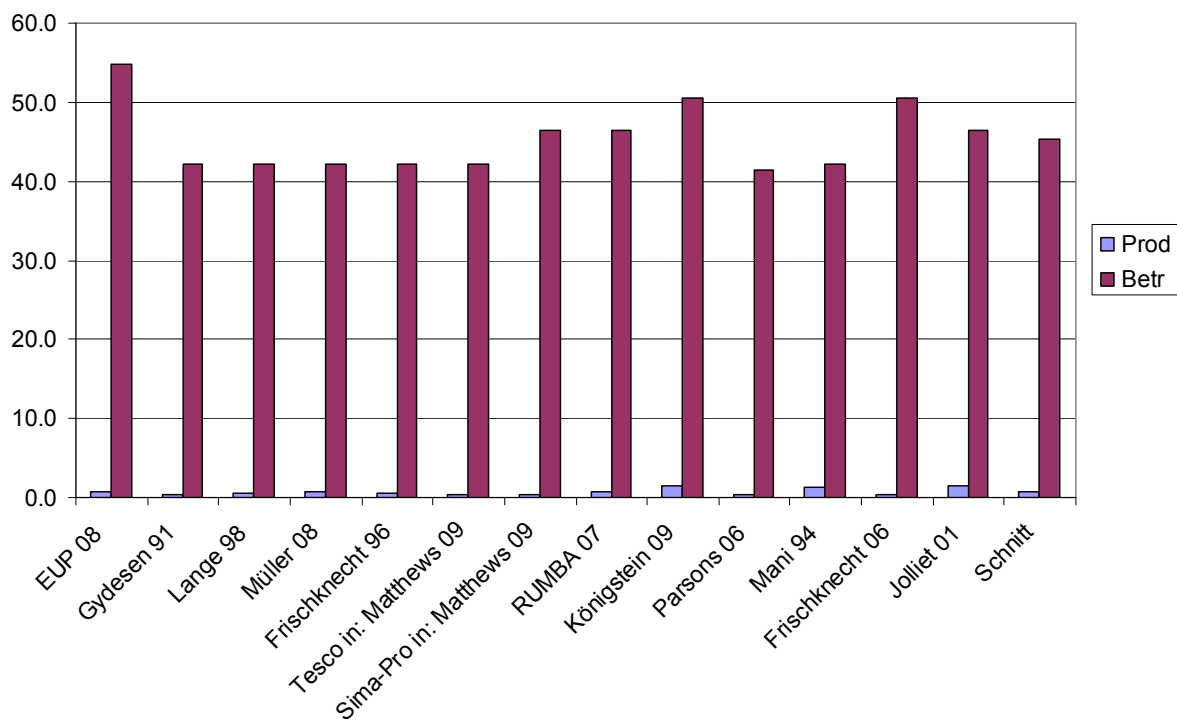


Abbildung 28: Energieverbrauch von ESL (Produktion und Betrieb) in kWh für 1 Mio. Lumenstunden

4.8.4 Schlussbemerkung

Noch ein Wort zum Quecksilberproblem: ESL enthalten kleine Mengen Quecksilber, das bei der Entsorgung durch Bruch des Glases entweicht. Sowohl bei separater Entsorgung (Vorschrift) als auch bei versehentlicher Entsorgung via Hauskehricht wird dieses Quecksilber aufgefangen (in der Recyklieranlage der Entsorgungsbetriebe bzw. im Rauchgasfilter der KVA) und wiederverwendet. Sodann gilt noch zu bedenken: Wird – wie häufig im Ausland – Strom durch Kohlekraftwerke erzeugt, wird durch die Verbrennung der Kohle Quecksilber freigesetzt. Die durch die Stromeinsparungen von ESL reduzierten Quecksilberemissionen in Kraftwerken sind dabei grösser als das in den Lampen enthaltene Quecksilber: in der Gesamtanalyse der Quecksilberemissionen schneiden ESL gegenüber GL, je nach Literaturquelle, um den Faktor 2 bis 3 besser ab (Scampini, 07; EPA, 08).

5. Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Im Rahmen dieses Projektes wurden die Netzurückwirkungen von 17 verschiedenen Energiesparlampen (ESL) mit eingebauter Elektronik sowie einer Glühlampe und einer Halogen-Glühlampe untersucht. Die Auswahl ist weitgehend repräsentativ für den schweizerischen Markt. Sodann wurde die Bedeutung der grösseren Herstellungsenergie (graue Energie) von ESL gegenüber G berücksichtigt und dem niedrigeren Verbrauch während des Betriebs gegenübergestellt.

