

Netzregelung mit LED-Lampen

Eberhard Waffenschmidt, Andre Kores, Desiree Fuhs, Lee Chi Kwan, Liu Heng
Korrespondierender Autor: E. Waffenschmidt, TH-Köln, Betzdorferstr.2., 50679 Köln

Tel.: +49 221 8275 2020

eberhard.waffenschmidt@th-koeln.de

www.100pro-erneuerbare.com

Zusammenfassung

Erneuerbare Energien breiten sich weltweit aus mit dem Ziel einer 100% Versorgung mit Erneuerbaren Energien. Dabei werden sukzessive konventionelle Generatoren durch dezentrale Einspeiser ersetzt, welche die Leistung mittels elektronischen Wechselrichtern ins Netz einspeisen. Rotierende Massen und deren Drehzahl-Regler werden verschwinden und müssen durch eine entsprechende Regelung zukünftiger Netzkomponenten ersetzt werden. Aber nicht nur Einspeiser können in Zukunft dazu beitragen, sondern auch elektrische Lasten können in Zukunft zur Netzregelung beitragen.

In diesem Beitrag werden Optionen untersucht, LED-Lampen als variable Lasten zu nutzen. Als Beispiel kann bei einem Spannungsbereich von +/-10% die Leistung von konventionellen Glühlampen um etwa +/-20% variieren. Weiterhin ist bekannt, dass langsame Änderungen der Lampenhelligkeit von Nutzern nicht wahrgenommen werden. Hier werden entsprechenden Rampen-Raten mit Hilfe eines Tests mit einigen Testpersonen in Köln und Hong Kong ermittelt. Es stellt sich heraus, dass mögliche Rampen-Raten und die entsprechende Leistungsänderung, die nicht wahrnehmbar sind, einen signifikanten Anteil der Lampenleistung haben kann, sodass z.B. Primärregelleistung mit LED-Lampen erbracht werden könnte.

1 Einleitung

Erneuerbare Energien gewinnen Stück für Stück größere Anteile an der Energieversorgung. Kürzlich am 1. Mai 2018 konnten erstmalig Erneuerbare Energien für einen begrenzten Zeitraum von zwei Stunden mehr als 100% des In Deutschland benötigten Stromverbrauchs decken [1], und bald werden längere Perioden dieser Art erwartet [2]. Das meiste dieser Leistung wird durch elektronische Wechselrichter eingespeist, welche derzeit weder rotierende Massenträgheit (Inertium) noch irgendeine Frequenzregelung beinhalten.

Glücklicherweise ist das deutsche Stromnetz Teil der ENTSO-E, European Network of Transmission System Operators for Electricity, und derzeit können fehlende Inertia und Primärregelung durch andere Mitglieder, welche weniger Anteile an Erneuerbaren Energien haben, ausgeglichen werden [3]. Es gibt verschiedene Vorschläge für die Bereitstellung virtuellen Inertia mit elektronischen Wechselrichtern [4] [5] [6] [7] sowie Primärregelung mit Erneuerbaren Generatoren und Batterien [8] [9].

Allerdings können nicht nur Generatoren zur Netzregelung beitragen. So wurde beispielsweise in einem vorhergehenden Beitrag [10] die Nutzung von

Zwischenkreiskondensatoren im Gleichrichter von Netzteilen und insbesondere von LED-Lampentreibern vorgeschlagen, um ein virtuelles Inertium zu erzeugen.

Hier soll untersucht werden, wie ein solcher Lampentreiber zusätzlich Primärregelleistung (Primary Reserve Control, PRC [11]) oder Fast Frequency Control, wie in Inselnetzen benötigt, zur Verfügung stellen könnte. Dazu wird hier die generelle Reaktion auf eine zusätzliche Leistungsanforderung untersucht. Dabei wird angenommen, dass eine solche Leistungsanforderung durch PRC oder Bedarf an Fast Frequency Control oder andere Arten von Regelung erfolgt. Während der Zwischenkreiskondensator dabei eine schnelle Reaktion auf den Leistungssprung bedienen kann, ist dabei die Energiemenge limitiert und daher für eine Primärregelung nicht geeignet.

Als Grundidee wird daher die Lampenleistung, und damit die Helligkeit, variiert, um Leistung für eine Primärregelung oder ähnliche Regelung zur Verfügung zu stellen. Es ist aus Erfahrung bekannt, dass langsame Helligkeitsänderungen kaum von Menschen wahrgenommen werden. Daher werden als grundsätzliche Idee langsame Leistungsänderungen durch eine langsame Änderung der LED-Helligkeit zur Verfügung gestellt, während schnelle Änderungen durch den Zwischenkreiskondensator bereitgestellt werden (siehe auch Bild 1). Diese Idee wurde bereits auch in einem Beitrag zur IESC-Konferenz vorgestellt [12], welcher die Grundlage auch für den hiesigen Beitrag liefert. Dabei werden hier insbesondere die empirischen Untersuchungen zur Wahrnehmung der Helligkeit präsentiert. Mit diesen Ergebnissen wird die maximale Schrittweite für einen Leistungssprung, der gerade noch nicht wahrnehmbar ist, ermittelt. Des Weiteren wurde ein solches System für weitere empirische Untersuchungen eingesetzt.

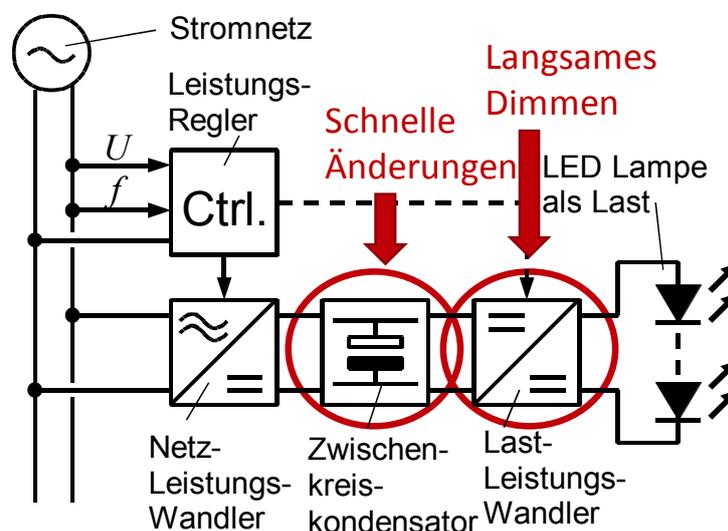


Bild 1: Verwendete Topologie und Komponenten zur Verarbeitung eines Leistungssprungs.

