

Erstellung und Evaluierung eines synthetischen Haushaltslastprofilgenerators für Wirk- und Blindleistung

*Marco Wagler, Rolf Witzmann

Professur für elektrische Energieversorgungsnetze, TU München, Arcisstr. 21, 80333 München, +49.89.289.25090, marco.wagler@tum.de, www.een.ei.tum.de

Kurzfassung: In dieser Arbeit wird die Erstellung eines Lastprofilgenerators (LPGs) für Wirkleistung und Blindleistung einzelner Haushalte beschrieben. Des Weiteren werden die erstellten Profile mit real gemessenen Smart Meter Daten verglichen und Schlussfolgerungen zur Funktionalität und Richtigkeit des Lastprofilgenerators getroffen. Ein spezielles Augenmerk wird dabei auf das Verhalten der Blindleistung gelegt.

Keywords: Lastprofilgenerator, Haushaltslast, Blindleistung, $\cos\varphi$

1 Einleitung

Zur Nachbildung von Verbraucherlasten werden für die Netzplanung sowohl Wirk- als auch Blindleistungsprofile (P und Q) am Netzanschlusspunkt benötigt, um mit Hilfe von Lastflussrechnungen eine Aussage über das aktuelle Auslastungsmaß der Betriebsmittel treffen zu können. Zu diesem Zweck wurde bereits in den 80er Jahren das Standardlastprofil entwickelt [1], welches allerdings erst ab einer gewissen Anzahl an Haushalten Gültigkeit besitzt [2] und daher nicht für die Bewertung der Spannungsqualität einzelner Stränge herangezogen werden kann.

Mit Zunahme der Integration erneuerbarer Energien in die Verteilnetzebene wurden diverse Möglichkeiten zur Erstellung von realitätsnahen haushaltsscharfen Lastprofilen veröffentlicht, welche in ihrer Gesamtheit nach einem Top-down und Bottom-up Ansatz zu unterscheiden sind. Die Blindleistung wurde bisher größtenteils durch konstante $\cos\varphi$ Werte abgebildet, was nach [3] und [4] zu hohen Ungenauigkeiten führt. Eine verbesserte Möglichkeit zur Nachbildung der Blindleistung besteht in der Clusterbildung [5], bei der einem gewissen Wirkleistungsbereich ein bestimmter $\cos\varphi$ Wert zugeordnet ist. Darüber hinaus wird in [6] die Verwendung einer $\cos\varphi$ -Verteilungsfunktion in Abhängigkeit des Zeitpunktes und der jeweiligen Wirkleistung diskutiert. In dieser Arbeit wird die Erstellung eines Lastprofilgenerators nach dem Bottom-up Ansatz vorgestellt, der zur Bildung der synthetischen Haushaltsprofilverläufe real gemessene Wirk- und Blindleistungskurven von diversen Haushaltsgeräten verwendet. Auf diese Weise entsteht eine exakte und reale Zuordnung von Wirk- und Blindleistung, welche unabhängig von statistischen Annahmen zur Korrelation ist. Darüber hinaus werden in Kapitel 3 die erstellten Lastprofile mit real gemessenen Haushaltslastprofilen verglichen und die Richtigkeit des LPGs evaluiert.

2 Erstellung der synthetischen Lastprofile

Für die Erstellung der Haushaltslastprofile wird ein Bottom-Up Ansatz angelehnt an [7] verwendet, welcher im ersten Schritt haushaltsscharf die Wirk- und Blindleistungsverläufe verschiedener Verbrauchergeräte (Fernseher, Waschmaschine, Beleuchtung, Computer, Herd, Backofen, Mikrowelle, Wasserkocher, Kaffeemaschine, Gefriertruhe, Kühlschrank, Umwälzpumpe, Geschirrspüler, Warmwasserspeicher, Durchlauferhitzer und Wäschetrockner) modelliert und anschließend durch Überlagerung ein Haushaltssummenprofil für P und Q in 1-minütiger Auflösung ermittelt. Die Wahl dieses Ansatzes setzt Kenntnisse über folgende Daten voraus:

- Geräteausstattungsgrad der Haushalte
- Benutzungshäufigkeit der Geräte
- Einschaltzeitpunkt der Geräte
- Einschaltdauer der Geräte
- Wirk- und Blindleistungsbezug der Geräte

Für Informationen zum Ausstattungsgrad (Wie oft ist ein konkretes Gerät im Haushalt vorhanden?) und der Benutzungshäufigkeit (Wie oft wird ein konkretes Gerät innerhalb eines bestimmten Zeitraums genutzt?) wurde auf Daten aus der Literatur zurückgegriffen, die unter anderem in [8] und [9] publiziert sind. Falls ein Gerät im Haushalt sowohl vorhanden, als auch an dem zu untersuchenden Tag benutzt wird, ist der Einschaltzeitpunkt zu ermitteln. Hierfür wurden ebenfalls statistische Untersuchungen aus [10], [11] und [12] verwendet, welche gerätescharfe Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen unterteilt nach Jahreszeiten (Sommer, Winter und Übergangszeit) und Wochentag (Werktag, Samstag und Sonntag) zur Verfügung stellen. Mit Hilfe der kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktion und einer Zufallszahl Z_1 , kann der Einschaltzeitpunkt T_1 für das jeweilige Haushaltsgerät bestimmt werden. Abbildung 1 zeigt beispielhaft die Ermittlung des Einschaltzeitpunktes einer Waschmaschine an einem Werktag im Sommer. Für die Zufallszahl der Größe 0.5 ergibt sich aus dem Schnittpunkt mit der kumulierten Wahrscheinlichkeitsfunktion ein Einschaltzeitpunkt kurz vor 12:00 Uhr.