Die Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Energiesparlampen arbeiten im Gegensatz zu Glühlampen mit einer internen Betriebsfrequenz von ca. 40 kHz. Zur Erzeugung dieser Betriebsfrequenz wird die 50-Hz-Netzspannung gleichgerichtet, in einem Zwischenkreis gespeichert und daraus mittels einer Art Zehnhacker die 40 kHz erzeugt.
- Der netzseitige Strom einer Energiesparlampe ist alles andere als sinusförmig. Der Strom entspricht im Wesentlichen der Ladekurve eines Kondensators via Diode. Ausnahmen bilden einzig Energiesparlampen mit "power factor correction" (PFC), wobei die weitaus meisten ESL in der Schweiz ohne PFC arbeiten.
- Der nicht-sinusförmige Strom führt zu Oberwellen und damit – im Verhältnis zur Wirkleistung – zu höheren Strömen als vergleichbare Glühlampen. Dies betrifft sowohl den Spitzenwert des Stromes als auch den Effektivwert. Dieses Verhalten kann physikalisch auch durch einen Blindleistungsanteil ausgedrückt werden.
- Die Verluste aufgrund eines schlechten Powerfaktors liegen im Schweizer Netz in der Grössenordnung von 1% und werden durch die reduzierten Verluste in der Stromzuleitung (Wirkstrom von ESL ist um Faktor 5 tiefer) mehr als kompensiert.
- Trotz der leistungsbezogen höheren Ströme der ESL gegenüber einer Glühlampe sinken die Zuleitungsverluste. Dies daher, weil die Verluste mit dem Quadrat des Stromes abnehmen und der Strom durch die ESL – wegen der geringeren Wirkleistung – kleiner ist als bei vergleichbaren Glühlampen.
- Die deutlichsten Netzurückwirkungen werden durch die schnellen Stromänderungen in der ESL erzeugt. Als Spannungsabfall über die Zuleitung wird die Qualität der Versorgungsspannung beeinflusst. Diese beeinflusste Spannung steht dann auch anderen Verbrauchern zur Verfügung, welche in der Lage sein müssen, damit störungsfrei umzugehen. Die Spannungseinbrüche liegen unter zehn Volt bei einem Spannungsniveau von über 250 Volt.
- Das Störpotential kann wesentlich vermindert werden, wenn die maximalen Stromänderungen in der ESL reduziert werden. Es wurden diesbezüglich wesentliche Unterschiede zwischen verschiedenen Fabrikaten festgestellt.
- Die Netzurückwirkungen von ESL im Dreiphasensystem ändern sich gegenüber Glühlampen insofern als sich wesentliche Anteile des Stromes im Neutralleiter überlagern. In heutigen Installationen sollten Neutralleiter im gesamten Niederspannungsversorgungsnetz immer über mindestens denselben Querschnitt verfügen wie die Phasenleiter.
- Ersetzen ESL die Mehrzahl der heutigen Glühlampen, so werden in jedem Stromversorgungsabschnitt eine Vielzahl von ESL parallel betrieben. Theoretisch können sich die Netzurückwirkungen der einzelnen ESL überlagern. Wie praktische Versuche und Computer-Simulationen gezeigt haben, "schalten" selbst gleiche ESL-Typen nicht exakt gleichzeitig. Damit werden die theoretisch denkbaren Maximalwerte der Netzurückwirkung in der Praxis nicht erreicht. Bei 10 parallel geschalteten ESL wurden Spannungseinbrüche von etwa 7 Volt (theoretisch über 40 Volt) festgestellt.