Grundsätzliche Idee

Wie schon erwähnt, besteht die grundsätzliche Idee darin, die Regelleistung dadurch zur Verfügung zu stellen, dass die Lampenleistung und damit die Helligkeit variiert wird. Eine Variation der Helligkeit aufgrund der Stromversorgung ist nicht neu. Tatsächlich sind althergebrachte Glühlampen mehr oder weniger ohmsche Lasten und ändern damit ihre

Helligkeit entsprechend der Netzspannung. Da die Netzspannung in Europa bis zu +/-10% fluktuieren kann, kann sich die Lichtleistung um bis zu +/-20% der Nennleistung ändern. Aufgrund von spektralen Verschiebungen hat die Lichtemission sogar eine noch weitere Bandbreite. Bild 2 zeigt die Lichtemission einer typischen Philips Halogen Lampe als Funktion ihrer Versorgungsspannung [13]. Demnach sind schon in einem Spannungsbereich von +/-5% der Nennspannung Helligkeitsänderungen von mehr als +/-20% zu erwarten.

Dieses Verhalten ist von Benutzern akzeptiert und zeigt das Potential für mögliche Leistungsvariationen. Auf der anderen Seite sind Benutzer heutzutage an die konstante Helligkeit von LED-Lampen gewohnt. Wenn es möglich wäre, mit einer LED-Lampe einen ähnlichen Lampen-Leistungsbereich wie mit einer Glühlampe zu nutzen, ohne dass der Nutzer es wahrnimmt, könnte damit ein signifikantes Potential für eine Netzregelung gehoben werden.

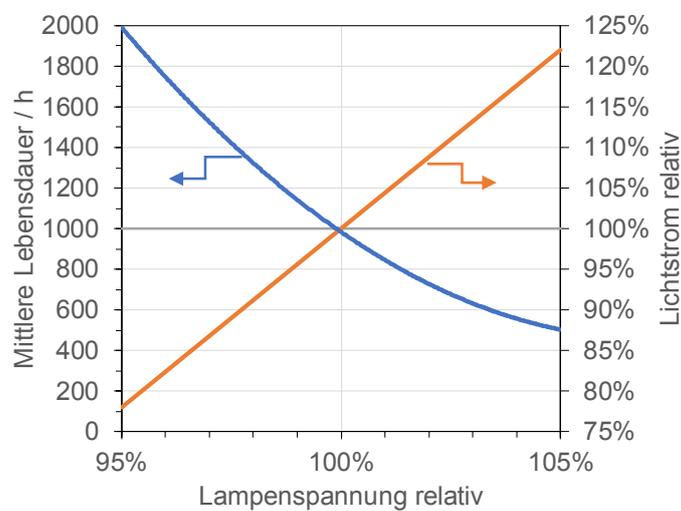


Bild 2: Lichtemission einer Halogenlampe als Funktion der Lampenspannung. Daten basierend auf [13].

Verwendete Schaltungstechnik

Für die Experimente wird eine High-Power-LED-Lampe verwendet. Es ist eine Philips Fortimo LED DLM, Module 2000 32W/840 mit einer typischen Leistung von 15 W (maximale Leistung 33 W) und einer typischen LED-Durchlass-Spannung von 35 Vdc (siehe Bild 3).



Bild 3: Verwendete LED-Lampe.

Der Leuchtfluss dieser LED wurde als Funktion des LED-Stroms in einem Laboraufbau mit einer Ulbricht-Kugel gemessen. Die Ergebnisse sind in Bild 4 dargestellt. Die weiteren Ergebnisse basieren auf dem LED-Strom und dieses Bild kann genutzt werden, um sie auf die Helligkeit der LED zu konvertieren.

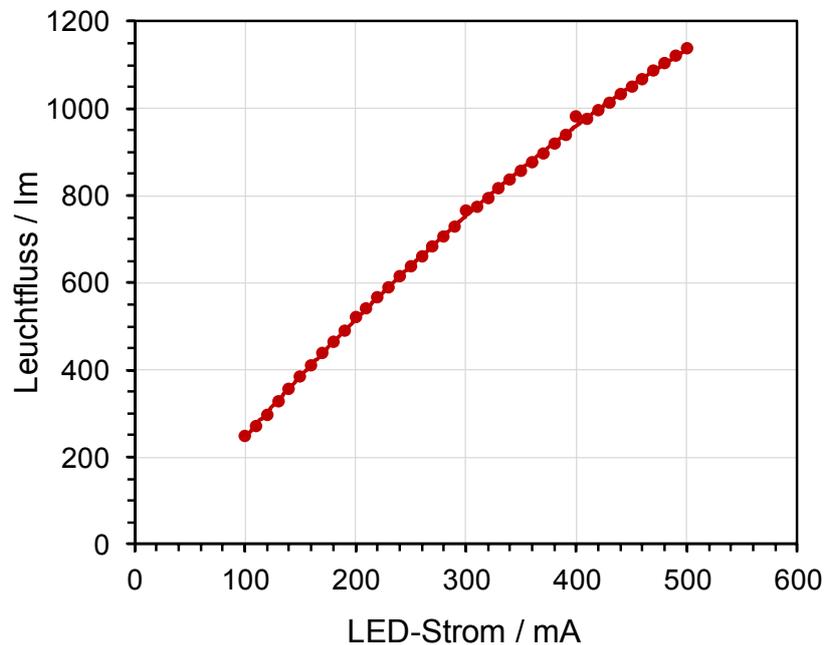


Bild 4: Leuchtfluss der LED als Funktion des LED-Stroms.

Für die Experimente zur visuellen Wahrnehmung wurde diese LED an verschiedene fernsteuerbare Labornetzteile angeschlossen.

Um die generelle Funktionalität der Kollaboration zwischen Zwischenkreiskondensator und Lampenhelligkeit zu demonstrieren wurde der originale LED-Treiber modifiziert. Es ist ein Philips Fortimo LED Driver 1100-2000 TD/I, welcher bis zu 46 W bei einer Ausgangsspannung von 20 V bis 80 V und einen stabilisierten Ausgangsstrom von 200 mA bis 700 mA liefern kann (siehe Bild 5). Die Modifikation erlaubt die Steuerung der Zwischenkreisspannung durch eine externe Spannung, wie in [10] beschrieben. Dies korrespondiert mit den „schnellen Leistungssprüngen“ in Bild 1. Eine weitere Modifikation steuert den Lampen-Ausgangs-Strom durch eine zusätzliche externe Spannung, welches dem „langsamen Dimmen“ in Bild 1 entspricht. Beide externen Spannungen sind an ein Digital-zu-Analog-Interface eines Computers angeschlossen. Er enthält die Steueralgorithmen, die unter LabView entwickelt wurden.

