

Interpretation und Relevanz verschiedener Blindleistungsarten für die Modellierung von Niederspannungsnetzen in der Netzplanung

B.Eng. Andreas Berling, M.Sc. Matthias Haslbeck, Prof. Dr.-Ing Oliver Brückl,
OTH Regensburg, Forschungsstelle für Energienetze und Energiespeicher (FENES)
Seybothstraße 2, 93053 Regensburg
Tel.: +49 941 943-9893
E-Mail: andreas3.berling@st.oth-regensburg.de
Internet: www.oth-regensburg.de, www.fenes.net

1 Einleitung

Das vom BMWi geförderte Forschungsprojekt *SyNErgie* (03/2015 bis 05/2018) beschäftigt sich mit der Weiterentwicklung von Netzplanungsprozessen [1]. Im Fokus steht dabei die Modellierung von Blindleistungsflüssen und die dezentrale Nutzung von Blindleistungsquellen (z. B. Erzeugungsanlagen, Drosselpulen, Kondensatoren) in Mittelspannungsnetzen, über welche der Blindleistungshaushalt letztendlich beeinflusst werden soll. Zur Modellierung der Mittelspannungsebene werden die angeschlossenen Niederspannungsnetze als Ersatzlasten nachgebildet. Die Ersatzlasten werden i. d. R. von Haushaltsanschlüssen dominiert und mit Standardlastprofilen (SLPs) nachgebildet. Um das Blind- und Wirkleistungsverhalten von Haushalten genauer zu modellieren und die Anwendung der SLPs in der Modellierung zu verifizieren, werden Haushaltskollektive innerhalb des Netzgebietes des Projektpartners Main-Donau-Netzgesellschaft (MDN) langfristig gemessen und ausgewertet.

Im Rahmen dieses Beitrags wird zunächst genauer auf die Definition der Blindleistungsarten und die durchgeführte Messkampagne eingegangen. Darauf aufbauend werden die aktuellen Ergebnisse der Untersuchungen zur Nachbildung von Haushaltskollektiven vorgestellt und Rückschlüsse für die Netzplanung gezogen. Abschließend wird der Beitrag kurz zusammengefasst und ein Ausblick auf weitere geplante Untersuchungen gegeben.

2 Beschreibung der Blindleistungsarten und der Messkampagne

Vor der Bewertung der Relevanz der verschiedenen Blindleistungsarten sollen deren Definitionen erläutert werden. Die Ziel- und Umsetzung der Messkampagne, sowie die Aufbereitung der Messgrößen ist Bestandteil des zweiten Abschnitts.

2.1 Interpretation bzw. Definition der Blindleistungsarten

Leistungsbegriffe wie Schein-, Wirk- und Blindleistung sind Rechengrößen, welche den Definitionen in [2] unterliegen. Im Fokus steht das Produkt von Spannung und Strom, welches als zeitlicher Verlauf der Leistung bezeichnet wird. Dieses kann in einen Wirkleis-

tungs- und Blindleistungsanteil zerlegt werden, wobei der Blindanteil keinen Beitrag zum arithmetischen Mittel und somit keinen Beitrag zur Wirkarbeit liefert. Mathematisch ausgedrückt ist dies der Fall, wenn orthogonale Funktionen von Spannung und Strom zusammentreffen. Der Blindanteil kann weiter mathematisch differenziert werden, was in der Regel ursachenbezogen erfolgt.

