

ANALYSE DER GLEICHZEITIGKEITSAKTOREN VON PROSUMER HAUSHALTEN MIT ELEKTRO- FAHRZEUGEN

Christoph GROISS

Salzburg Netz GmbH, Bayerhamerstraße 16, 5020 Salzburg, Österreich, +43/662/8882-2699, christoph.groiss@salzburgnetz.at, www.salzburgnetz.at

Kurzfassung: In diesem Paper werden die Gleichzeitigkeitsfaktoren von Erzeugung und Verbrauch der Smart Grids Modellgemeinde Köstendorf analysiert. Diese Wohneinheiten verfügen jeweils über eigene Photovoltaikanlage sowie über eine Ladestation für Elektrofahrzeuge. Hierbei wird auf die Frage eingegangen in wie weit diese dezentralen Erzeugungsanlagen sowie zusätzliche Verbrauchern den Gleichzeitigkeitsfaktor der Wohneinheiten beeinflussen.

Die Auswertung der Messdaten zeigt, dass der Gleichzeitigkeitsfaktor der Netzlieferrung (Überschusseinspeisung) deutlich höher ist, als jener des Netzbezugs. Dies kann über die begrenzte Einspeisung durch die Engpasseleistung begründet werden. Die Höhe des maximalen Netzbezugs als auch der Gleichzeitigkeitsfaktor wird nicht durch die dezentrale Einspeisung beeinflusst. Die Verbrauchsspitze wird somit durch die Photovoltaikeinspeisung nicht verringert.

Anhand der Jahresdauerlinien ist ersichtlich, dass sich die Charakteristik des Ladevorgangs von Elektrofahrzeugen deutlich vom restlichen Stromverbrauch unterscheidet. Dies zeigt sich auch im Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktors des Ladevorgangs, welcher für eine geringe Anzahl an Haushalten höher ist, sich aber mit zunehmender Anzahl an Haushalten deutlich schneller verringert, als jener des Stromverbrauchs im Haushalt. Aufgrund der verhältnismäßig geringen Ladeleistung der Elektro-Fahrzeuge wird die Charakteristik des Gleichzeitigkeitsfaktors des Gesamtbezugs nicht stark beeinflusst.

Keywords: Gleichzeitigkeitsfaktor, Elektrofahrzeug-Ladestationen, dezentrale Erzeugung

1 Einleitung

Die Auslegung von elektrischen Verteilnetzen wird maßgeblich von der erwarteten Spitzenleistung bestimmt. Gerade in der Niederspannungsebene ist hierbei der Effekt entscheidend, dass die einzelnen Verbraucher ihre jeweilige Maximalleistung nicht zum gleichen Zeitpunkt abrufen.

Der sogenannte Gleichzeitigkeitsfaktor $g(N)$ beschreibt das Verhältnis aus der maximal auftretenden Summenleistung dividiert durch die Summe der Einzelmaxima der Wohneinheiten:

$$g(N) = \frac{\max_t \sum_i^N P_i(t)}{\sum_{i=1}^N \max_t P_i(t)} \quad (Gl. 1)$$

In TAEV [1] sind hierzu praktische Erfahrungswerte gegeben, wie stark der Gleichzeitigkeitsfaktor in Abhängigkeit der Anzahl an Wohneinheiten bzw. Haushalten (HH) abnimmt. In diesem Paper soll nun der Frage nachgegangen werden, in wie weit diese Erfahrungswerte für Haushalte, welche sowohl über eine Photovoltaikanlage als auch über eine Ladestation für Elektro-Fahrzeuge verfügen, zutreffen.

2 Datengrundlage

Ausgangsbasis der Untersuchung stellen die Messungen an 41 Haushalten in der „Smart Grids Modellgemeinde Köstendorf“ über den Zeitraum von einem Jahr mit einer Zeitaufösung von 5 min dar (siehe Abbildung 1). Diese Haushalte verfügen über eine eigene Photovoltaikanlage sowie größtenteils über ein eigenes Elektrofahrzeug mit zugehöriger Ladestation.

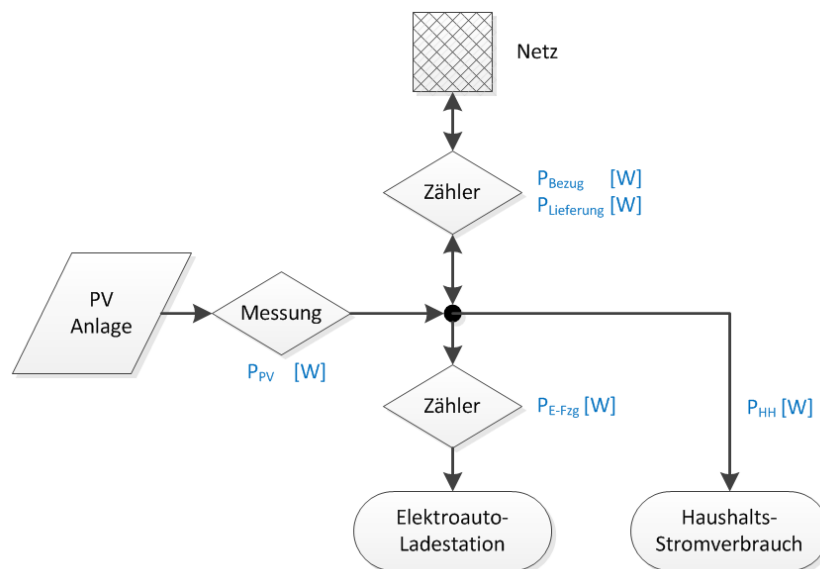


Abbildung 1: Auszug der aufgenommenen Messwerte in der Modellgemeinde Köstendorf

In Abbildung 1 ist ein Auszug der resultierenden Zeitreihen dargestellt. Der Zweirichtungszähler beim Hausanschluss, der Subzähler der Ladestation als auch die Messung der Photovoltaikanlage zeichnen Energiewerte im 5 min Raster auf. Aus diesen Energiewerte werden die dargestellten mittleren Leistungen des Zeitintervalls berechnet. Der Verbrauch der Lasten im Haushalt wird entsprechend (Gl. 2) aus den restlichen Leistungsdaten berechnet:

$$P_{HH}(t) = P_{PV}(t) + P_{Bezug}(t) - P_{E-Fzg}(t) - P_{Lieferung}(t) \quad (Gl. 2)$$

Beim Ausfall einzelner Messwerte ist der zu erwartende Fehler in den Leistungsdaten verhältnismäßig gering, da in diesem Fall die mittlere Leistung über ein längeres Zeitintervall dargestellt wird.

Die Auswertung der Zeitreihen deutet aber darauf hin, dass beim Fehlen einzelner Messwerte (zB durch Ausfall der Kommunikation) der letztbekannte Energiewert in den

Datenaufzeichnungen fortgeschrieben wurde anstatt hier einen Fehlwert aufzuzeichnen. Hierdurch kann keine direkte Unterscheidung zwischen einer fehlenden Datenaufzeichnung und einem Leistungswert von Null getroffen werden. In weiterer Folge ergibt sich bei der Aufzeichnung der Energiewerte ein Sprung, sobald die Übertragung und Speicherung der Daten wieder korrekt funktioniert. Dies resultiert in verhältnismäßig hohen Leistungsspitzen. Offensichtliche Fehler in den Zeitreihen wurden korrigiert. Dennoch ist davon auszugehen, dass einzelne Extremwerte auf die zuvor beschriebene Charakteristik zurückzuführen sind.

2.1 Jahresenergiemengen

In Tabelle 1 sind die durchschnittlichen Jahresenergiemengen pro Haushalt der Projektteilnehmer in der Modellgemeinde Köstendorf dargestellt. Hierbei wurden jene Haushalte ausgenommen, welche grob schlechte Messwerte aufweisen bzw. welche nicht über eine getrennte Messung der Elektro-Fahrzeug Ladestation verfügen.

Tabelle 1: Durchschnittliche Jahresenergiemengen in der Modellgemeinde Köstendorf

Messung	Jahresenergiemengen
Photovoltaik-Erzeugung	3 178 kWh
Photovoltaik-Eigenverbrauch	1 406 kWh
Netzlieferung	1 772 kWh
Netzbezug	6 904 kWh
Verbrauch Gesamt	8 438 kWh
Verbrauch Haushalt	6 915 kWh
Verbrauch Elektro-Fahrzeug	1 524 kWh

Das Verhältnis Jahresenergiemenge der Photovoltaikerzeugung zum Gesamtverbrauch beträgt im Durchschnitt 37,7%. Diese Anlagendimensionierung resultiert in einem verhältnismäßig hohen Eigenverbrauchsanteil von 44,2% bei einem gleichzeitigen Autarkiegrad 16,6%. Der Eigenverbrauchsanteil beschreibt hierbei das Verhältnis des Photovoltaik-Eigenverbrauchs bezogen auf die Gesamterzeugung. Der Autarkiegrad gibt Auskunft über den Anteil des Stromverbrauchs, welcher aus der eigenen Erzeugungsanlage gedeckt werden kann.

Für die weitere Betrachtung ist vor allem der Verbrauchsanteil der Elektro-Fahrzeuge von Bedeutung. Der bestehende Stromverbrauch im Haushalt wird durch den zusätzlichen Verbrauch des Elektro-Autos um durchschnittlich 22% erhöht. Da die Auswertung der Gleichzeitigkeitsfaktoren in diesem Paper mit den absoluten Zeitreihen durchgeführt wird, fließen größere Verbraucher bzw. Erzeuger dementsprechend stärker in das Gesamtergebnis ein.

2.2 Dauerlinien der unterschiedlichen Verbrauchskategorien

Abbildung 2 zeigt die Jahresdauerlinien des Stromverbrauchs im Haushalt, der Elektroauto-Ladestation sowie des resultierenden Bezugs aus dem Stromnetz. Hierzu wurden zunächst für jeden Haushalt einzeln die Jahresdauerlinien gebildet und anschließend der Mittelwert berechnet. Die dargestellten mittleren Dauerlinien sind hierbei jeweils auf sich selbst (auf das 99,99% Quantil) normiert.