- Da die Maximalwerte nur für kurze Zeit je Halbwelle erreicht werden (100 – 200 μ s) ist eine Störung von Nachbargeräten unwahrscheinlich.
- Es kann nie ganz ausgeschlossen werden, dass theoretisch mögliche "Extremsituationen" in der Praxis vereinzelt auch auftreten können. Insofern ist nicht auszuschliessen, dass unter gewissen Situationen gewisse empfindliche Geräte sporadisch gestört werden können.
- Betreffend leitungsgebundenen HF-Störaussendungen sind uns bei den gemessenen Pegeln keine Störungen von anderen Geräten bekannt. Es kann aber nicht in jedem Fall und bei jeder Lampe ausgeschlossen werden, dass der – heute allerdings sehr seltene – Langwellenempfang gestört werden könnte, wenn eine ESL in der Nähe des Empfängers betrieben wird.
- Erste Grobuntersuchungen zur möglichen Störung von "Power Line Communication (PLC)"-Übertragungen zeigten keine nachteiligen Ergebnisse.
- Eine ESL benötigt für die Herstellung etwa 5 mal mehr Energie als eine Glühlampe. Bezogen auf 1 Mio. Lumenstunden sinkt dieser Faktor aufgrund der längeren Lebensdauer von ESL jedoch auf unter 1, d.h. die ESL schneiden besser ab als Glühlampen (0.6kWh für ESL, 0.9kWh für G). Die verfügbaren Daten zur grauen Energie von Lampen sind jedoch heterogen und mit Unsicherheiten behaftet. Insofern handelt es sich bei diesen Angaben um Grössenordnungen, die jedoch einigermaßen robust scheinen. In den meisten Analysen sind Distribution und Entsorgung nicht enthalten. Die Entsorgung schlägt jedoch energetisch kaum zu Buche.
- Die graue Energie ist gemessen am Energieverbrauch während des Betriebs (gerechnet über die Lebensdauer der Lampe) sowohl für ESL als auch für Glühlampen vernachlässigbar. Bei Glühlampen beträgt sie etwa 1%, bei ESL etwa 5% des Gesamtenergiebedarfs „von der Wiege bis zur Bahre“.
- Die Quecksilberemissionen, die durch die Entsorgung von ESL anfallen, entweichen weder bei separater Entsorgung noch bei versehentlicher Entsorgung via Hauskehricht in die Atmosphäre, sondern werden rezykliert. Durch den geringeren Strombedarf reduzieren ESL im Falle von fossiler Stromproduktion Quecksilberemissionen an der Quelle (Verbrennen von Kohle). Diese Reduktion ist deutlich grösser als die in den Lampen enthaltenen Quecksilberanteile.

Aufgrund der Ergebnisse drängen sich kaum Empfehlungen auf. Erwähnt werden sollen:

- Es sind keine Zusatzstandards für ESL notwendig
- Dimensionierung des Neutralleiters ist nach heutigem Standard nötig, d.h. keine Querschnittsreduktionen
- Powerfaktorkorrektur ist aus Gründen der Störströme gegenwärtig nicht nötig
- Aufgrund des Einschaltverhaltens sind gegenwärtig Störungen benachbarter Geräte unwahrscheinlich, können aber nicht in jedem Einzelfall ausgeschlossen werden. Es drängen sich keine Massnahmen auf.
- Auch bei flächendeckendem Einsatz von ESL ist in der Praxis nicht zu erwarten, dass es zu problematischen Netzzrückwirkungen kommen kann, insbesondere nicht im gut dimensionierten Schweizer Netz.
- Aufgrund der Analyse zur grauen Energie drängen sich ebenfalls keine Massnahmen auf, da ESL fast in jeder Hinsicht besser abschneiden als Glühlampen.

–

6. Abkürzungsverzeichnis

A	Ampère
A/s	Ampère pro Sekunde; Flankensteilheit des Stroms
BFE	Bundesamt für Energie
cm	"common mode"; Gleichtakt-Modus
dm	"differential mode"; Gegentakt-Modus
DUT	"Device Under Test"; Prüfling
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESL	Energiesparlampe
G	Glühlampe
H	Halogen-Glühlampe
Hz	Hertz
I	Strom (in Ampère)
kHz	Kilohertz
KVA	Kehrrichtverbrennungsanlage
kWh	Kilowattstunde
L	Induktivität (in Henry)
LCA	„Life-Cycle Assessment“; Bilanzierung des gesamten Lebenszyklus eines Produkts
MHz	Megahertz
lmh	Millionen Lumen-Stunden
mA	Milliampère
mV	Millivolt
ms	Millisekunde
OFEN	Office fédéral de l'énergie
p	Wirkleistung (in Watt)
PF	"Power Factor"; Leistungsfaktor
PFC	"Power Factor Correction"; Leistungsfaktor-Korrektur
PLC	"Power Line Communication"; Datenkommunikation via Stromnetz
R	Widerstand (in Ohm)
RMS	"Root mean square"; Effektivwert (ca. 70% des Scheitelwertes eines Sinussignals)
SFOE	Swiss Federal Office of Energy
THDI	"Total Harmonic Distortion"; gesamte harmonische Verzerrung
U	Spannung (in Volt)
V	Volt
VA	Scheinleistung (in Watt)
Var	Blindleistung (in Watt)
W	Watt
Z	Impedanz (in Ohm)