Die Verschiebungsblindleistung Q_V ergibt sich anhand der Spannungsgrundschiwingung („50-Hz-Schwingung“) und einer orthogonalen Stromkomponente (90° verschobener Strom), welche i. d. R. durch den Auf- und Abbau elektrischer und magnetischer Felder entsteht. Sind Strom- und/oder Spannungsverlauf nicht sinusförmig, erfolgt durch Zerlegung mittels Fourieranalyse eine Aufspaltung in verschiedene Strom- und Spannungsanteile, über welche weitere Blindleistungsarten definiert sind. Strom- und Spannungsharmonische ungleicher Frequenz bilden die Oberschwingungsblindleistung Q_O und Harmonische gleicher Frequenz die Verschiebungsblindleistung der Harmonischen Q_h . Für die Modulationsblindleistung Q_M sind i. d. R. Verbraucher mit stark fluktuierender Leistungsaufnahme verantwortlich, was sich durch sub- (<50 Hz) und interharmonische¹ Anteile bemerkbar macht, welche diese Blindleistungsart beschreiben. Q_O , Q_h und Q_M können zur Vereinfachung auch zusammengefasst² werden und bilden die gebräuchlichere Verzerrungsblindleistung D .

Alle bisher genannten Blindleistungsarten können phasenscharf beschrieben und zur totalen Phasenblindleistung Q_T zusammengefasst werden. Bei Mehrleiternetzen kann zusätzlich eine Unsymmetrieblindleistung Q_U ausgewiesen werden. Sie entsteht bei der bilanziellen Betrachtung über alle Leiter hinweg und ist ein Maß für die auftretende Unsymmetrie. Sie ist somit eine Kenngröße für die Effizienz des Leistungstransports in einem Mehrleiternetz.

2.2 Messkampagne

Die in den folgenden Kapiteln diskutierte Datenbasis wird mit eigenen Messungen generiert und konzentriert sich auf ländliche NS-Netz-Bereiche. Im Vordergrund steht die Messung des Wirk- und Blindleistungsverhaltens kleinerer Haushaltskollektive ohne Erzeugungsanlagen.

Basierend auf dieser Zielsetzung wurden 13 Netzbereiche in vier Ortschaften der MDN ausgewählt. Davon spiegeln zwei Orte den Charakter einer vorstädtischen Wohnsiedlung wieder. Eine weitere Ortschaft bildet den Marktkern einer Gemeinde und der vierte ausgewählte Bereich hat einen dörflichen Charakter. Mit Unterstützung der MDN wurden die von der OTH bereitgestellten Messgeräte sowohl an NS-Abgänge von Ortsnetzstationen als auch in Kabelverteilerschränken installiert. Diese erfassen für die Laufzeit von ca. 14 Monate die Leistungsaufnahme der Haushaltskollektive inklusive der sie versorgenden NS-Leitungen in 1-Minuten-Auflösung. Der Einfluss der NS-Leitungen wird im Projekt Sy-

¹ Keine ganzzahligen Vielfachen der Grundschiwingung.

² Die Einzelwerte müssen dabei geometrisch addiert werden.

NErgie mittels Simulation unter Zuhilfenahme der Kollektivmessungen separat betrachtet und ist nicht Bestandteil dieses Beitrags.

In Summe werden 146 Hausanschlüsse mit insgesamt 213 Haushalten erfasst. Als Grundlage für diesen Beitrag werden Messdaten der ersten 8 Monate verwendet. Als Messgerät kommt der *Leistungs- und Energielogger 102* (PEL) von *Chauvin Arnoux* zum Einsatz. Die Berechnung der totalen Blindleistung Q_T erfolgt in diesem Instrument über den geometrischen Zusammenhang von Wirk- und Scheinleistung. Q_T besteht folglich auch aus einem nicht sinusförmigen Anteil und enthält auch Beiträge von Frequenzen abweichend von der Grundschwingung. Im Projekt *SyNErgie* steht die Verschiebungsblindleistung der Grundfrequenz im Fokus, weshalb Formel (1) entwickelt³ wurde, um auf Basis der PEL-Daten

$$Q_V = \text{sign}(Q_T) * \frac{I_{rms}}{\sqrt{1 - THD_i^2}} * \frac{V_{rms}}{\sqrt{1 - THD_v^2}} * \sin(\varphi) \quad \text{Formel (1)}$$

diese zu berechnen.