Das endgültige Leistungsschritt-Experiment im letzten Kapitel wurde mit einem selbstentwickelten Lampentreiber durchgeführt. Mehr Detail werden in einer entsprechenden Publikation veröffentlicht [14]

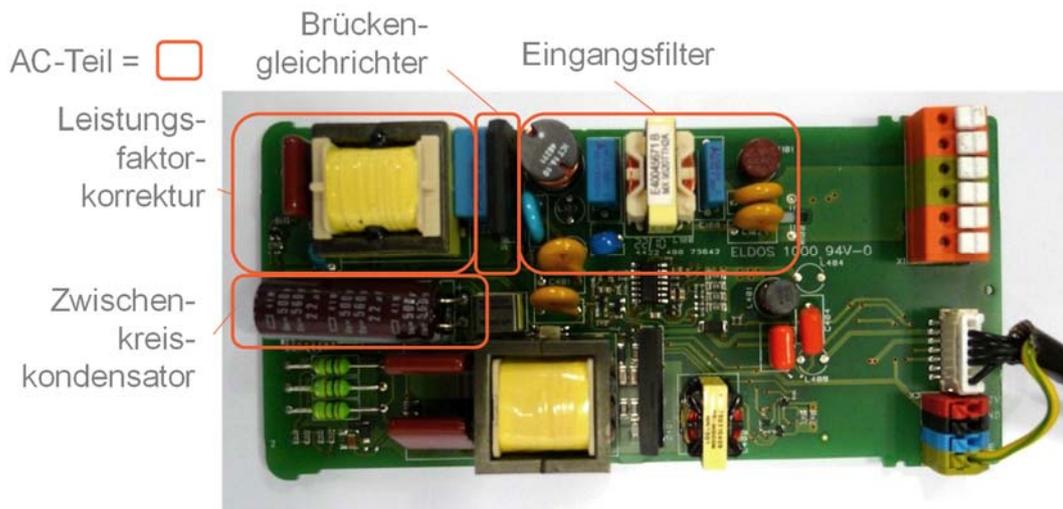


Bild 5: Leiterplatte des modifizierten LED-Lampentreibers

Empirische Experimente zur Helligkeits-Wahrnehmung

Um die (nicht mehr) wahrnehmbare Helligkeitsänderung zu untersuchen, wurden zwei empirische Experimente durchgeführt: Ein erstes an der University of Hong Kong und ein zweites an der TH-Köln. Die Testpersonen wurden dabei verschiedenen Helligkeits-Rampen bei verschiedenen Helligkeits-Niveaus ausgesetzt.

Messaufbau

Für das erste Experiment in Hong Kong wurden die Testpersonen in ein lichtgeschütztes Zelt wie in Bild 6 platziert. Das LED-Licht war die einzige Lichtquelle und war auf eine weiße Tischplatte gerichtet. Der LED-Strom wurde entsprechend der Kurven in Bild 7 programmiert. Insgesamt wurden jeweils 10 individuelle Kurvenverläufe durchgeführt.



Bild 6: Lichtgeschütztes Zelt für die Wahrnehmungsversuche in Hong Kong.

Insgesamt nahmen 13 Personen an diesem Test teil. Jede Person füllte dabei einen Fragebogen aus. Er enthält einige generelle Fragen, welche mit den insgesamt gemittelten Antworten in Tabelle 1 aufgelistet sind. Nach jedem Schritt des Experimentes (wie in Bild 7 angemerkt) wurden den Testpersonen vier Fragen gestellt, welche in Tabelle 2 gelistet sind.

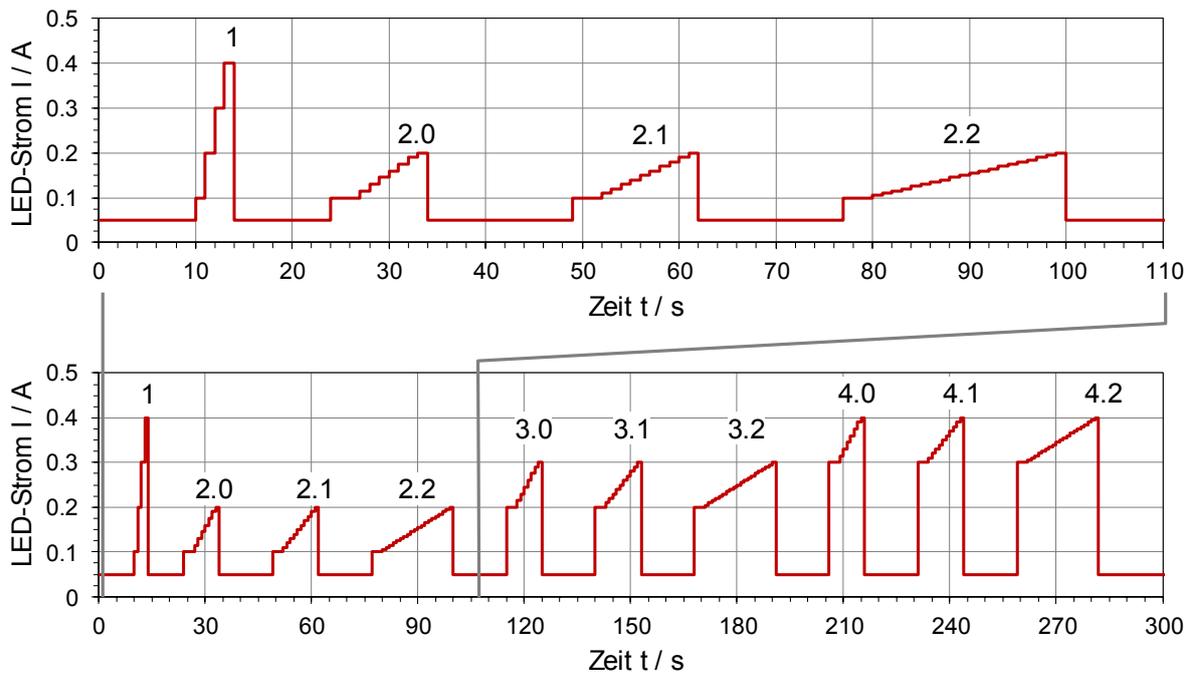


Bild 7: LED-Stromverlauf während des ersten Experiments in Hong Kong. Die Nummern bezeichnen die Teile des Experiments.