Zur Bestimmung der Betriebsdauer von Geräten, die abhängig vom Benutzerverhalten sind (z.B. bei Fernseher, Beleuchtung oder Computer), wurde ebenfalls auf Annahmen aus der Literatur zurückgegriffen ([9]). Für Geräte, bei denen der Benutzer einen geringen Einfluss auf die Dauer des Betriebsvorgangs hat (z.B. bei Waschmaschinen, Mikrowellen oder Geschirrspüler), wird die reale Dauer des jeweilig vermessenen Vorgangs verwendet.

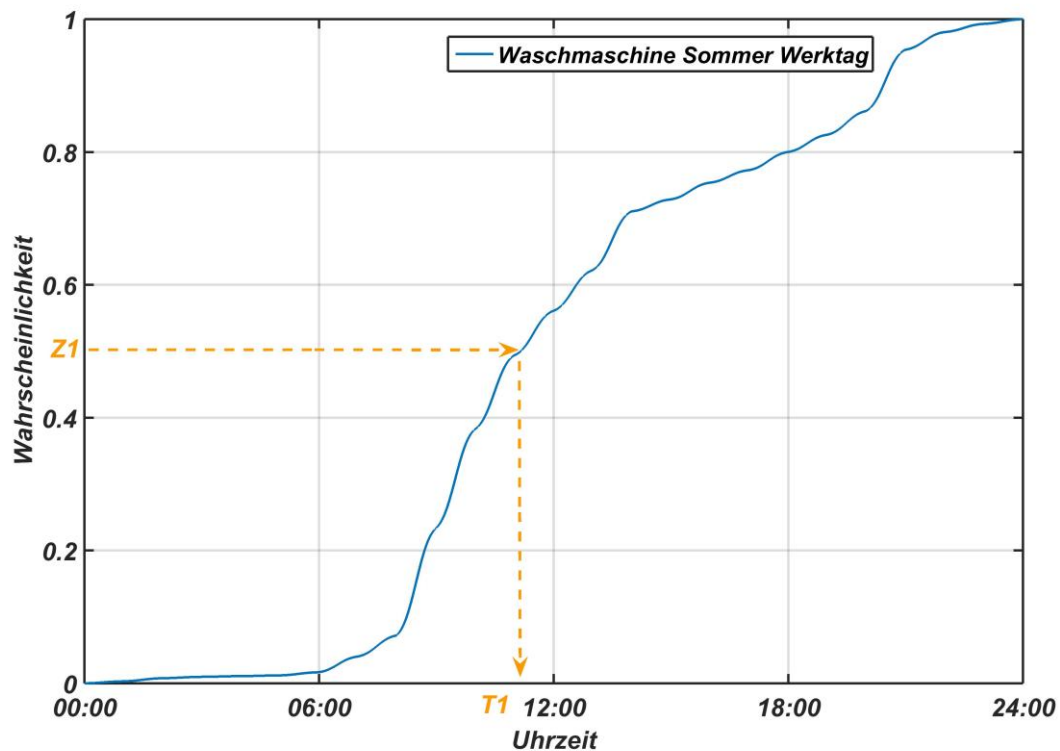


Abbildung 1: Ermittlung des Einschaltzeitpunktes am Beispiel einer Waschmaschine für einen Werktag im Sommer.

Mit Hilfe dieser Daten lassen sich für jeden Haushalt gerätescharfe Zustandsvektoren ermitteln, aus denen der Ein- und Aus-Zustand abgeleitet werden kann. Mit dem Ziel, Wirk- und Blindleistungsflüsse für jedes Gerät zu bestimmen, werden die Zustandsvektoren im Anschluss mit real vermessenen Geräteverläufen verknüpft. Dazu wird für jeden Hausanschluss im Vorfeld ein spezifischer Gerätepool ermittelt, der im Verlauf einer Simulation unverändert bleibt (keine Änderung des Gerätebesitzes während eines Jahres) und stochastische Abhängigkeiten vom Ausstattungsgrad aufweist.

Um eine ausreichende Streuung der Geräte sicherzustellen, wurde eine zweistellige Anzahl an vermessenen Geräten pro Kategorie angestrebt. Somit ist gewährleistet, dass in jeder Kategorie Geräte verschiedener Hersteller, verschiedener Technologien und verschiedenen Alters vertreten sind (beispielsweise wurden für die Kategorie Fernseher sowohl Röhrenfernseher als auch Plasma- und LED Fernseher von jeweils unterschiedlichen Herstellern vermessen) und somit nicht jedem Haushalt die gleichen Geräte zugewiesen werden. Das Summenprofil wird im letzten Schritt durch Überlagerung der einzelnen Geräteverläufe errechnet. Es soll hier noch darauf hingewiesen werden, dass die statistischen Daten zur Erstellung des LPGs auf Werte eines durchschnittlichen 2-Personen Haushalts aus Deutschland und Österreich beruhen. Eine direkte Übertragbarkeit auf andere Länder bzw. Haushalte mit einer deutlich erhöhten Anzahl an Bewohnern ist daher nicht ohne Weiteres gegeben.