Zur Ermittlung der Grundschwingungsscheinleistung S_{H1} werden in Formel (1) die Effektivwerte von Strom I_{rms} und Phasenspannung V_{rms} und deren totale Verzerrungsgrade THD verwendet. Mit Hilfe des Phasenwinkels φ wird der Anteil der Verschiebungsblindleistung Q_V an S_{H1} bestimmt. Kapazitive und induktive Arbeitspunkte werden über das Vorzeichen der Gesamtblindleistung $\text{sign}(Q_T)$ unterschieden.

Die quadratische Differenz aus Q_T und Q_V wird als Verzerrung D definiert. Die kollektive Scheinleistung S_{kol} und darauf aufbauend die Unsymmetrieblindleistung Q_U kann auf Basis der PEL-Daten, wie in [3] dargelegt, berechnet werden.

3 Diskussion der Auswertungsergebnisse

In diesem Kapitel werden die ersten Ergebnisse aus der Messkampagne vorgestellt. Der erste Teil behandelt dabei die Anteile der verschiedenen Leistungsarten an der kollektiven Scheinleistung S_{kol} . Im zweiten Abschnitt werden die Messdaten mit aktuell gängigen Planungsparameter verglichen und diskutiert.

3.1 Anteile der Leistungsarten an der Gesamtleistung

Zur Beurteilung der Relevanz der verschiedenen Leistungsarten soll hier ermittelt werden, welchen größenmäßigen Anteil die einzelnen Arten an der kollektiven Scheinleistung S_{kol} haben. Die kollektive Scheinleistung wird als Referenzgröße verwendet, da sie nach der Definition in [3] alle Wirk- und Blindleistungskomponenten enthält. Exemplarisch für diese Untersuchung steht **Abbildung 1**, in der die Referenzgröße mit drei weiteren Leistungen verglichen wird. Die Daten zeigen das größte direkt gemessene Haushaltskollektiv aus einem vorstädtischen Bereich. Für diesen Netzbereich stehen zusätzliche Messdaten ei-

³ Eine Evaluierung der Formel über Referenzmessungen mit anderen Messgeräten wurde durchgeführt.

ner Testmessung zur Verfügung, die vom 08. Oktober 2015 bis zum 23. Februar 2016 durchgeführt wurde. Folglich ist in dieser Messreihe auch ein Zeitbereich im Winter miteffasst.

Die Wirkleistung P wird über die Summe der Wirkleistungen über die drei Phasen gebildet und hat, wie Abbildung 1 verdeutlicht, zu allen Zeiten den größten Anteil an S_{kol} . Dabei steigt er von rund 80 % in Schwachlastzeiten bis auf über 95 % im Starklastfall. Die Scheinleistung S_{H1} beinhaltet alle Anteile der ersten Harmonischen (H1) und wird über Summe der drei Phasen berechnet. Sie verläuft nahezu parallel zur Wirkleistung. Der Unterschied zwischen beiden Größen wird primär durch die Verschiebungsblindleistung Q_V verursacht und lässt auf einen bei Starklast sinkenden Anteil von Q_V schließen, da sich die Linien annähern. Die additive Scheinleistung S_{add} wird i. d. R. als Gesamtscheinleistung bezeichnet und enthält alle Leistungsanteile, die phasenscharf ermittelt werden können. Die Berechnung erfolgt über die Addition der Produkte von Effektivstrom und Effektivspannung über die drei Phasen. So besteht sie neben den Grundschwingungsanteilen auch aus der Verzerrungsblindleistung D . Weiterführende Untersuchungen ergeben für D einen absoluten Wert zwischen 90 und 120 VAR pro Haushalt und ein nahezu konstantes Verhalten über der Tageszeit mit einer leichten abendlichen Erhöhung. S_{add} und S_{kol} nähern sich in Richtung der Spitzenlast deutlichen an. Der Unterschied der beiden Größen wird durch die Unsymmetrieblindleistung Q_U erzeugt. Wie erwartet treten große Werte von Q_U bei Schwachlast auf, da sich hier die unsymmetrische Netzlast deutlicher bemerkbar macht als bei Starklast, bei der es zu Ausgleichseffekten zwischen mehreren Haushalten kommt.