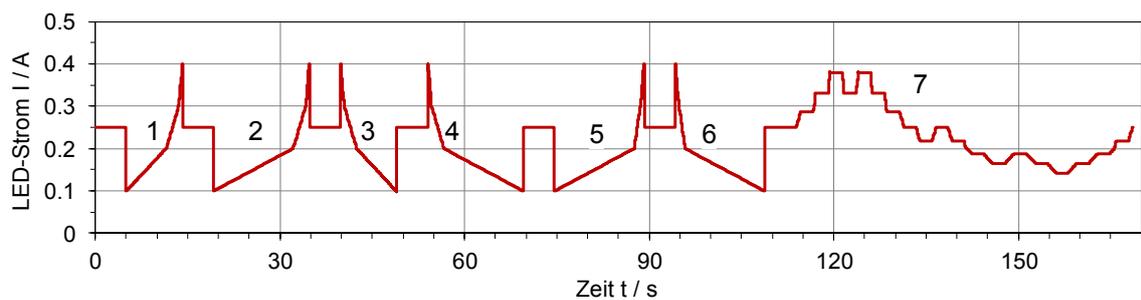


Bild 8: LED-Stromverlauf während des zweiten Experiments an der TH-Köln. Die Nummern bezeichnen die Teile des Experiments.

Die erste Frage „Did you see different levels of brightness?“ („Konnten Sie verschiedene Stufen der Helligkeit sehen?“) wurde gestellt um einen generellen Eindruck der Wahrnehmung zu bekommen. Die zweite Frage „How extreme did you notice the variation?“ („Wie extrem haben Sie die Änderung bemerkt?“) erlangt eine detailliertere Bewertung der Wahrnehmung. Ein Wert von 10 entspricht einer starken Wahrnehmung. Da das Netzteil nicht beliebig glatte Kurvenverläufe erzeugen konnte, wurde die dritte Frage gestellt: „Was the increase and decrease of brightness smooth or stepped?“ („War der Anstieg oder Abstieg der Helligkeit glatt oder gestuft?“). Die letzte Frage „Are you able to work under this brightness conditions?“ („Können Sie unter diesen Lichtverhältnissen arbeiten?“) wurde gestellt, um die persönliche Wichtung der Wahrnehmung zu erfahren.

Das Experiment an der TH-Köln wurde ähnlich durchgeführt. Allerdings war der Lichtverlauf, denen die Testpersonen ausgesetzt waren, unterschiedlich (siehe Bild 8). Zusätzlich wurden hier die Testpersonen gebeten zu notieren, ab wann sie eine Helligkeitsänderung bei jedem individuellen Schritt wahrnehmen. Dies wurde als Strom-Wert notiert. Insgesamt nahmen 10 Personen an den Tests an der TH-Köln teil.

Tabelle 1: Generelle Fragen des Fragebogens inklusive durchschnittliche Ergebnisse:

What is your gender?	
<input type="checkbox"/> male	9
<input type="checkbox"/> female	4
How old are you?	
<u>Average 29.4 years</u>	
Do you wear glasses/ contact lenses?	
<input type="checkbox"/> Yes	8
<input type="checkbox"/> No	5

Tabelle 2: Experiment-spezifische Fragen:

1. Did you see different levels of brightness?
<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> No
<input type="checkbox"/> Not sure
2. How extreme did you notice the variation?
<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> 10
3. Was the increase and decrease of brightness smooth or stepped?
<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6 <input type="checkbox"/> 7 <input type="checkbox"/> 8 <input type="checkbox"/> 9 <input type="checkbox"/> 10
4. Are you able to work under this brightness conditions?
<input type="checkbox"/> Yes
<input type="checkbox"/> No
<input type="checkbox"/> Not sure

Empirische Ergebnisse

Die Ergebnisse der empirischen Untersuchung in Hong Kong sind für die 10 Schritte des Experimentes nach Bild 9 illustriert, und zwar in Bild 10 für Frage 2, in Bild 11 für Frage 3 und Bild 12 für Frage 4. Für Frage 1 und Frage 4 entspricht ein „Yes“ der Zahl 1, ein „No“ der Zahl -1 und ein „Not sure“ einer 0. Für Fragen 2 und 3 ist als „Mittlerer Wahrnehmungswert“ der jeweilige Mittelwert aus allen zugehörigen Antworten aufgetragen. Die Antworten zur ersten Frage zeigen, dass die gewählten Helligkeitsrampen in den meisten Fällen wahrnehmbar sind. Vor allem bei niedrigen Lichtpegeln ist die Wahrscheinlichkeit der Wahrnehmung hoch. Bei höheren Lichtpegeln (Experiment 4, 4.1 and 4.2) sind einige Testpersonen unsicher oder notieren „No change“. Die Antworten zu Frage 2 zeigen detaillierte Ergebnisse. Dieselbe Helligkeitsrampe wird bei hohen Lichtpegeln weniger streng wahrgenommen (vergleiche z.B. 2.1., 3.1. und 4.1). Die Antworten zu Frage 3 entlarven ein Problem mit dem Messaufbau in Hong Kong: Das genutzte Netzteil war nicht in der Lage, kurze Schritte mit einem geringen Stromanstieg zu erzeugen. Daher erschienen steilere Rampen als „schrittweise“, was deutlich leichter wahrgenommen werden kann. Für die meisten Testpersonen war das der Grund, sich unkomfortabel zu fühlen, wie in Frage 4 geantwortet.

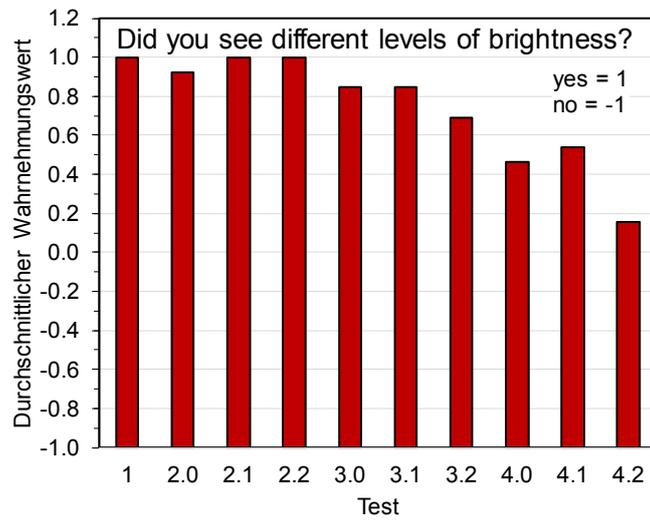


Bild 9: Zusammenfassung der Antworten auf Frage 1 des ersten Experimentes in Hong Kong.