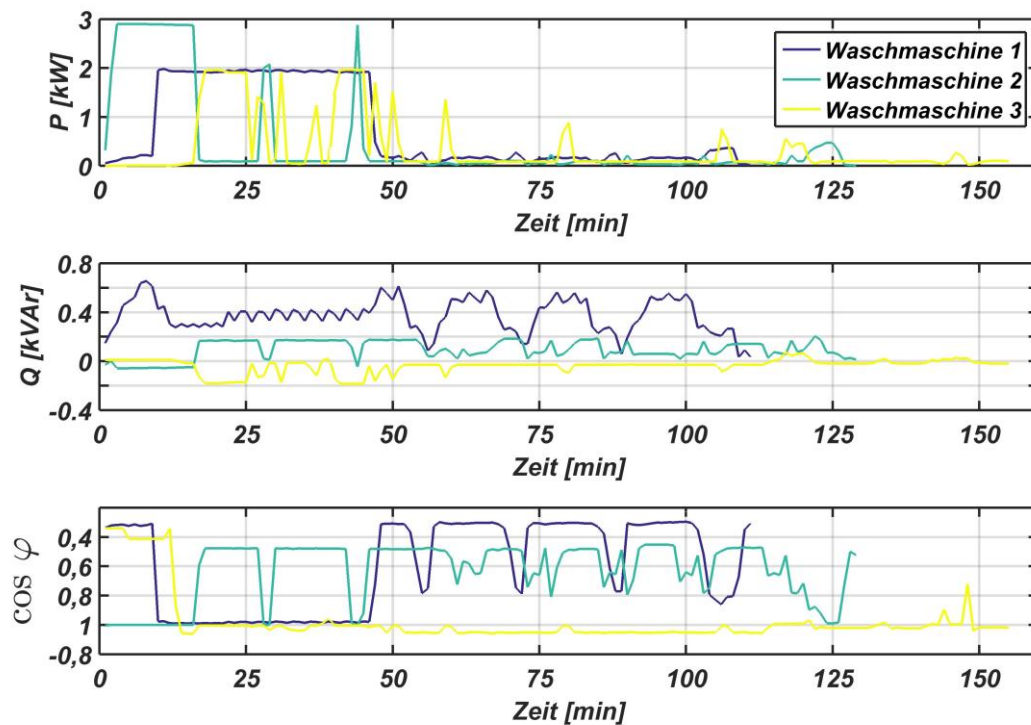


Abbildung 2: P,Q und $\cos\varphi$ -Verlauf von drei vermessenen Waschmaschinen, wobei positive Blindleistungswerte induktives Verhalten nachbilden und negative Werte kapazitives Verhalten repräsentieren.

In Abbildung 2 ist beispielhaft der Wirkleistungs-, Blindleistungs- und $\cos\varphi$ -Verlauf von drei vermessenen Waschmaschinen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass der Wirkleistungsbezug stark vom jeweiligen Waschmaschinentyp und dem aktuellen Waschprogramm abhängig ist. In Bezug auf die Blindleistung lässt sich feststellen, dass es sowohl Geräte mit induktivem, als auch mit kapazitivem Verhalten gibt, was auf die unterschiedlichen Motorausführungen der jeweiligen Maschinen zurückzuführen ist. Der stark schwankende Verlauf des $\cos\varphi$ -Wertes unterstreicht den methodischen Ansatz, die Blindleistung nicht durch einen konstanten $\cos\varphi$ Wert für jedes Gerät abzubilden.

Abbildung 3 zeigt das Summenprofil für Wirk- und Blindleistung (dargestellt durch den $\cos\varphi$ Wert) eines exemplarischen, mit dem Lastprofilgenerator erstellten Haushalts für eine Sommerwoche, wobei positive $\cos\varphi$ Werte analog zu Abbildung 2 und allen weiteren Graphiken induktives Verhalten repräsentieren und kapazitives Verhalten durch negative $\cos\varphi$ Werte dargestellt wird. In dieser Abbildung wurde das in 1-minütiger Auflösung zur Verfügung stehende Wirk- und Blindprofil auf zehn Minuten gemittelt. Die charakteristischen Spitzen beim Einschalten diverser Geräte sind im Wirkleistungsverlauf deutlich zu erkennen.

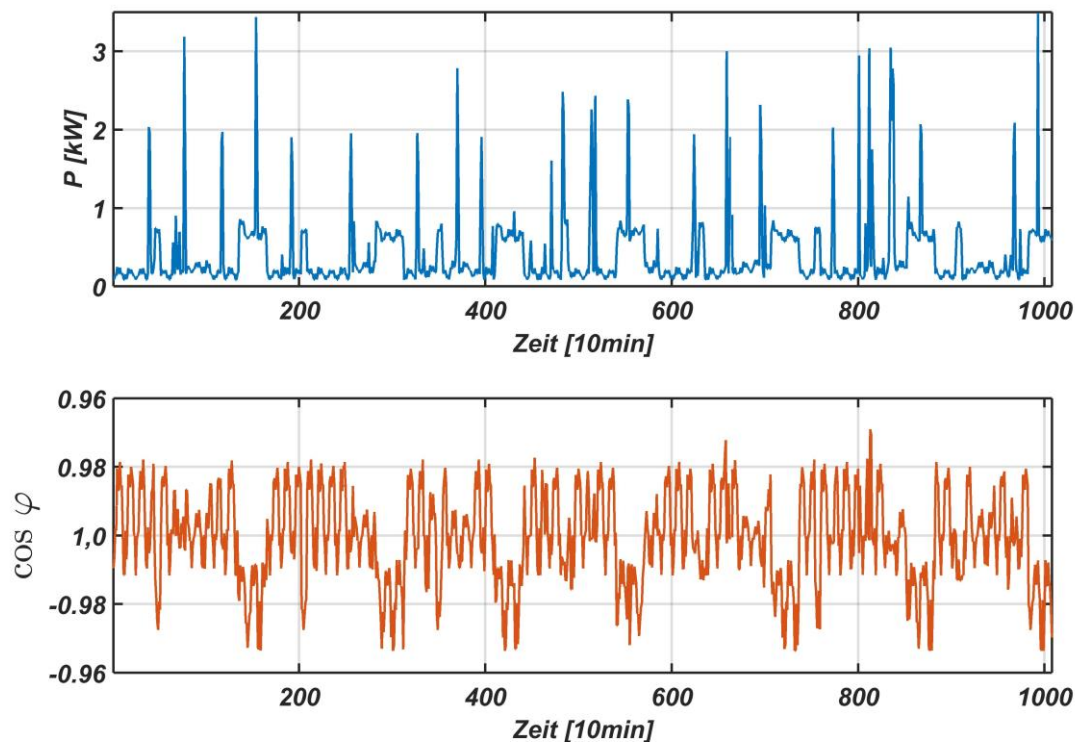


Abbildung 3: Wirkleistungsverlauf und $\cos\varphi$ -Verhalten eines exemplarischen Haushalts für eine Sommerwoche.