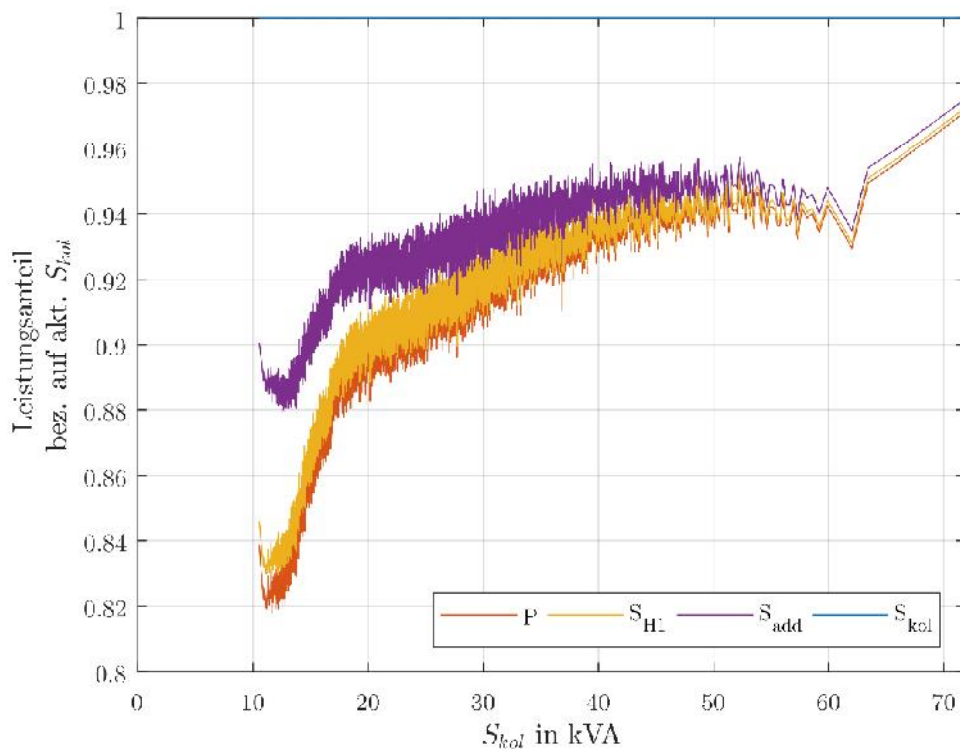


Abbildung 1: Anteile der Leistungsarten bezogen auf die aktuelle kollektive Scheinleistung aus Messdaten aus einem vorstädtischen Kollektiv mit 79 Haushalten im Messzeitraum von 16. März 2017 bis 8. November 2017 und von 08. Oktober 2015 bis 23. Februar 2016

3.2 Vergleich der Messdaten mit gängigen Planungsparametern

Bei der Nachbildung von Mittelspannungsnetzen müssen Annahmen für das Verhalten untergelagerter Niederspannungsnetze getroffen werden. Das Wirkleistungsverhalten wird i. d. R. über skalierte Standardlastprofile beschrieben. Die Verschiebungsblindleistung wird meist nicht oder mit statischem $\cos\varphi$ hinterlegt und ist somit deutlich von der Nachbildung der Wirkleistung abhängig. Andere Blindleistungsarten werden i.d.R. nicht berücksichtigt. **Abbildung 2** zeigt den Vergleich des mittleren Wirkleistungsverlaufs über alle gemessenen Haushalte mit dem Standardlastprofil für H0 an Werktagen im Sommer. Dabei wird, wie bei der Modellierung üblich, das Standardlastprofil mit dem Jahresenergieverbrauch (JEV) des Vorjahres der gemessenen Haushalte skaliert. Die Verläufe in **Abbildung 2** legen nahe, dass bei Verwendung des Standardlastprofils die Leistung der Haushalte zu den meisten Zeitpunkten überschätzt wird. Die Grundlast in der Nacht zwischen 00:00 Uhr und 4:00 Uhr wird leicht unterschätzt. Ob sich die Überschätzung auch auf die Winterzeit bezieht oder auch sich hier ein gegenteiliges Bild darstellt kann erst nach der Auswertung weitere Daten evaluiert werden.