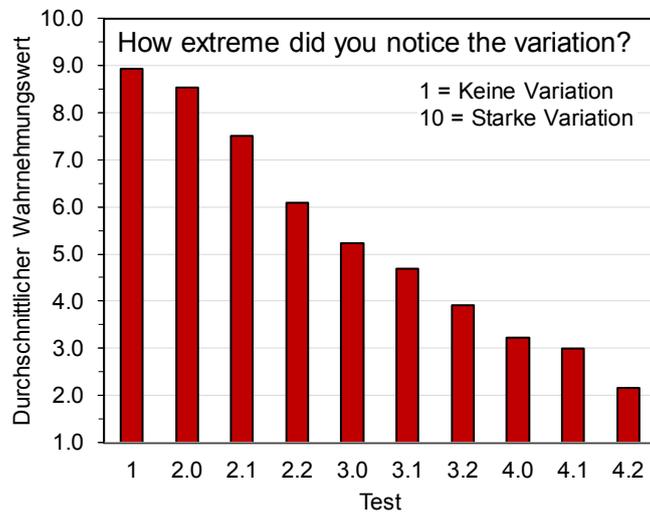


Bild 10: Zusammenfassung der Antworten auf Frage 2 des ersten Experimentes in Hong Kong.

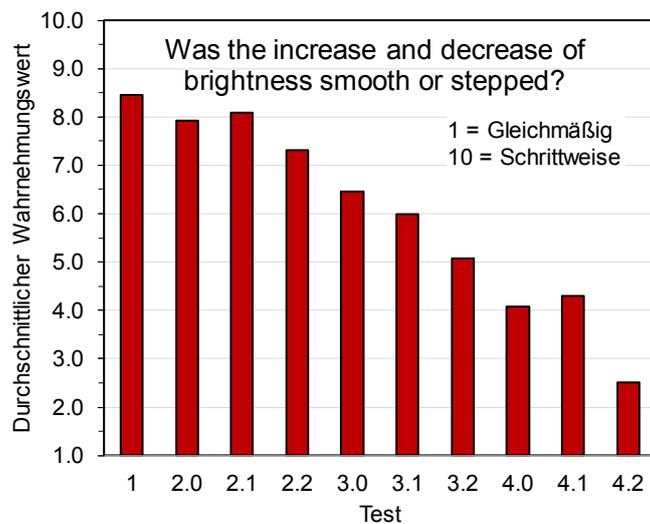


Bild 11: Zusammenfassung der Antworten auf Frage 3 des ersten Experimentes in Hong Kong.

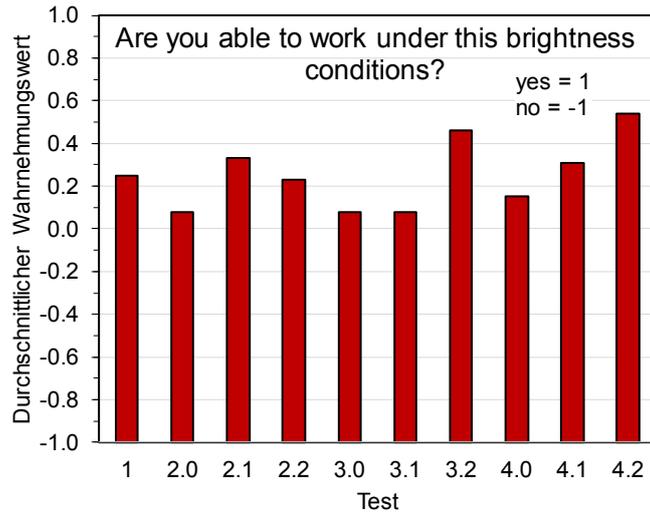


Bild 12: Zusammenfassung der Antworten auf Frage 4 des ersten Experimentes in Hong Kong.

Die Antworten zu Frage 2 (Bild 10) zeigen dass das Design des Experimentes leider keinen Test mit einer nicht-wahrnehmbaren Helligkeitsrampe enthielt. Um jedoch die Helligkeitsrampe zu ermitteln, welche gerade noch nicht wahrnehmbar ist, wurden die Ergebnisse auf folgende Weise extrapoliert (siehe auch Bild 13). Um die Ergebnisse bei verschiedenen Helligkeitspegeln vergleichen zu können, wurde die Steigung des Leistungsverlaufs auf die mittlere Leistung für diesen Teil des Versuchs normiert.

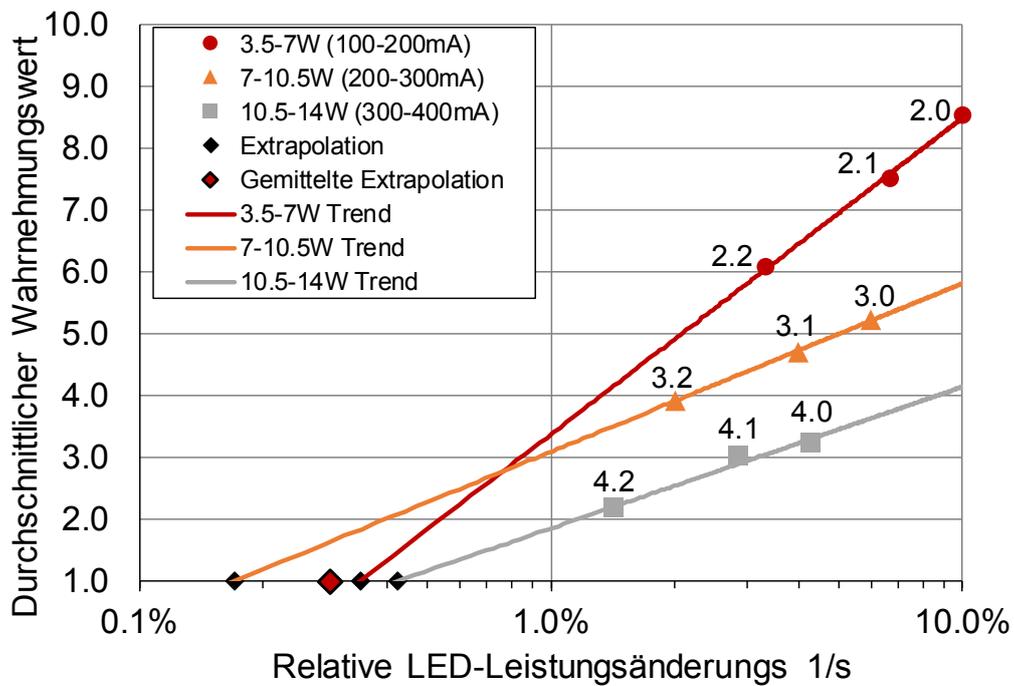


Bild 13: Extrapolation der Wahrnehmungswerte der LED-Helligkeit auf die Frage "How extrem do you notice the variation?"