3 Evaluierung und Vergleich mit realen Profilen

Zur Evaluierung des Lastprofilgenerators wurden sowohl Vergleiche der Wirk- als auch der Blindleistung mit 115 real gemessenen Haushaltsprofilen aus dem Jahr 2012 durchgeführt, welche in 10-minütiger Auflösung erfasst wurden. Alle hier dargestellten Ergebnisse basieren auf Jahresprofilbetrachtungen. Es soll noch erwähnt werden, dass ausschließlich Zeitpunkte mit einer sehr hohen Verfügbarkeit (>90%) der Smart Meter Daten betrachtet werden.

3.1 Vergleich mit realen Wirkleistungsprofilen

Die Realitätsnähe des Lastprofilgenerators soll anhand der Parameter Gleichzeitigkeit und Rauigkeit des Summenprofils überprüft werden. Formel 1 definiert die Gleichzeitigkeit als die maximale Last des Summenprofils (P_{sum}) in Bezug auf die Summe der maximalen Lasten der einzelnen Profile (P_i).

$$\text{Gleichzeitigkeit} = 100\% \cdot \frac{\max(P_{sum})}{\sum \max(P_i)} \quad (1)$$

Da die Wahrscheinlichkeit eines gleichzeitigen Auftretens der maximalen Last sehr gering ist, weist Abbildung 4 einen abfallenden Verlauf für reale Profile auf. Ein ähnliches Verhalten lässt sich auch für den Lastprofilgenerator attestieren.

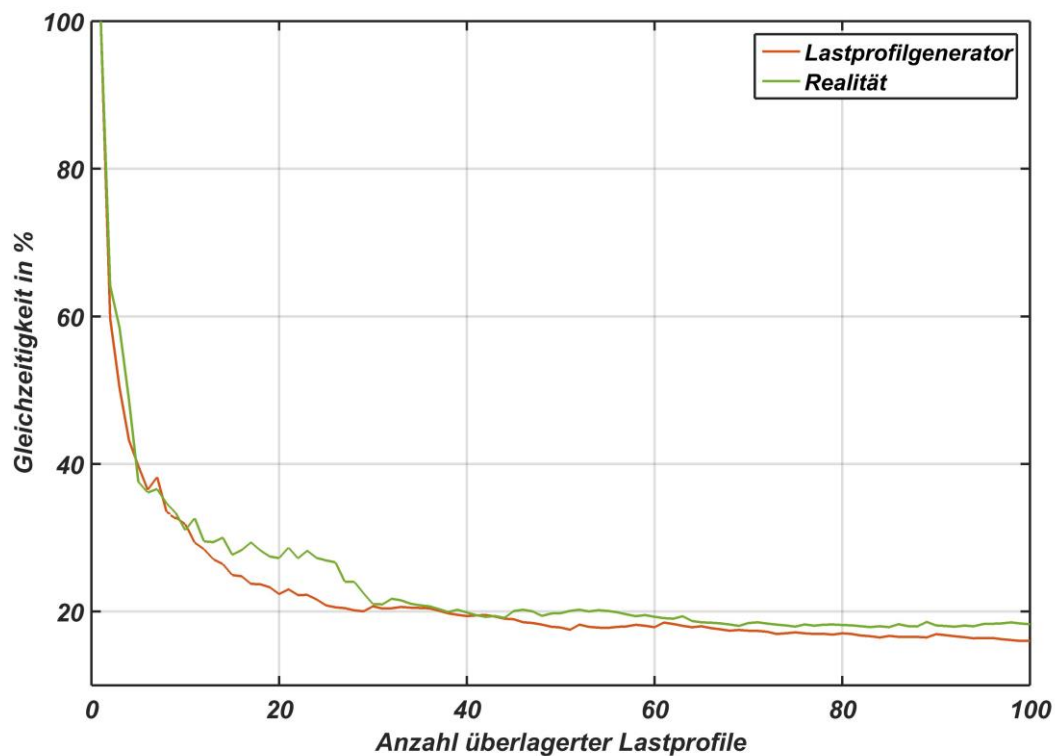


Abbildung 4: Gleichzeitigkeit der maximalen Last.

In Formel 2 wird die Rauigkeit als Differenz zweier aufeinanderfolgender Leistungswerte des Summenprofils in Bezug auf die maximal auftretende Last des Summenprofils definiert.

$$Rauhigkeit_i = 100\% \cdot \frac{P_{sum,i} - P_{sum,i-1}}{\max(P_{sum})} \quad (2)$$

Die Rauigkeit kann daher als ein Maß für die Glättung des Summenprofils verstanden werden. Bei einer Vielzahl an überlagerten Profilen sind die Sprünge zwischen zwei benachbarten Zeitpunkten relativ gering, was sich in einem glatten Profil und damit einer geringen Rauigkeit äußert. Abbildung 5 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Rauigkeit sowohl für das real gemessene, als auch für das mit dem Lastprofilgenerator erzeugte Summenprofil. Es ist erkennbar, dass sowohl für das reale, als auch für das LPG Profil maximale Werte von ca. $\pm 20\%$ auftreten, was bedeutet, dass die maximalen Sprünge zwischen zwei benachbarten 10-Minuten Werten einen Wert von $\pm 20\%$ der maximalen Leistung eines Jahres nicht überschreiten. Die Kurvenform ähnelt der einer Normalverteilung mit verschwindendem Mittelwert, was die obige Überlegung bezüglich der starken Glättung durch eine Vielzahl an überlagerten Profilen untermauert.