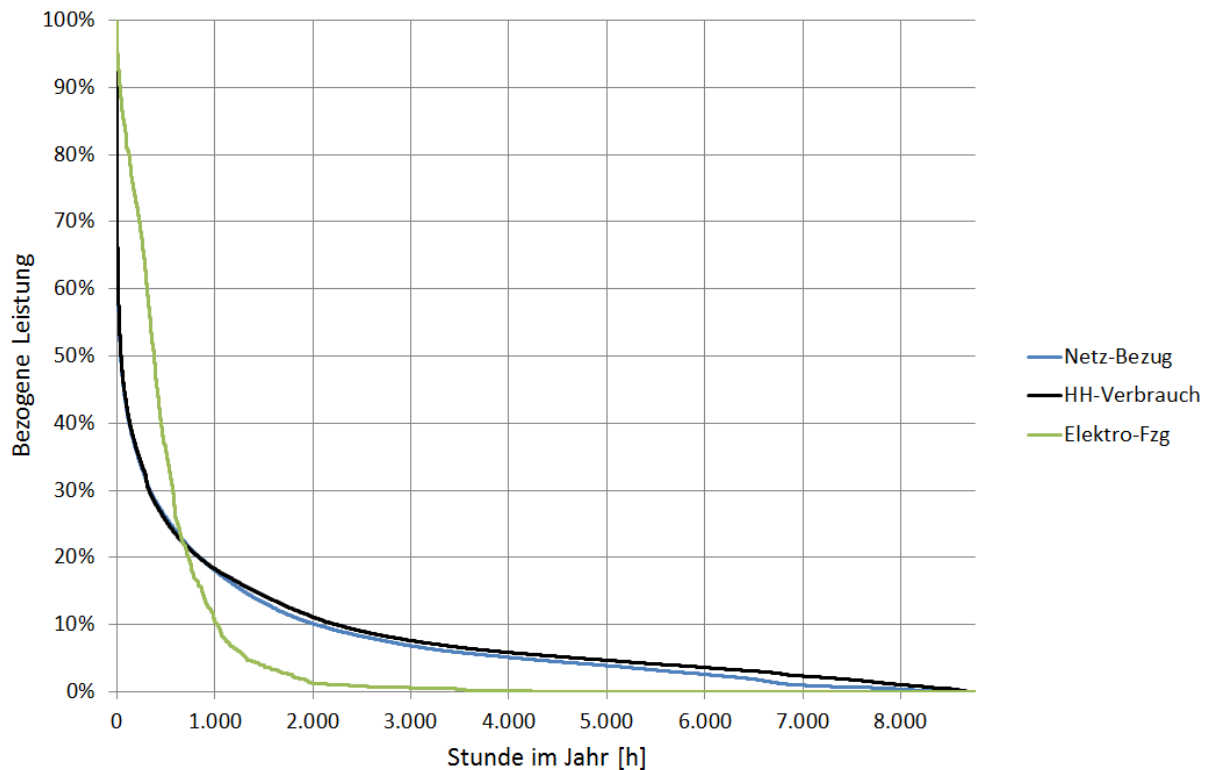


Abbildung 2: Jahresdauerlinien unterschiedlicher Verbraucher

Der Netz-Bezug stellt den Gesamtverbrauch verringert um die Photovoltaikeigenerzeugung dar (siehe Gl. 1). Der Vergleich des resultierenden Netz-Bezugs mit dem normalen Haushaltstromverbrauch zeigt, dass die Photovoltaikeinspeisung praktisch keinen Einfluss auf den Kurvenverlauf zeigt. Nur im hinteren Bereich der Dauerlinie ist eine leichte Abweichung aufgrund der Photovoltaikeigenerzeugung zu erkennen. Die Dauerlinie der Elektroauto Ladestation zeigt hingegen eine abweichende Charakteristik. Zu Beginn treten hohe Ladeleistungen verhältnismäßig häufig auf. Die Betriebsstundenzahl ist im Vergleich zum Strombezug des Haushalts geringer.

Dieses Ladeverhalten ist in Abbildung 3 deutlicher ersichtlich. Die Abbildung zeigt den Ausschnitt der ersten 1 000 h aus Abbildung 2. In den normierten Darstellungen ist zu beachten, dass alle Elektro-Fahrzeuge in der Modellregion einphasig geladen werden und die durchschnittliche Maximalleistung der Elektro-Ladestation deutlich geringer ist, als der maximal auftretende Spitzenwert des Haushaltsstromverbrauchs.