7. Referenzen

7.1 Literaturverzeichnis

- [1] A.F. AbdEl-Gawad: **Studying the impact of different lighting loads on both harmonics and power factor**, 42nd International Universities Power Engineering Conference, UPEC. 4-6 Sept., 109 – 114, 2007.
- [2] J. Cunill-Sola, M. Salichs: **Study and Characterization of Waveforms From Low-Watt (<25 W) Compact Fluorescent Lamps With Electronic Ballasts**, Power Delivery, IEEE Transactions on Power Delivery, 22, 2305 – 2311, 2007.
- [3] G. Dürrenberger, G. Klaus: **EMF von Energiesparlampen: Feldmessungen und Expositionsabschätzungen mit Vergleich zu anderen Quellen im Alltag**, BFE und BAG, DIS-Projekt Nr. 100898; <http://www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/478.pdf>, 2004.
- [4] G. Dürrenberger, G. Klaus: **Kurzkommentar zur Beurteilung von Emissionsmessungen von Energiesparlampen**, http://www.mobile-research.ethz.ch/var/Kommentar_ESL_1207.pdf, 2007.
- [5] U. Grasselli, R. Lamedica, A. Prudenzi: **Time-varying harmonics of single-phase nonlinear appliances**, Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE Volume 2, 27-31 Jan., 1066 - 1071 vol.2, 2002.
- [6] A. Gydesen, D. Maimann: **Life Cycle Analysis of Integral Compact Fluorescent Lamps versus Incandescent Lamps**, Proceedings of Right Light 1, 411-417, Stockholm, www.iaeel.org/IAEEL/Archive/Right_Light_Proceedings/Proceedings_Body/BOK1/200/1411.PDF
- [7] P.N. Korovesis, G.A. Vokas, I.F. Gonos, and F.V. Topalis: **Influence of large-scale installation of energy saving lamps on the line voltage distortion of a weak network supplied by photovoltaic station**, T-PWRD, 19, 1787-1793, 2004.
- [8] H. Lange: **Handbuch für Beleuchtung**, ecomed Verlag, Landsberg, 7-13, 1998.
- [9] S. Müller: **Energieeffiziente Lichtquellen**, Osram GmbH, Wien, 2008.
- [10] K.D.A. Munasinghe, S.G. Abeyratne: **Power Quality And Harmonic Loads**, First International Conference on Industrial and Information Systems, 8-11 Aug., 52 – 57, 2006.
- [11] A.B. Nassif, J. Acharya: **An investigation on the harmonic attenuation effect of modern compact fluorescent lamps**, 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, Sept. 28 - Oct. 1, 1 – 6, 2008.
- [12] Parsons Brinckerhoff Associates: **Installation of Compact Fluorescent Lamps, Assessment of Benefits**, report for the Electricity Commission of New Zealand, Wellington, 2006.
- [13] D. Parsons: **The Environmental Impact of Compact Fluorescent Lamps and Incandescent Lamps for Australian Conditions**, The Environmental Engineer, 7, 2, 8-14, 2006.
- [14] M.H. Sadek, A.A. Abbas, M.A. El-Sharkawy, H.M. Mashaly: **Impact of using compact fluorescent lamps on power quality**, International Conference on Electrical, Electronic and Computer Engineering, ICEEC '04, 941 – 946, 2004
- [15] SAFE, Arcotronic AG: **14 Sparlampen im Test**, im Auftrag von Kassensturz und WWF Schweiz, 2007.
- [16] SLG (Schweizerische Lichtgesellschaft): **Dossier Glühlampenverbot**, Bern, 2007.
- [17] C. Uyaisom, W. Khan-ngern: **The Comparison of Conducted EMI Emission and Electrical Performances of Lamps**, 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS, 27-30 Nov., 1649 – 1653, 2007.
- [18] Z. Wei, N.R. Watson, L.P. Frater: **Modelling of compact fluorescent lamps**, 13th International Conference on Harmonics and Quality of Power, ICHQP, Sept. 28 - Oct. 1, 1 – 6, 2008.
- [19] L. Ramroth: **Comparison of Life-Cycle Analyses of Compact Fluorescent and Incandescent Lamps Based on Rated Life of Compact Fluorescent Lamp**, Rocky Mountain Institute, Snowmass, 2008.
- [20] S. Müller: **Energieaufwand und Umweltrelevanz bei der Erzeugung, Betrieb und Entsorgung von elektrischen Lichtquellen, insbesondere Energiesparlampen**, Osram GmbH, Wien, 2008.
- [21] R. Frischknecht, U. Bollens, S. Bosshart, M. Ciot, L. Ciseri, G. Doka, R. Dones, U. Gantner, R. Hischier and A. Martin: **Ökoinventare von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz**. 3. Gruppe Energie - Stoffe - Umwelt (ESU), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich und Sektion Ganzheitliche Systemanalysen, Paul Scherrer Institut, Villigen, Bundesamt für Energie (Hrsg.), Bern, 1996.
- [22] H.S. Matthews, D.H. Matthews, P. Jaramillo, C. Weber, C. Hendrickson: **Life Cycle Assessment of Solid State Lighting Applications**, Green Design Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2009.
- [23] Gasser 08
- [24] T. Königstein: **Nur die Motten scheuen das Licht**. Oberhessische Energieagentur, Friedberg, mimeo, 2009.
- [25] VITO: **Eco-design directive for Energy Using Products (EuP)**, Lot 19: Domestic Lighting, Task 5: Definition of Base-Case, Draft, European Commission DGTREN unit D3, Brussels, 2008a.
- [26] VITO: **Eco-design directive for Energy Using Products (EuP)**, Lot 19: Domestic Lighting, Task 3: Consumer Behaviour and Local Infrastructure, Draft, European Commission DGTREN unit D3, Brussels, 2008b.
- [27] R. Hänssler, P. Knoll, J. Stein: **Steigerung der Energie-Effizienz durch Blindleistungs-Kompensation**, ZVEI, Frankfurt, 2008.
- [28] RUMBA (Ressourcen- und Umweltmanagement der Bundesverwaltung). **Achtung Licht**, RUMBA, Bern, 2007.
- [29] P. Frischknecht: **Einführung in den Umgang mit Umweltsystemen**, ETH Zürich, DUWIS, Zürich, 2006.
- [30] O. Jolliet, P. Crettaz: **Analyse environnemental du cycle de vie**, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 2001.
- [31] A. Scampini: **A Comparison of Compact Fluorescent Light Bulbs to Incandescent Light Bulbs Using Life Cycle Assessment**, RET Report, Univ. of Illinois, Chicago, 2007.