Sowohl der Verlauf der Gleichzeitigkeit, als auch die Verteilung der Rauigkeit weist eine hohe Ähnlichkeit zwischen realem Summenprofil und erzeugtem Summenprofil auf. Aus diesem Grund wird der Lastprofilgenerator als eine realitätsnahe Nachbildungsmöglichkeit der Hausanschlusslast verifiziert.

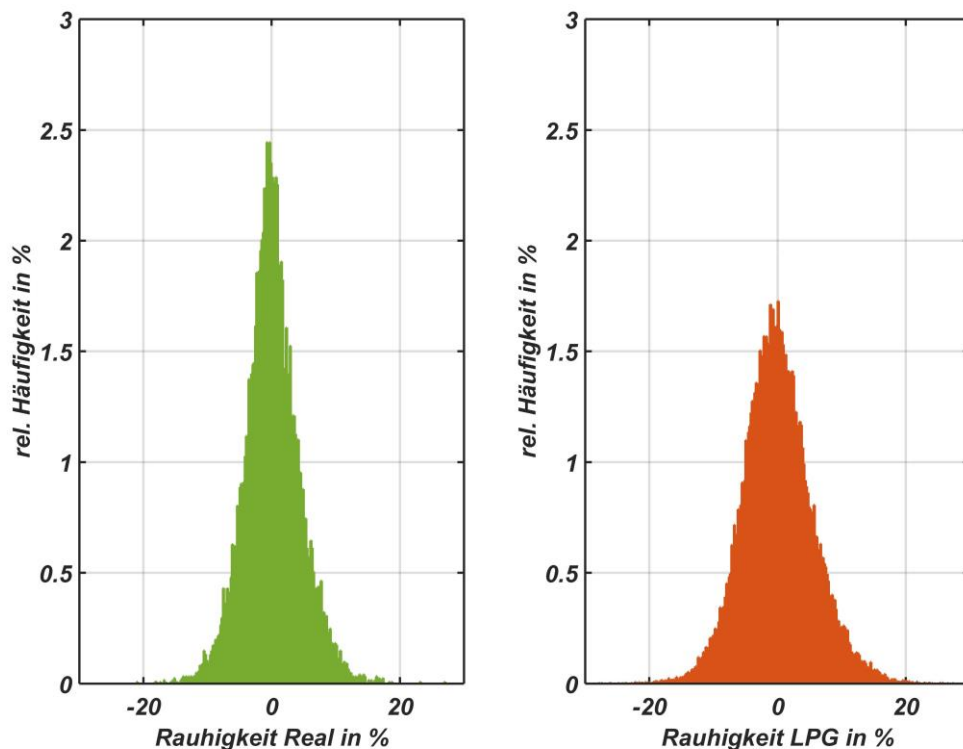


Abbildung 5: Häufigkeitsverteilung der Rauigkeit des Summenprofils.

3.2 Vergleich mit realen Blindleistungsprofilen

Neben dem Vergleich zwischen realen und erzeugten Wirkleistungsprofilen sollen auch die Blindleistungsprofile verglichen werden, allerdings unterscheidet sich die Erwartungshaltung bezüglich der Korrelation zwischen Realität und LPG maßgeblich von Abschnitt 3.1 und ist anders als in 3.1 keine zwingende Voraussetzung für den Zuspruch der Funktionalität des Lastprofilgenerators. Der Grund hierfür liegt darin, dass die Abhängigkeit des Blindleistungsflusses vom jeweiligen Gerät und damit vom exakten Aufbau des Geräts (verwendete Filter, etc.) deutlich größer ist, als die Abhängigkeit des Wirkleistungsverlaufs vom jeweiligen Gerät. Eine 10-minütige Mittelung der Wirkleistungsverläufe der Waschmaschinen aus Abbildung 2 ergibt näherungsweise ähnliche Verläufe. Würde man im Gegensatz dazu den Verlauf der Blindleistung in 10-minütiger Auflösung auftragen, sind nach wie vor große Differenzen erkennbar, die sich allein schon durch ein unterschiedliches Vorzeichen äußern. Noch deutlicher treten diese Zusammenhänge beispielsweise für die Verläufe eines Herdes hervor. Eine Aufgabenstellung, welche die Nachbildung einer konkreten Region in Bezug auf das Blindleistungsverhalten der Haushalte fordert, würde voraussetzen, dass der LPG exakt die gleichen Geräte benutzt, wie in dieser Region verwendet werden. Abbildung 6 zeigt beispielhaft für 11 Haushalte aus zwei verschiedenen Regionen das Blindleistungsverhalten in Bezug auf die Wirkleistung auf. Hierbei sind diverse Unterschiede erkennbar. In Region 2 kommt es für Wirkleistungen im Bereich 2-8 kW zu deutlich induktiven Blindleistungsflüssen, welche in Region 1 nicht vorhanden sind. Darüber hinaus treten in Region 2 kapazitive Blindleistungsflüsse für einen $\cos\varphi$ von -0.2 bis -0.4 bei

niedrigen Wirkleistungen auf, welche in Region 1 kaum vorhanden sind. Eine Untersuchung der Häufigkeitsverteilung der $\cos\varphi$ Werte zeigt außerdem in Region 2 ein vermehrtes Auftreten kapazitiver Blindleistungen, wohingegen in Region 1 öfter induktive Blindleistung bezogen wird. Es ist daher verständlich, dass der LPG nicht zwingend mit den realen Profilen (die sich regional stark unterscheiden) korrelieren muss, da er nicht die Region der vermessenen Profile abbildet, sondern eine fiktives Gebiet mit exakt den Geräten, welche im LPG vermessen wurden.