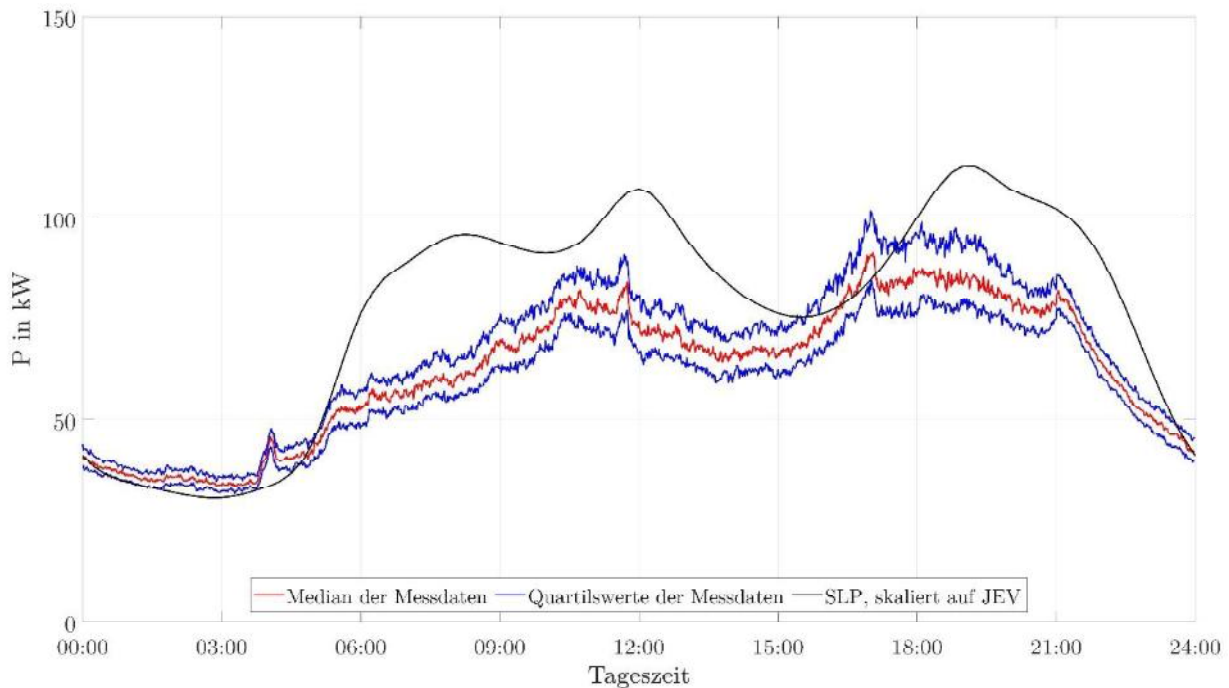


Abbildung 2: Vergleich des Wirkleistungslastgangs des Gesamtkollektivs mit 213 Haushalten in Perzentil-Darstellung der Messdaten mit den Standardlastprofilen des BDEW, skaliert auf den Jahresenergieverbrauch JEV, an Sommer-Werktagen zwischen 2. Juni 2017 und 14. September 2017

In der Niederspannungsanschlussverordnung (NAV) legt das BMWi den Grenzwert des zulässigen Verschiebungsfaktors für Verbraucher mit Anschluss in der NS-Ebene zwischen $0,9_{\text{ind}}$ und $0,9_{\text{kap}}$ fest [4]. Der induktive Grenzwert wird i. d. R. für Haushalt bei der Simulation von Mittelspannungsnetzen statisch verwendet. Typische induktive und kapazitive $\cos\varphi$ -Werte bei den Messungen liegen zwischen 0,98 und 1,00 und werden in **Abbildung 3** dargestellt. Damit liegen sie deutlich über den Grenzwerten der NAV. Weiter ist zu beachten, dass die Werte bei Schwachlast kapazitiv und bei Starklast induktiv sind, was heute meist nicht berücksichtigt wird.