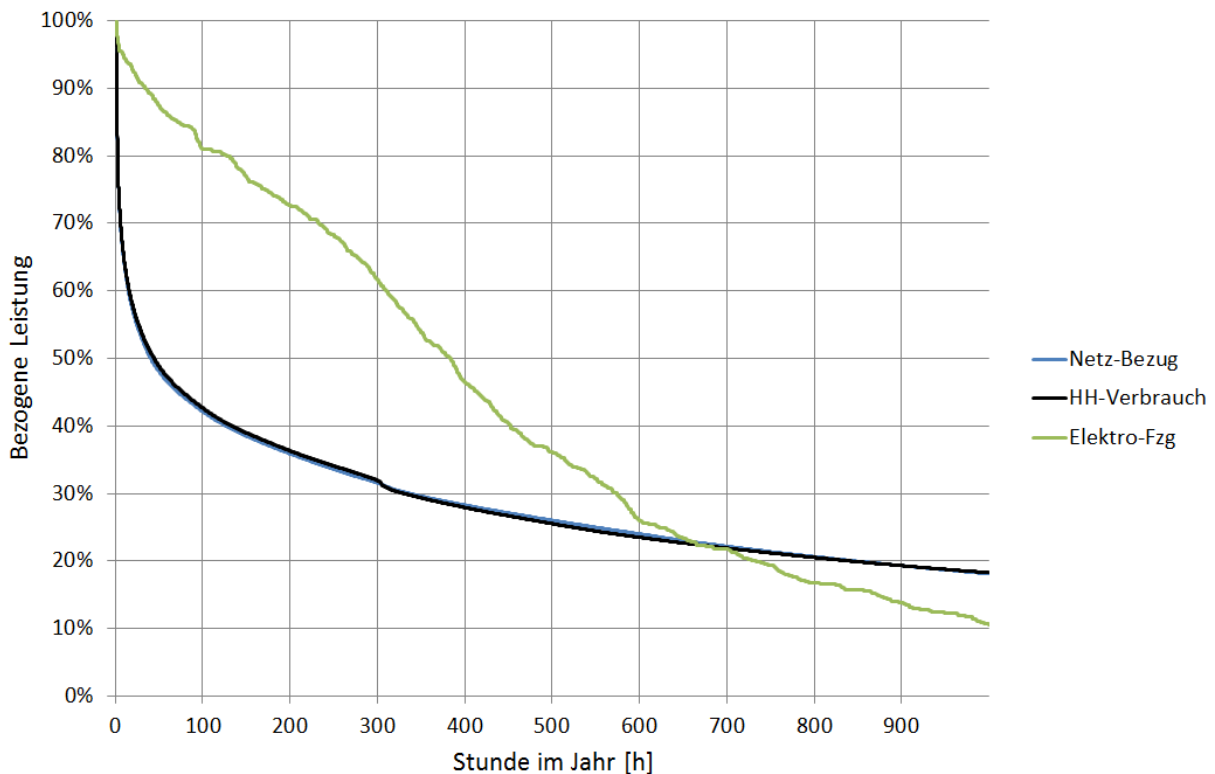


Abbildung 3: Ausschnitt der Jahresdauerlinie unterschiedlicher Verbraucher

In Abbildung 3 ist zu erkennen, dass in den ersten 1000 h der Dauerlinie der Netz-Bezug und der Haushaltsstromverbrauch praktisch deckungsgleich sind. Die Einspeisung der Photovoltaikanlage hat somit auf die Starklastzeiten praktisch keinen Einfluss und verringert die Netz-Belastung in Bezugsrichtung nicht in den Spitzenwerten.

3 Methodik

Dieses Kapitel beschreibt die zugrundeliegende Methodik zur Berechnung der Gleichzeitigkeitsfaktoren, welche in Kapitel 4 dargestellt sind. Für die Analysen werden jeweils die vollständige Jahreszeitreihen im 5 min Zeitraster verwendet. Wie in Kapitel 2 beschrieben, leiten sich die Leistungswerte aus der Differenz der aufgezeichneten Energiewerte ab. Dementsprechend beschreibt der Begriff „Maximalleistung“ die maximale mittlere Leistung welche über eine Dauer von 5 min aufgetreten ist.

In diesem Paper werden zur Analyse ausschließlich die absoluten Zeitreihen verwendet. Dementsprechend wirken sich größere Verbraucher/Erzeuger stärker auf den Gleichzeitigkeitsfaktor aus. Dieser Ansatz wurde einer Normierung der einzelnen Zeitreihen vorgezogen, da somit der Gleichzeitigkeitseffekt innerhalb größerer Haushalte/Wohnanlagen berücksichtigt wird. Zweitens sind die resultierenden absoluten Zeitreihen jene, welche zB für die Auslastung des Ortsnetztransformators maßgeblich sind.

3.1 Messfehlerbehebung durch 99,99% Quantil

In Kapitel 2 wird beschrieben, dass die Zeitreihen einzelne Datenfehler beinhalten, welche nicht mit Hilfe der durchgeführten Voranalyse der Messungen korrigiert wurden. Da die

Analyse des Gleichzeitigkeitsfaktors auf Extremwerte abzielt, werden die Ergebnisse somit von diesen einzelnen Werten stark beeinflusst.

Aus diesem Grund wird anstelle des Maximalwertes der Zeitreihe eines Haushalts das 99,99% Quantil herangezogen. Die vollständige Zeitreihe über ein Jahr im 5 min Raster beinhaltet 105120 Werte. Das 99,99% Quantil entspricht somit dem Mittelwert aus 10. und 11. größtem Wert der Jahresdauerlinie. Dies hat sich bei den vorliegenden Daten als praktikabler Wert herausgestellt, da ab diesem Zeitpunkt der Dauerlinie keine groben Ausreißer der zugrundeliegenden Messdaten festgestellt werden konnten.

Für einzelne Haushalte bzw. Wohneinheiten wird anstelle des Maximalwertes für die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors somit das 99,99% Quantil der Dauerlinie herangezogen: $P_{max} \rightarrow P_{99,99\%}$. Wie in Gleichung 1 dargestellt wird zur Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors das Summenprofil aller gleichzeitig betrachteten Haushalte auf die Einzelmaxima bezogen. Für die Dauerlinie des Summenprofils besteht ebenfalls die Möglichkeit den Bezugswert zu variieren.

Einzelne Ausreißer der Haushaltsprofile weisen zT eine Größenordnung auf, sodass hierdurch auch das Summenprofil merkbar beeinflusst und somit fehlerbehaftet ist. Aus diesem Grund bietet sich auch hier an, anstelle des Maximalwertes den 99,99% Quantilwert der Dauerlinie zu verwenden. Für die Auswahl des konkreten Wertes ist entscheidend, ob die Datenfehler der Einzelzeitreihen zum selben Zeitpunkt auftreten, oder sich diese über den vollständigen Beobachtungszeitraum verteilen. Im letztgenannten Fall wird das 99,99% Quantil (also der 10. größte Wert der Dauerlinie) der Summenzeitreihe im Gegensatz zur Einzelzeitreihe noch fehlerbehaftet sein. Anhand der Analyse der vorliegenden Daten wurde für das Summenprofil ebenfalls der 99,99% Quantilwert als „Maximalwert“ gewählt. In weiteren Arbeiten besteht hier Verbesserungspotenzial durch eine ausführlichere Voranalyse der Messdaten, um hier einzelne Datenfehler beheben zu können.