- [32] EPA: *Information on compact Fluorescent Light Bulbs (CFLs) and Mercury*, EPA, Washington, 2008.
- [33] ELCF (European Lamp Companies Federation): *Mains Power-Quality Effects by Electronic Lighting Equipment*, ELCF, Brussels, 2009.

7.2 Normen- und Richtlinienverzeichnis

- [34] Grenzwerte und Messverfahren für die Funkstöreigenschaften von elektrischen Beleuchtungseinrichtungen und ähnlichen Elektrogeräten EN55015
- [35] Grenzwerte für Oberschwingungsströme (Geräte-Eingangsstrom ≤ 16 A je Leiter) EN61000-3-2 (sowie A13)
- [36] Grenzwerte für Spannungsschwankungen und Flicker in Niederspannungsnetzen für Geräte mit einem Eingangsstrom < 16 A EN61000-3-3
- [37] Prüfungen der Störfestigkeit gegen Spannungseinbrüche, Kurzzeitunterbrechungen und Spannungsschwankungen EN61000-4-11
- [38] Einrichtung für allgemeine Beleuchtungszwecke. EMV-Störfestigkeitsanforderungen EN61547
- [39] Energieeffizienz von Vorschaltgeräten für Leuchtstofflampen CE 2000/55/EG
- [40] Consideration of reference impedances and public supply network impedances for use in determining disturbance characteristics of electrical equipment having a rated current ≤ 75 A per phase IEC TR 60725