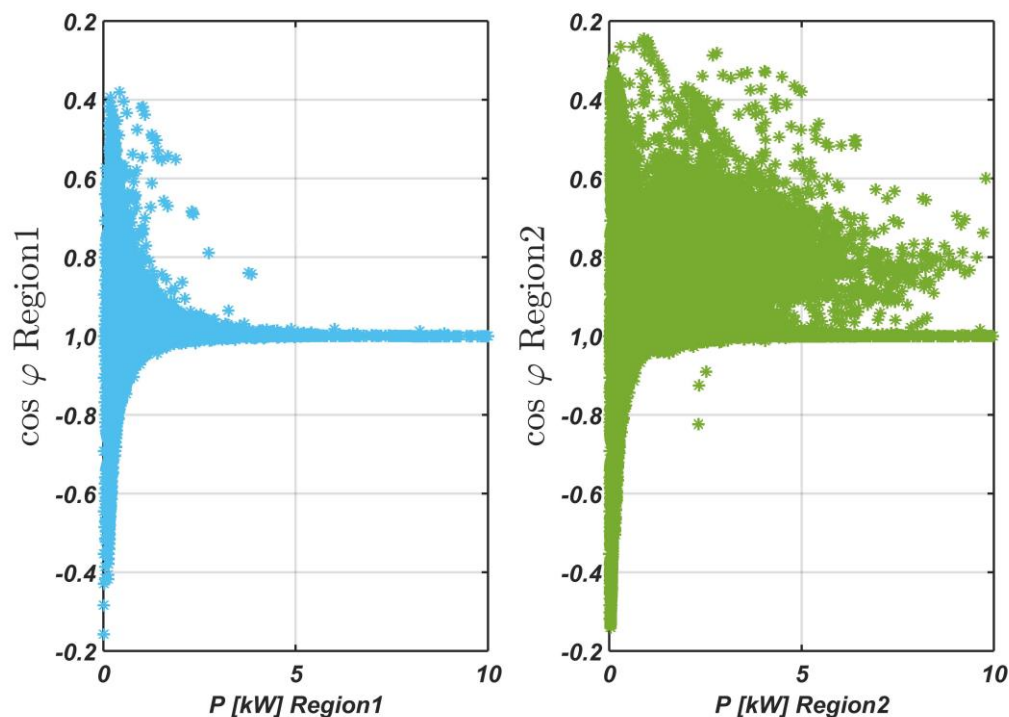


Abbildung 6: $\cos\varphi$ in Abhängigkeit von der Wirkleistung für zwei unterschiedliche Regionen und insgesamt jeweils elf Haushalte.

Abbildung 7 stellt auf der linken Seite die Häufigkeitsverteilung der $\cos\varphi$ Werte von allen 115 vermessenen Haushaltsprofilen zusammenfassend dar. Auf der rechten Seite ist die Verteilung für 115 mit dem LPG erstellter Profile sichtbar. Grundsätzlich weist die Kurvenform der Dichtefunktionen Ähnlichkeiten auf. In beiden Fällen treten sowohl kapazitive, als auch induktive Werte auf, wobei der Mittelwert in der Nähe von Eins liegt. Betrachtet man hingegen das Blindleistungssummenprofil, treten unverkennbare Unterschiede zutage. Wie aus Abbildung 8 ersichtlich, weist das LPG Summenprofil nach wie vor sowohl kapazitive als auch induktive Werte auf, wohingegen das Summenprofil der real gemessenen Haushalte nahezu ausschließlich induktive Werte aufzeigt. Dieser Sachverhalt führt zu der Vermutung, dass induktive $\cos\varphi$ Werte an höhere Wirkleistungen gekoppelt sind, als das bei kapazitiven $\cos\varphi$ Werten der Fall ist. Diese Vermutung wird durch Abbildung 9 bestätigt. Der rote Pfeil auf der linken Seite markiert die etwas höhere Dichte induktiver Leistungsfaktoren bei erhöhtem Wirkleistungsbezug. Zusätzlich illustriert der Teilausschnitt, dass die größten $\cos\varphi$ Dichten, welche in der Nähe von Eins auftreten, auf der induktiven Seite zu finden sind, da diese oberhalb der roten Grenzlinie liegen. Das

Blindleistungssummenprofil des LPG lässt hingegen bei kapazitiven Leistungsfaktoren eine erhöhte Dichte erkennen, welche mit einem roten Pfeil im rechten Bild markiert ist.