3.2 Auswahl der Haushalte aus der Grundgesamtheit

Das Ergebnis des Gleichzeitigkeitsfaktors wird maßgeblich von der Auswahl der konkreten Haushalte beeinflusst. Bei der Betrachtung eines Einzelhaushaltes sowie der Summe aller Haushalte liegt jeweils nur eine Kombinationsmöglichkeit vor. Bei der Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors von 20 Haushalten aus dem Kollektiv von 40 Haushalten bestehen hingegen in etwa 10^{29} Kombinationsmöglichkeiten:

$$\binom{40}{20} = \frac{40!}{20! \cdot (40 - 20)!} \cong 10^{29} \quad (Gl. 3)$$

Aus Gleichung 3 ist ersichtlich, dass die Berechnung des Gleichzeitigkeitsfaktors aller Kombinationsmöglichkeiten mit normalen Berechnungsmethoden nicht möglich ist. Um dennoch den Einfluss der Auswahl der konkreten Haushalte möglichst gering zu halten, wurden in weiterer Folge Zufallsziehungen durchgeführt. Für jede Anzahl an Wohneinheiten wurden jeweils 10000 Zufallsziehungen an Kombinationen der Haushalte gebildet und für dieses ausgewählte Kollektiv der Gleichzeitigkeitsfaktor der unterschiedlichen Zeitreihen berechnet. Dementsprechend liegen je Kollektivgröße 10000 (im Allgemeinen) unterschiedliche Gleichzeitigkeitsfaktoren als Ergebnis vor. In Kapitel 4 wird die Bandbreite dieser Ergebnisse dargestellt.

4 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden zunächst die Gleichzeitigkeitsfaktoren der drei Zeitreihen

- Ladevorgang Elektrofahrzeuge
- Netzbezug
- Netzlieferung (Überschusseinspeisung)

behandelt. Hierbei wird neben den resultierenden Mittelwert des Gleichzeitigkeitsfaktors auch dessen Schwankungsbreite in Abhängigkeit der gewählten Stichprobe angegeben (vgl. Kapitel 3.2). Im Anschluss werden die Gleichzeitigkeitsfaktoren der unterschiedlichen Zeitreihen den Verläufen laut TAEV [1] gegenübergestellt.

4.1 Gleichzeitigkeitsfaktor der Elektroauto-Ladestationen

Abbildung 4 zeigt den Gleichzeitigkeitsfaktors des Ladevorgangs der Elektrofahrzeuge. Hierbei wurden nur jene Haushalte berücksichtigt, deren Ladestation an einem eigenen Subzähler getrennt gemessen wird. Die rote Linie zeigt den mittleren Gleichzeitigkeitsfaktor, welcher sich aus den jeweils 10 000 gezogenen Stichproben ergibt.