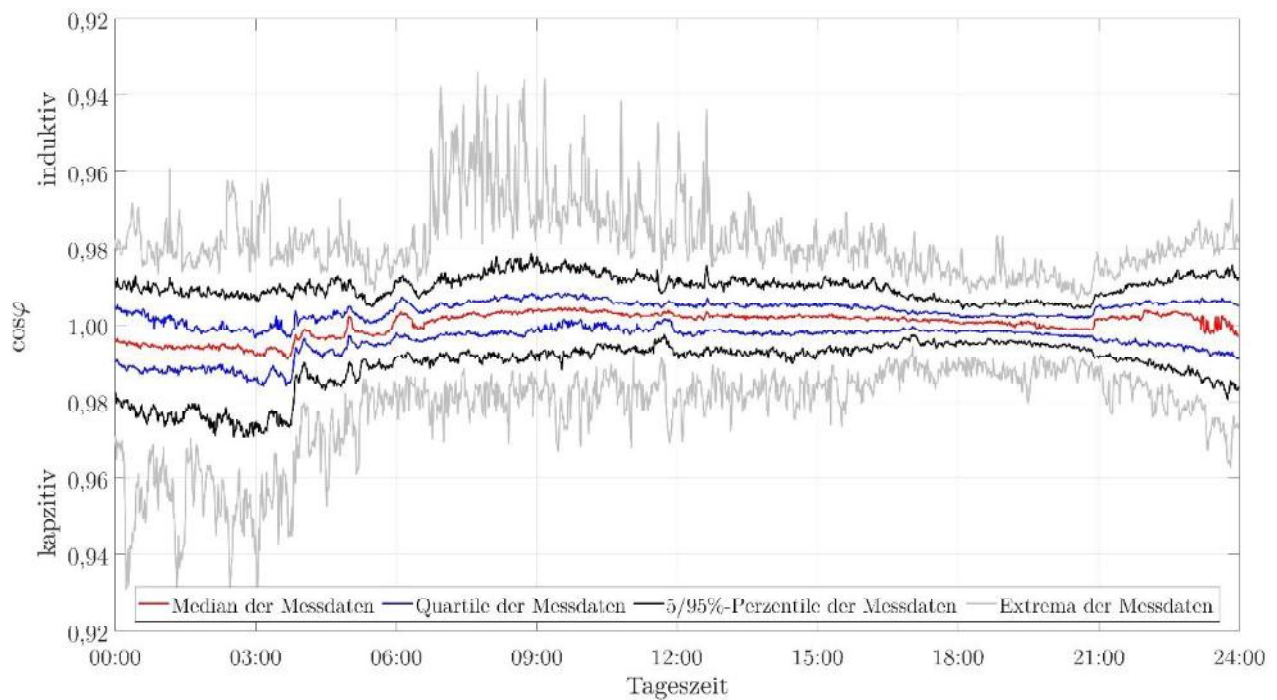


Abbildung 3: Perzentil-Darstellung des Verschiebungsfaktors im Tagesverlauf aus Messdaten aus einem vorstädtischen Kollektiv mit 79 Haushalten im Messzeitraum von 16. März 2017 bis 8. November 2017 und von 08. Oktober 2015 bis 23. Februar 2016