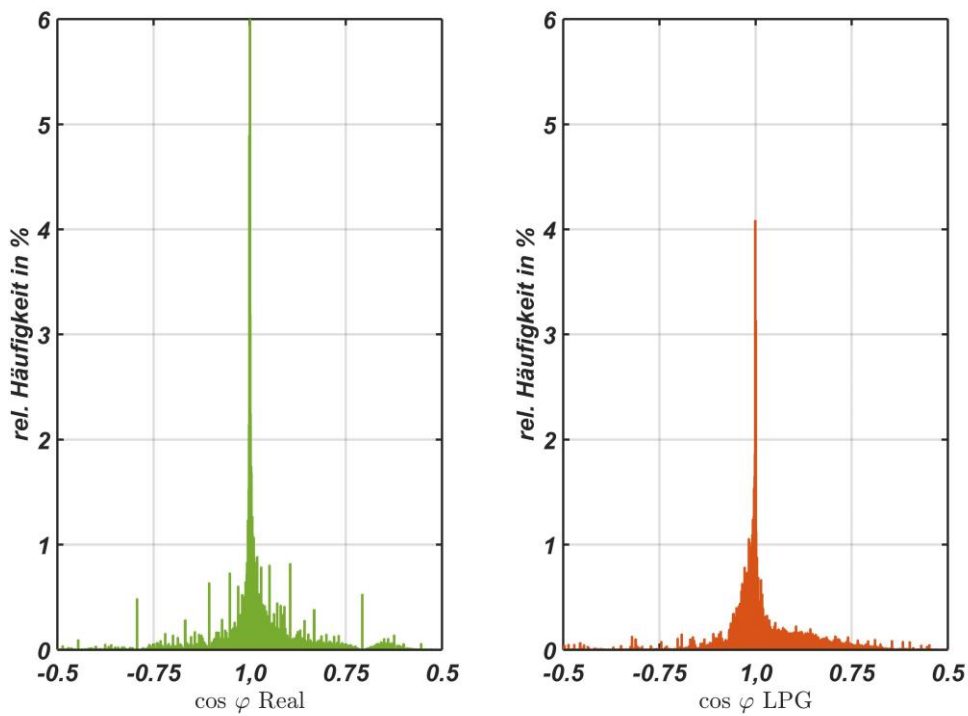


Abbildung 7: Häufigkeitsverteilung der $\cos\varphi$ Werte von 115 real vermessen (links) und 115 mit dem LPG erzeugten (rechts) Profilen.

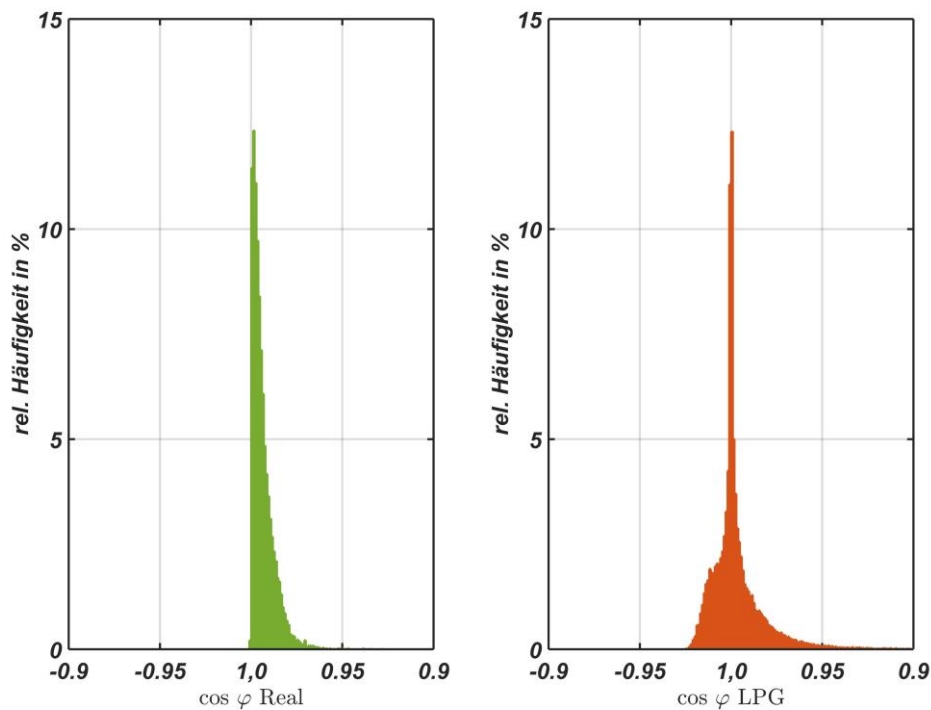


Abbildung 8: Häufigkeitsverteilung der $\cos\varphi$ Werte in Bezug auf das Summenprofil von 115 real gemessenen (links) und 115 mit dem LPG erzeugten (rechts) Haushalten.