Die horizontale Achse zeigt den relativen Anstieg der Leistung. Da eine logarithmische Wahrnehmung der Helligkeit angenommen wird, ist die Achse logarithmisch skaliert. Die vertikale Achse zeigt den durchschnittlichen Wahrnehmungswert (entsprechend Bild 10) bezogen auf den Test mit der jeweiligen Helligkeitsrampe (die Tests sind in Bild 13 markiert). Für jeden absoluten Leistungspegel kann ein logarithmischer Trend erkannt werden, welcher hier als Gerade im logarithmischen Diagramm erscheint. Es kann angenommen werden, dass der Wahrnehmungswert sich mit geringeren Helligkeitsrampen weiter entsprechend den extrapolierten Trends reduziert. Der Schnittpunkt mit einem Wahrnehmungswert von 1 markiert den Punkt, bei dem eine Helligkeitsänderung nicht mehr wahrgenommen würde. Als global resultierender Wert kann der geometrische Mittelwert dieser drei Schnittpunkte angenommen werden. Damit kann ein Wert von 0,3%/s der aktuellen Leistung als ein wahrscheinlicher genereller Wert für ein Wahrnehmungs-Limit angenommen werden.

Realisation

Wenn ein plötzlicher Leistungssprung von der LED-Lampe übernommen werden soll, sollte die Helligkeit keinen Sprung machen, damit das nicht wahrgenommen wird. Stattdessen soll der Zwischenkreiskondensator genutzt werden, um die Energie zu liefern oder aufzunehmen, die nicht unmittelbar von der LED geliefert werden kann. Bild 14 illustriert das Verhalten. Während die Eingangsleistung P_{in} als Stufe ansteigt, steigt die Leistung der LED P_{LED} mit einer gleichmäßigen Steigung an (Periode I). Während dieser Zeit wird der Zwischenkreiskondensator mit der überschüssigen Energie geladen. Daher steigt die Zwischenkreisspannung (hier nicht dargestellt). Um zu einem neuen stabilen Arbeitspunkt zu kommen, muss der Zwischenkreiskondensator die überschüssige Energie wieder loswerden. Daher wird die Helligkeit der LED sogar noch über die Eingangsleistung angehoben, um den Zwischenkreiskondensator auf seine nominale Spannung zu entladen (Periode II). Ein negativer Leistungssprung wird entsprechend invers behandelt (Periode III und IV).

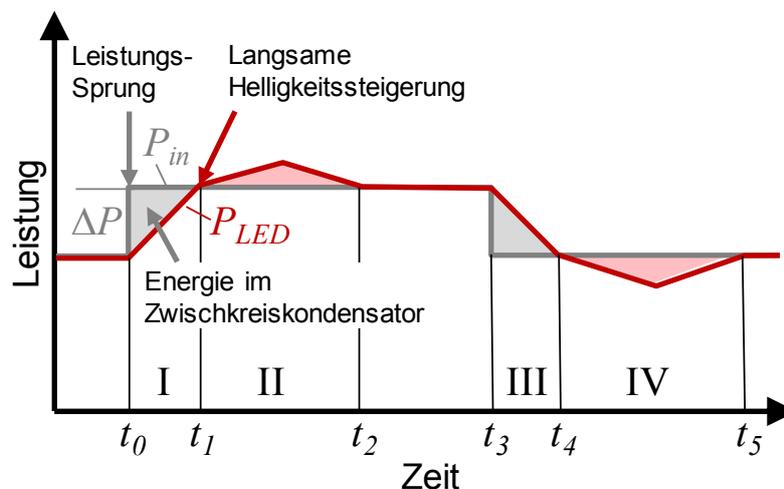


Bild 14: Leistungs- und Energiefluss im LED-Lampensystem bei einem Leistungssprung am Eingang.

Dieses Verhalten ist die Basis für die Kalkulation des Verhaltens auf einen möglichen Leistungssprung am Eingang:

Die Eingangsleistung muss gleich der Leistung P_{cap} , welcher Der Zwischenkreiskondensator übernimmt, und der LED-Leistung P_{Lamp} (gleich P_{LED}) sein:

$$P_{in} = P_{cap} + P_{Lamp}$$

Dann wird für die Energiebilanz integriert:

$$\int_{t_0}^{t_1} P_{in} dt = \int_{t_0}^{t_1} P_{cap} dt + \int_{t_0}^{t_1} P_{Lamp} dt$$

Das ergibt:

$$P_{step} * T = \Delta E_{Cap} + 0.5 * P_{step} * T$$

wobei $T = t_1 - t_0$

Die Energie, die der Kondensator aufnehmen kann ist:

$$\Delta E_{Cap} = 0.5C * (U_1^2 - U_0^2)$$

Daher haben wir:

$$0.5 * P_{step} * T = 0.5C * (U_1^2 - U_0^2)$$

Ebenso ist für die LED-Leistung bekannt:

$$P_{step} = K * T$$

wobei K die Anstiegsrate der Lampenleistung ist.

Daher folgt:

$$0.5 * \frac{P_{step}^2}{K} = 0.5C * (U_1^2 - U_0^2)$$

wodurch resultiert:

$$P_{step} = \sqrt{K * C * (U_1^2 - U_0^2)}$$

Mit dieser Gleichung kann ein möglicher Leistungssprung am Eingang berechnet werden., Tabelle 3 listet einige exemplarische Ergebnisse für sinnvolle Annahmen. Die Kondensatorgröße und – Spannung entsprechen denen im Philips Lampentreiber aus dem vorherigen Kapitel. Die Rampen sind geschätzt aus den Ergebnissen, die zu Bild 13 führen und die ursprüngliche Leistungen entsprechen Helligkeitspegeln, die in den vorherigen Experimenten genutzt wurden. Man erkennt, dass Leistungssprünge von 1,1% bis 1,9% mit einer geringen Wahrscheinlichkeit der Wahrnehmung verarbeitet werden können

Tabelle 3: Angenommene exemplarische Parameter für einen möglichen Eingangs-Leistungssprung

Kondensatorgröße C [F]	Zwischenkreisspannung U ₁ [V]	Oberes Spannungslimit U ₀ [V]	Unsichtb. LED-Leistungsrampe K [W/s]	Eingangsleistungssprung P _{step} [W]	Ursprg. Leistung P ₀ [W]	relative Eingangsleistungsänderung ΔP
22.0E-6	400	440	0.018	0.115	6	1.9%
22.0E-6	400	440	0.036	0.163	12	1.4%
22.0E-6	400	440	0.054	0.200	18	1.1%