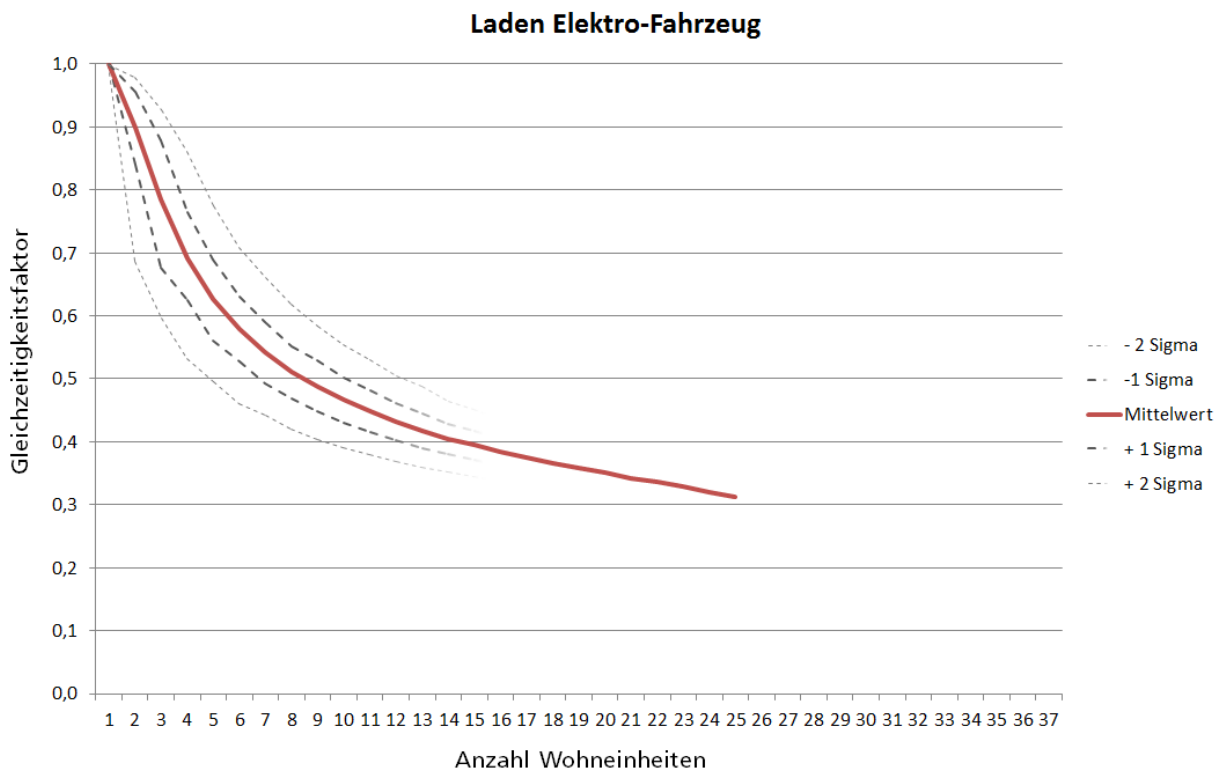


Abbildung 4: Gleichzeitigkeitsfaktors des Ladevorgangs der Elektrofahrzeuge

Neben dem Mittelwert ist die Verteilung des Gleichzeitigkeitsfaktors für $\pm 1\sigma$ und $\pm 2\sigma$ angegeben. Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, existieren sowohl für die Gleichzeitigkeit einer einzelnen Zeitreihe als auch für die Summe über alle Zeitreihen nur eine Kombinationsmöglichkeit. Dementsprechend besitzt die Schwankungsbreite für den Beginn und dem Ende der Gleichzeitigkeitskennlinie keine Aussagekraft.

Im Bereich der Elektromobilität zeigt sich eine Verhältnismäßig große Bandbreite des Gleichzeitigkeitsfaktors im Vergleich zu anderen Verbrauchertypen. Speziell die obere Kurve von $+2\sigma$ zeigt, dass bei Betrachtung von vier Ladestationen der gleichzeitige Bezug 86% der Summe der Maximalleistungen betragen kann. Der mittlere Gleichzeitigkeitsfaktor fällt hingegen deutlich schneller ab und weist beim betrachteten Punkt von vier Haushalten eine Gleichzeitigkeit von 69% auf.

4.2 Gleichzeitigkeitsfaktor des Netzbezugs

Abbildung 5 zeigt den Gleichzeitigkeitsfaktor für den Netzbezug der Wohneinheiten. Der Netzbezug beschreibt hierbei den Gesamtverbrauch (inkl. Elektroauto-Ladestationen) verringert um den Photovoltaikeigenverbrauch. Das Darstellungsprinzip ist analog zu jenem aus Abbildung 4 (siehe Kapitel 4.1).

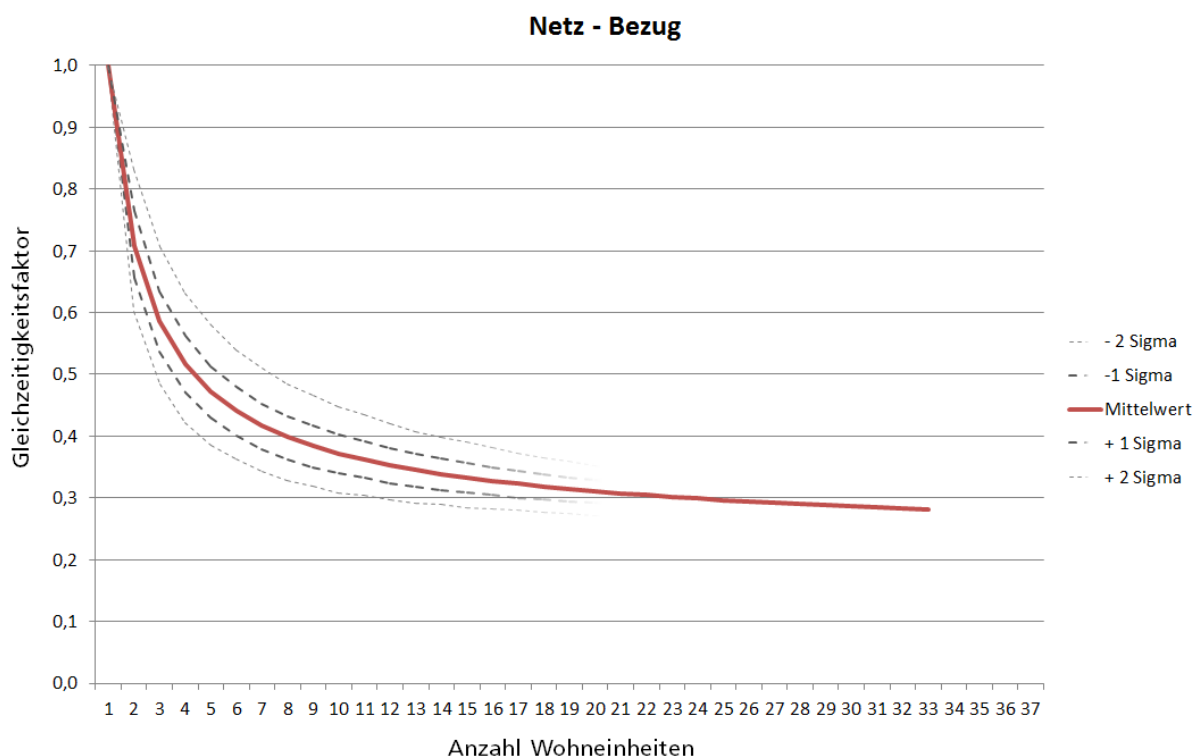


Abbildung 5: Gleichzeitigkeitsfaktors des Netzbezugs der Haushalte

Im Vergleich zur Gleichzeitigkeitskurve des Ladens der Elektrofahrzeuge (siehe Abbildung 4) zeigt der Netzbezug (siehe Abbildung 5) eine deutlich steiler abfallende Kurve. Dies zeigt sich auch in (den hier nicht dargestellten) maximalen Absolutwerten. Die Spitzenleistung des Haushaltsverbrauch ist im Gegensatz zu den Ladestationen von Elektroautos praktisch nicht (bzw. nur durch die Sicherung) begrenzt.