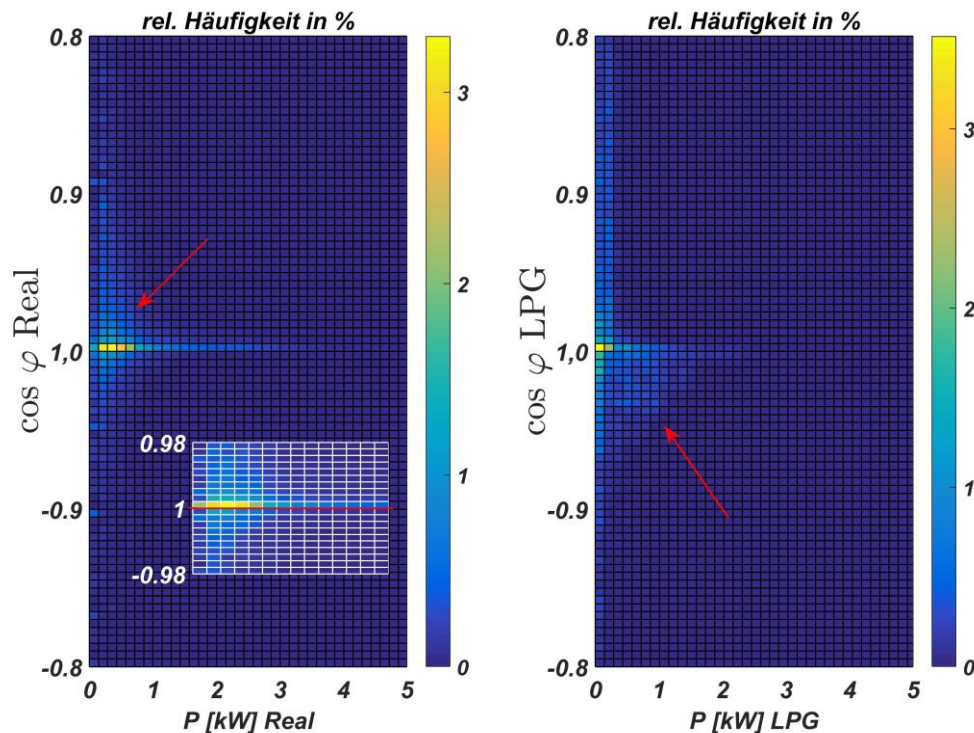


Abbildung 9: Häufigkeitsverteilung der $\cos\phi$ Werte von 115 real vermessen (links) und 115 mit dem LPG erzeugten (rechts) Profilen in Bezug auf die Wirkleistung.

4 Zusammenfassung

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde die Vorgehensweise zur Erstellung des synthetischen LPGs vorgestellt. Die Besonderheit im Vergleich zu bisher bekannten Methoden aus der Literatur liegt in der Verwendung eigens gemessener Verläufe für sowohl Wirk- als auch Blindleistung von einer Vielzahl an Geräten. Die Funktionalität und Richtigkeit des in dieser Arbeit erstellten Lastprofilgenerators wurde durch den Vergleich der Rauigkeit und der Gleichzeitigkeit der erstellten Wirkleistungsverläufe mit real gemessenen Smart Meter Daten verifiziert. Bezüglich des Blindleistungssummenprofils aller Haushalte wurden Unterschiede festgestellt. Während der LPG sowohl kapazitives, als auch induktives Verhalten der 115 überlagerten Profile nachbildet, wurden in dem vermessenen Gebiet nahezu ausschließlich induktive Werte im Summenprofil festgestellt. Diese Abweichung wurde dadurch begründet, dass die Höhe und das Vorzeichen der bezogenen Blindleistung deutlich größere Abhängigkeiten vom exakten Geräteaufbau aufweist, als das bei der Wirkleistung der Fall ist. Eine Korrelation kann daher nur zustande kommen, wenn im LPG die gleichen Geräte wie in der vermessenen Region hinterlegt sind. Da der LPG allerdings mit dem Ziel erstellt wurde, eine allgemeine, fiktive Region abzubilden, stellt die mäßige Korrelation im Blindleistungsverhalten zu der hier untersuchten speziellen Region kein Hindernis dar.

Des Weiteren erzeugt der LPG Profile für 2-Personen Haushalte, wohingegen die real gemessenen Profile durchaus auch Haushalte mit einer größeren Anzahl an Personen beinhalten. Für die Überprüfung der Gleichzeitigkeit und der Rauigkeit stellt dieser Umstand kein Problem dar, da hier immer auf die jeweilige Leistung normiert wird. Da diese Normierung bei der Blindleistung nicht gegeben ist, sind gewisse Abweichungen auch durchaus dadurch zu erklären. Eine Möglichkeit, den LPG noch weiter zu verbessern (und damit noch allgemeinere Aussagen hinsichtlich des Blindleistungsverhaltens der fiktiven Region zu erhalten), stellt die Integration weiterer Geräteverläufe dar.

5 Referenzen

- [1]: P. Dünwall, "Ermittlung der Lastganglinien bei der Benutzung elektrischer Energie durch die bundesdeutschen Haushalte während eines Jahres", VDEW, 1985.
- [2]: P. Esslinger, R. Witzmann, "Entwicklung und Verifikation eines stochastischen Verbraucherlastmodells für Haushalte", 12. Symposium Energieinnovation Graz , 2012.
- [3]: M. Wagler, R. Witzmann, "Untersuchung privater Haushalte hinsichtlich ihres Blindleistungsverhaltens", ew- Magazin für die Energiewirtschaft, 2014.
- [4]: F. Potratz, M. Cramer, "Analyse des Wirk- und Blindleistungsverhaltens von privaten Haushalten", Jahresbericht Institut für Hochspannungstechnik, RWTH Aachen, 2014.
- [5]: J. Scheffler, "Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten", Dissertation Universität Chemnitz, 2012.
- [6]: C. Bucher, "Analysis and Simulation of Distribution Grids With Photovoltaics", Dissertation ETH Zürich, 2014.
- [7]: G. Bärwald, M. Kurrat, "Auswirkungen von dynamischen Haushaltsstromtarifen auf der Basis stochastischer Haushaltslastprofile", 10. Symposium Energieinnovation Graz , 2008.
- [8]: Statistisches Bundesamt, "Einkommens- und Verbrauchsstichprobe / Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern", Destatis, Fachserie 15 Heft 1, 2013.
- [9]: B. Schlomann et al., "Energieverbrauch der privaten Haushalte und des Sektors Gewerbe, Handel, Dienstleistungen (GHD)", Abschlussbericht an das Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, 2004.
- [10]: S. Ghaemi, "Efficiency potential in private sector in ADRES", Dissertation Technische Universität Wien, 2011.
- [11]: F. Zeilinger, C. Groiss, A. Schuster, "Detaillierte Modellierung des Haushaltsstromverbrauchs zur Untersuchung von Demand Side Management", 13. Symposium Energieinnovation Graz , 2014.
- [12]: A. Einfalt et al., "Konzeptentwicklung für ADRES – Autonome Dezentrale Regenerative Energie Systeme", Endbericht , 2012.