4 Rückschlüsse für Netzmodellierung und Netzplanung

Für die korrekte Nachbildung von Mittelspannungsnetzen in ihrem Blindleistungsverhalten ist der Beitrag der Niederspannungsnetze trotz der hohen $\cos\phi$ -Werte (nahe 1) noch signifikant. Selbst ein $\cos\phi$ von 0,995, welcher bei Starklast nicht untypisch ist, entspricht einem Q/P-Verhältnis von ca. 10 %. In einem von SyNErgie untersuchten Mittelspannungsnetz beziehen die Niederspannungsnetze in Summe eine maximale Wirkleistung von 5 MW und haben dabei nach obiger Annahme eine induktive Blindleistungsaufnahme von ca. 0,5 MVar. Der maximale induktive Blindleistungsbedarf des gesamten Mittelspannungsnetzes im Lastfall liegt bei etwa 2 MVar und ist somit signifikant von den Niederspannungsnetzen beeinflusst, weshalb deren Blindleistungsverhalten berücksichtigt werden sollte. Das messtechnisch ermittelte $\cos\phi$ -Verhalten der Haushalte im Netzmodell sieht nun einen Wechsel von $0,995_{\text{kap}}$ nachts zu $0,995_{\text{ind}}$ tagsüber vor.

Bezogen auf die thermische Auslegung von Betriebsmitteln kann festgehalten werden, dass bei Betrachtung von Haushalten selbst bei Starklast die Blindleistung nur eine geringe Scheinleistungserhöhung verursacht und somit eine wirkleistungsdominierte Betrachtung ausreicht (die Spannungshaltung ist hierbei nicht berücksichtigt). Dies gilt besonders für die Verzerrungsblindleistung D, welche im Rahmen der Messungen von SyNErgie nur einen sehr geringen Anteil einnimmt.

Für die Auslegung der Netzbetriebsmittel sind die zu erwartenden Scheinleistungsmaxima in den einzelnen Phasen relevant. Trotzdem werden vorwiegend symmetrische Untersu-

chungen angestellt. Um einen Anhaltswert für Sicherheitsmargen für die symmetrische Betrachtung zu liefern, wird der Asymmetriefaktor A nach Formel (2) definiert.

$$A_S = \frac{S_{max}}{\frac{1}{3}(S_1 + S_2 + S_3)} \quad \text{Formel (2)}$$

Dabei wird die maximale auftretende Phasenscheinleistung S_{max} in Bezug gesetzt zur mittleren Phasenscheinleistung. Folglich ergibt sich A_S bei absoluter Symmetrie zu 1 und kann einen Maximalwert von 3 erreichen. **Abbildung 4** zeigt die Anwendung auf das Haushaltskollektiv aus den vorherigen Betrachtungen. Es legt nahe, dass bei Schwachlast ein höherer Asymmetriefaktor zwischen 1,1 und 1,2 zu erwarten ist. Auch kommen Arbeitspunkte des Niederspannungsnetzes bei 40 % der maximalen Scheinleistung vor, bei denen der Asymmetriefaktor einen Wert von 2 übersteigt. Hier ergibt sich eine ähnliche Belastung einer einzelnen Phase wie beim maximalen Leistungsbezug. Bei dem kleinsten Kollektiv mit zwei Haushalten ergeben sich sogar Asymmetriefaktoren von über 2,8.