Empirisches Experiment zur Wahrnehmung eines Leistungssprungs

Mit solch einem finalen Aufbau wurde ein Wahrnehmungsexperiment durchgeführt, bei dem die Lampenleistung entweder als Sprung oder als Rampe gesteuert wurde. Die Eingangsleistung und die LED-Leistung wurden entsprechend vier unterschiedlichen Experimenten (Bild 15) gesteuert. Details zum Aufbau werden in [14] beschrieben. In Test I wurde der Eingangsleistungssprung unmittelbar zum Lampen-Ausgang durchgeleitet. Eine hohe Wahrnehmung wird dabei erwartet. Im entsprechenden Test II wurde dieser Leistungssprung in einen rampenförmigen Helligkeitsverlauf umgewandelt. Das lässt eine deutlich geringere Wahrnehmung erwarten. In Test III wurde eine Helligkeitsrampe über einen weiteren Bereich angewendet. Hier wird eine mäßige Wahrnehmung erwartet. Im entsprechenden Test IV ist diese Rampe in zwei Teile geteilt, wobei der Teil bei geringerer Helligkeit eine reduzierte Rampe aufweist, während der Part bei höherer Helligkeit eine sogar verstärkte Rampe aufweist. Das sollte zu einer geringeren Wahrnehmung führen. Während des Experimentes wurden die Testpersonen gebeten, die Maustaste zu drücken, wenn eine Helligkeitsänderung wahrgenommen wird. Die Anzahl der Klicks bei einem Test zeigt damit an, wie wahrnehmbar die jeweilige Helligkeitsänderung ist.

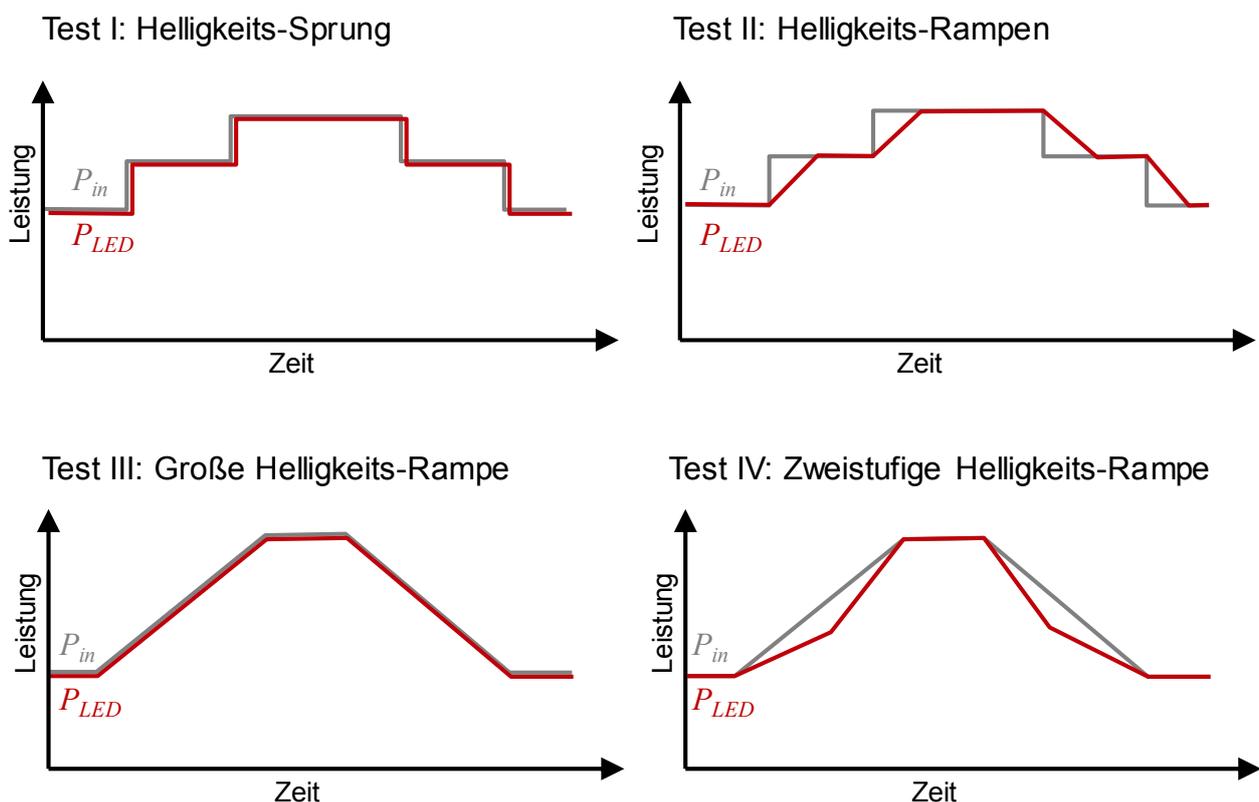


Bild 15: Übersicht über die Rampen-Wahrnehmungs-Experimente mit Lastsprüngen.

Die Ergebnisse sind in Bild 16 dargestellt. Wie erwartet, wird der Helligkeitssprung in Test I mit 28 Klicks sehr gut wahrgenommen. Die Glättung der Helligkeitsänderung im entsprechenden Test II zeigt eine signifikante Verringerung der Wahrnehmbarkeit auf nur noch 6 Klicks. Das zeigt, dass das Konzept der Verwendung des Zwischenkreiskondensators für die schnellen Leistungsänderungen funktionieren könnte. Der Vergleich von Test III und Test IV zeigt weiterhin, dass die Aufteilung der

Helligkeitsrampe in zwei Teile die Wahrnehmbarkeit weiter reduziert, denn in Test IV wurden nur 2 Klicks notiert (im Vergleich zu 7 Klicks für die ungeteilte Rampe in Test IV). Und gegenüber Test I ist sogar ein deutlich größerer Unterschied sichtbar, denn demgegenüber sind nur 7% der Klicks notiert worden.