4.3 Gleichzeitigkeitsfaktor der Netzlieferrung

Abbildung 6 zeigt den Gleichzeitigkeitsfaktors der Überschusseinspeisung von Photovoltaikanlagen. Auch hier ist ein deutlicher Abfall zu Beginn der Kurve zu erkennen. Im Gegensatz zur Gleichzeitigkeit des Netzbezugs sowie dem Ladevorgang von Elektroautos

zeigt sich jedoch mit zunehmender Kollektivgröße keine signifikante Verringerung des Gleichzeitigkeitsfaktors.

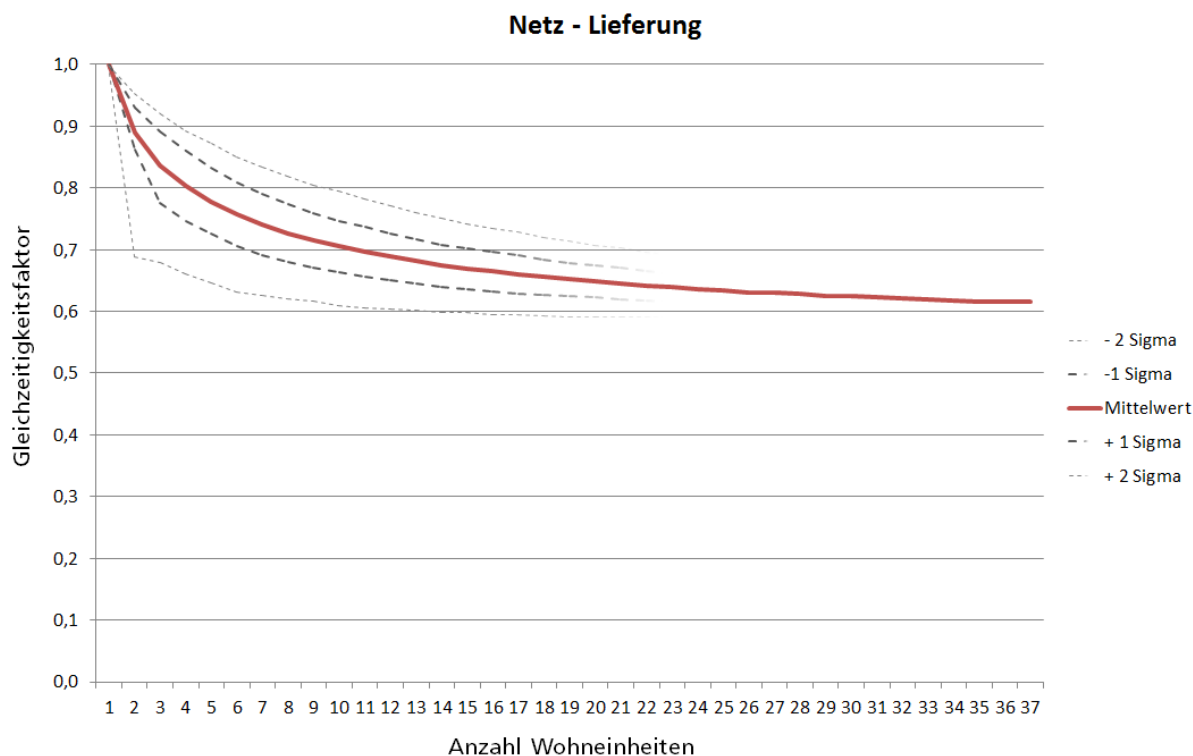


Abbildung 6: Gleichzeitigkeitsfaktors der Netzlieferrung (Überschusseinspeisung der PV-Anlagen)

Wie bei den zuvor dargestellten Dauerlinie ist auch hier der Bezugswert das 99,99% Quantil (als „Maximalwert“) der jeweiligen Dauerlinie. Die Netzlieferrung ist durch die Engpassleistung der Photovoltaikanlagen begrenzt und wird um den Stromverbrauch im Haushalt und durch das Laden des Elektroautos verringert.

4.4 Gleichzeitigkeitsfaktoren im Vergleich

In Abbildung 7 sind die Gleichzeitigkeitsfaktoren der einzelnen Zeitreihen gemeinsam dargestellt. Zunächst wird ein Vergleich zwischen der roten Kurve „Gesamtverbrauch“ und der blauen Kurve „Netz-Bezug“ durchgeführt. Der Gesamtverbrauch beschreibt die Summe aus dem normalen Haushaltstromverbrauchs und dem Ladevorgang der Elektrofahrzeuge. Der Gesamtverbrauch unterscheidet sich vom Netzbezug genau um den Eigenverbrauch der Photovoltaikerzeugung. In Abbildung 7 ist aufgrund der vorliegenden Messungen die die Grundgesamtheit der Kurve „Gesamtverbrauch“ etwas geringer. Dennoch weisen die Kurvenverläufe dieser beiden Gleichzeitigkeitsfaktoren praktisch keinen Unterschied auf. Wie bereits im Kapitel 2.2 beschrieben, kann hieraus die Schlussfolgerung gezogen werden, dass die Photovoltaikeinspeisung auf die Gleichzeitigkeit in Bezugsrichtung keinen erkennbaren Einfluss aufweist. Die Verbrauchsspitze bleibt somit unverändert.