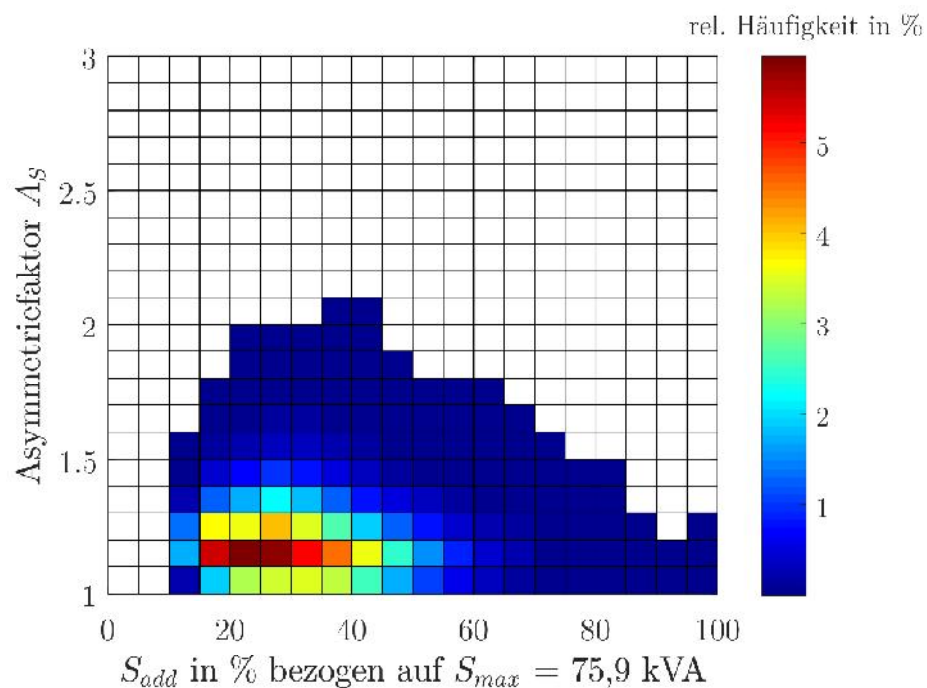


Abbildung 4: Darstellung der relativen Wahrscheinlichkeiten des Asymmetriefaktors A_S berechnet aus Messdaten aus einem vorstädtischen Kollektiv mit 79 Haushalten im Messzeitraum von 16. März 2017 bis 8. November 2017 und von 08. Oktober 2015 bis 23. Februar 2016

Zur Veranschaulichung der Interpretation der Ergebnisse soll abschließend ein kurzes Beispiel diskutiert werden:

Zu prüfen ist die Auslastung eines MS/NS-Transformators. Dessen maximale Belastung wurde über eine Messung von S_{add} zu $\frac{S_{add}}{S_r} = 100\%$ bestimmt, was eine symmetrische Belastung der Phasen mit je 100 % unterstellt. Der ermittelte Asymmetriefaktor für das zu versorgende NS-Netz liegt bei 1,2 und gibt damit an, dass die Belastung der Phase um

20 % höher liegt als der Wert, der bei Symmetrie erwartet wird. In diesem Beispiel würde man eine Transformatorphase mit 120 % belasten, obwohl der Maximalwert von S_{add} bei der Bemessungsleistung S_r liegt. Bei Auslegungen im Bereich der Bemessungsleistung hat dies entscheidenden Einfluss auf die sich einstellende Heißpunkttemperatur der Wicklung (Gefahr von Gasbildung) und Alterung der Wicklungsisolierung.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojektes SyNErgie wird eine umfangreiche Messkampagne zur Bewertung des Wirk- und Blindleistungsverhaltens von Haushaltskollektiven durchgeführt. Im Rahmen dieses Beitrags wird die Definition der Blindleistungsarten erläutert sowie die Ziele und der Umfang der Messkampagne dargelegt. Darüber hinaus werden ersten Untersuchungsergebnisse zur Höhe und Relevanz von auftretenden Blindleistungsarten vorgestellt und darauf aufbauend Rückschlüsse für die Netzplanung gezogen. Im weiteren Projektverlauf wird angestrebt ein Tool zu entwickeln, welches Wirk- und Blindleistungsverläufe für Haushalte mit beliebige Kollektivgrößen synthetisch berechnet.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Forschung Stromnetze, *SyNErgie: Neues Blindleistungsmanagement für Verteilnetze*. [Online] Verfügbar unter: <http://forschung-stromnetze.info/projekte/neues-blindleistungsmanagement-fuer-verteilnetze/>. Zuletzt geprüft am: 21.12.2017.
- [2] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 40110: Wechselstromgrößen: Teil 1 - Zweileiter-Stromkreise*, März 1994 Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [3] Deutsches Institut für Normung e.V., *DIN 40110: Wechselstromgrößen: Teil 2 - Mehrleiter-Stromkreise*, November 2002 Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [4] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Hg., *Verordnung über Allgemeine Bedingungen für den Netzanschluss und dessen Nutzung für die Elektrizitätsversorgung in Niederspannung: Niederspannungsanschlussverordnung NAV*, 2006.