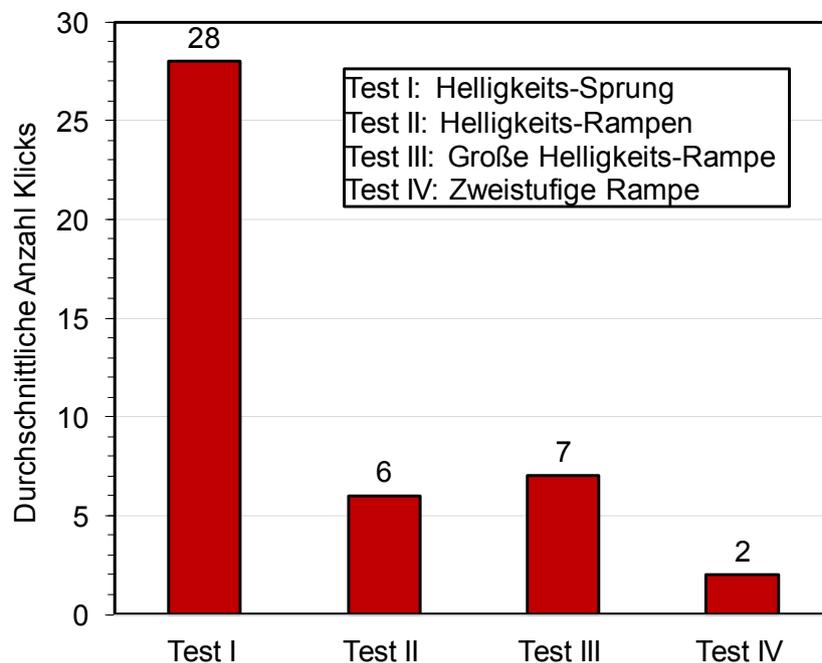


Bild 16: Ergebnisse über die Rampen-Wahrnehmungs-Experimente mit Lastsprüngen.

Zusammenfassung

Zusammenfassend wurde in diesem Beitrag ein Konzept vorgestellt, das die Nutzung einer LED-Lampe zur Netzregelung möglich macht. Es enthält die Nutzung eines Elektrolyt-Zwischenkreiskondensators um schnelle Leistungssprünge aufzunehmen, und beinhaltet weiterhin die Modulation der LED-Lampen-Helligkeit für langsame und länger andauernde Leistungsänderungen.

Das Konzept beinhaltet die Tatsache, dass langsame Helligkeitsänderungen durch Nutzer weniger wahrgenommen werden. Aufgrund von empirischen Experimenten mit Testpersonen kann eine Leistungsänderung von etwa 0,3%/s bezogen auf die aktuelle Leistung als wahrscheinliches Wahrnehmungslimit angenommen werden. Dies beinhaltet das Ergebnis, dass bei einer größeren Helligkeit eine schnellere Leistungsänderung toleriert werden kann. Als eine beispielhafte Schätzung kann ein Leistungssprung von etwa 1,1% bis 1,9% der ursprünglichen Leistung mit einem Leistungsanstieg, der eine geringe Wahrscheinlichkeit zur Wahrnehmung hat, aufgefangen werden. Damit besteht ein signifikantes Potential zur Nutzung bei einer Netzregelung.

Schließlich konnte ein Lampentreiber nach dem vorgeschlagenen Konzept realisiert und in einem empirischen Test mit Testpersonen getestet werden.

Danksagung

Diese Arbeit wurde unterstützt durch: Deutsche Akademische Austauschdienst (DAAD) e.V., PPP Hongkong, Projekt-ID 57216001.

Literatur

- [1] SMARD Energiedaten, available online (2.May.2018),
[https://www.smard.de/blueprint/servlet/page/home/marktdaten/78?marketDataAttributes={"resolution":"hour","region":"DE","from":1525125600000,"to":1525211100000,"moduleIds":\[5000410,1000103,1001226,1001225,1000100,1000102,1001228\]}&selectCategoryId=null&activeChart=true](https://www.smard.de/blueprint/servlet/page/home/marktdaten/78?marketDataAttributes={)
- [2] Bodo Giesler, Bruno Burger, "Erneuerbare Energien konkurrieren zunehmend mit Grundlastkraftwerken", Proceedings of the 2. Otti-Konferenz „zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien“, 27.-28.Jan. 2015, p. 52-57.
- [3] A.-C. Agricola, H. Seidl, S. Mischinger, et al., „dena-Studie Systemdienstleistungen 2030 - Sicherheit und Zuverlässigkeit einer Stromversorgung mit hohem Anteil erneuerbarer Energien“, Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Energiesysteme und Energiedienstleistungen, Berlin, Germany, Feb. 2014.
- [4] Eberhard Waffenschmidt, Ron S.Y. Hui, "Virtual inertia with PV inverters using DC-link capacitors", EPE'16 ECCE Europe - 18th European Conference on Power Electronics and Applications, 5.-9. Sep. 2016, Karlsruhe, Germany
- [5] Yong Chen, Ralf Hesse, Dirk Turschner, Hans-Peter Beck, "Improving the grid power quality using virtual synchronous machines", Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG 2011), 11.-13. May 2011, Malaga.
- [6] Visscher, K.; de Haan, S.W.H.; Virtual synchronous machines for frequency stabilisation in future grids with a significant share of decentralised generation, Proceedings of the CIRED SmartGrids conference; June 2008; Germany
- [7] Pedro Rodriguez, "Control of Grid-Interactive Power Converters: The Synchronous Power Controller", Presentation at ECPE-Workshop "Power Electronics in the Electrical Network", Kassel, Germany, 12. March 2013.
- [8] Eberhard Waffenschmidt, "Degrees of freedom for primary control with batteries", 11th International Renewable Energy Storage (IRES 2017), 14.-16.Mar.2017, Düsseldorf, Germany
- [9] Eberhard Waffenschmidt, "Primary control with batteries", 5th International Energy and Sustainability Conference 2016 (IESC 2016), Cologne, Germany, 30. Jun. – 1. Jul. 2016
- [10] Eberhard Waffenschmidt, "Virtual inertia grid control with LED lamp driver", 5th International Energy and Sustainability Conference 2016 (IESC 2016), Cologne, Germany, 30. Jun. – 1. Jul. 2016
- [11] "ENTSO-E Network Code for Requirements for Grid Connection Applicable to all Generators", ENTSO-E, 8 March 2013.
- [12] Eberhard Waffenschmidt, Andre Kores, Desiree Fuhs, Lee Chi Kwan, Liu Heng, "Grid control with LED lamps", 7th International Energy and Sustainability Conference 2018 (IESC 2018), Cologne, 17.-18. May 2018

- [13] "Halogenlampen", Online-Schulung, Stand 10/2005, downloaded 25. Apr. 2012 from www.philips.de/akademie, no longer available online.
- [14] Chi Kwan Lee, Heng Liu, Desiree Fuhs, Andre Kores, Eberhard Waffenschmidt, "Smart Lighting Systems as a Demand Response Solution for Future Smart Grids", Accepted for publication in Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, latest Version submitted 15.Nov.2018.