Der Bereich, der durch die beiden hellgrauen Linien aufgespannt wird, ist jener, welcher laut TAEV [1] den zu erwartenden Gleichzeitigkeitsfaktor für „vollelektrifizierte Wohneinheiten“ darstellt. Der gemessene Gleichzeitigkeitsfaktor des Haushaltsstromverbrauchs stimmt nahezu mit der Obergrenze laut TAEV überein.

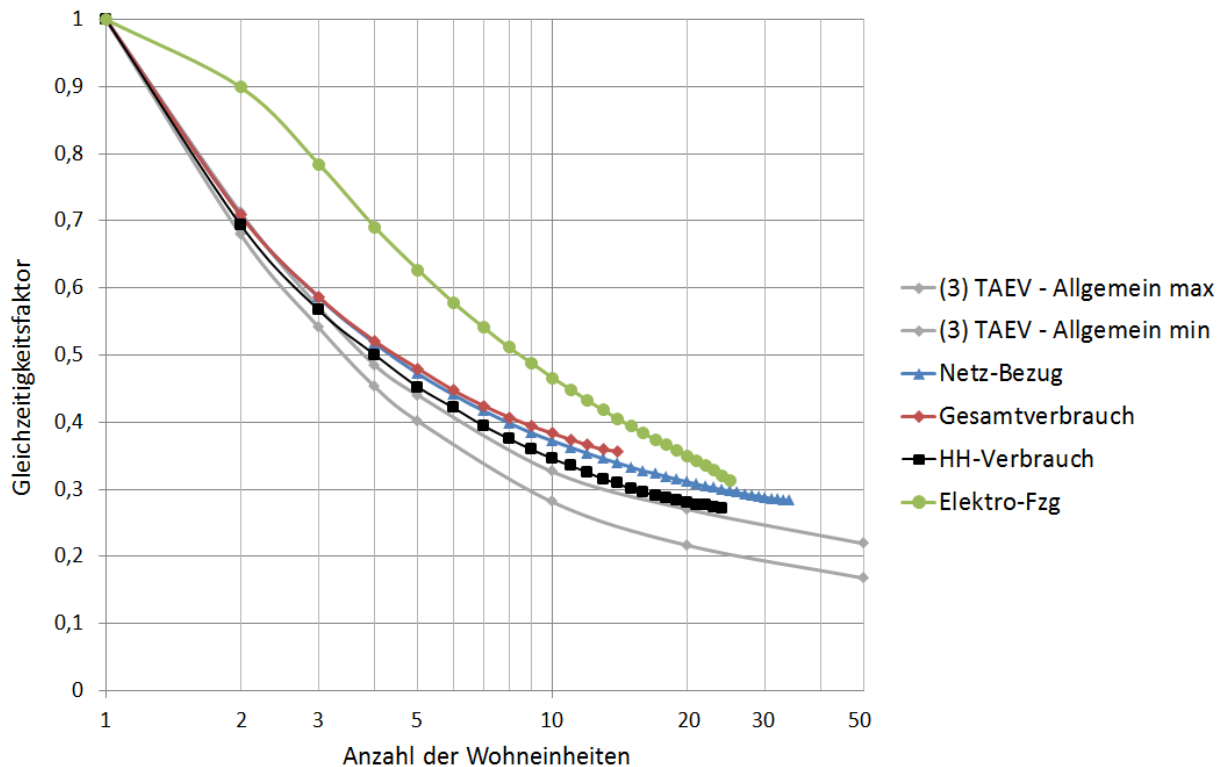


Abbildung 7: Gleichzeitigkeitsfaktor für Netz-Bezug, Haushaltsstromverbrauch und Ladung der Elektrofahrzeuge im Vergleich zur Bandbreite der TAEV für allgemeinen Bedarf

Die Kurve des Netzbezugs, welcher sowohl den Verbrauch der Elektrofahrzeuge als auch die Photovoltaikerzeugung beinhaltet, gleicht der Kurve des reinen Stromverbrauchs im Haushalt. Die etwas erhöhten Werte der Gleichzeitigkeit können über den Effekt des Ladeverhaltens der Elektromobilität erklärt werden. Der qualitative Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktor des Netzbezugs wird weder durch die dezentrale Einspeisung noch durch das Laden der Elektro-Fahrzeuge maßgeblich beeinflusst. Es ist jedoch zu beachten, dass den beiden Kurven ein unterschiedlicher Bezugswert zu Grunde liegt und die absolut auftretenden Bezugs-Leistungen durch die Elektro-Mobilität ansteigen.

Der Verlauf des Gleichzeitigkeitsfaktor aller Elektro-Fahrzeug Ladestationen weist im Vergleich zum normalen Haushaltsstromverbrauch eine unterschiedliche Charakteristik auf. Werden wenige Ladestationen betrachtet so zeigen diese eine hohe Gleichzeitigkeit. Die Wahrscheinlichkeit, dass einige Fahrzeuge zum gleichen Zeitpunkt mit ihrer (nahezu) Maximalleistung geladen werden, ist verhältnismäßig hoch. Die Kurve fällt mit steigender Anzahl an Ladestationen stärker ab als jene des Haushaltsverbrauchs und zeigt, dass für ein größeres Kollektiv an Elektrofahrzeugen, das gleichzeitige Laden mit Maximalleistung unwahrscheinlicher wird.

5 Literatur

[1] TAEV 2012: Technisches Anschlussbedingungen für den Anschluss an öffentliche Versorgungsnetze mit Betriebsspannungen bis 1000 Volt; Herausgeber: Oesterreichs Energie