

ENTWICKLUNG UND VERIFIKATION EINES STOCHASTISCHEN VERBRAUCHERLASTMODELLS FÜR HAUSHALTE

Peter Esslinger, Rolf Witzmann

Technische Universität München, Fachgebiet Elektrische Energieversorgungsnetze,
Arcisstraße 21, 80333 München, +49 89 289-22017, peter.esslinger@mytum.de,
www.een.ei.tum.de

Kurzfassung: Niederspannungsnetze stehen im zunehmenden Maße Herausforderungen, wie beispielsweise dem wachsenden Zubau von dezentralen Einspeisern, gegenüber. Außerdem erfährt die Netzplanung wegen der Anreizregulierung einen steigenden Kostendruck. Daher ist es notwendig, genaue Kenntnisse der betreffenden Netze zu haben, insbesondere welche Verbraucherlasten vorherrschen. Deren Lastgänge können in Minuten-genaue Auflösung mithilfe des in dieser Arbeit vorstellten probabilistischen Verfahrens synthetisch erzeugt werden.

Keywords: Lastprofil, Haushaltsverbraucher, Standardlastprofil, Lastmodell

1 Einführung

Niederspannungsnetze stehen im zunehmenden Maße stetig fortschreitenden Herausforderungen, wie beispielsweise dem rasant wachsenden Zubau von dezentralen Einspeisern, gegenüber. Im süddeutschen Raum sind diese dezentralen Einspeiser vor allem Photovoltaik-Anlagen. Außerdem erfährt die Netzplanung wegen der Anreizregulierung einen steigenden Kostendruck. Eine optimierte Bewältigung dieser Problematik setzt eine genaue Kenntnis der betreffenden Niederspannungsnetze voraus. Neben unerlässlichen Informationen, wie die Netztopologie und den Betriebsmitteldaten, also welche Leitungen und Transformatoren im Netz eingesetzt sind, ist es unabdingbar, einen Überblick über die Verbraucher im Netz zu haben. Dieser Beitrag beschäftigt sich mit der Frage, wie die Verbraucherlast von Haushalten probabilistisch modelliert werden kann. Als Ergebnis wird ein Simulationsmodell für stochastische Lastprofile für Haushalte vorgestellt.

2 Lastmodellierung von Haushalten

Genauere Kenntnisse über die lokal verbrauchte Leistung sind für die Ermittlung der Netzspannung und der Belastung der Betriebsmittel im Allgemeinen unabdingbar. Für Haushaltsverbraucher, deren Anteil in der Niederspannungs-Ebene am größten ist, werden je nach Kontext verschiedene Methoden zur Nachbildung verwendet, die in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

2.1 Schätzung der Maximallast

Die Maximallast bzw. Spitzenlast muss zur Auslegung der Betriebsmittel beim Anschluss von Haushaltsverbrauchern abgeschätzt werden. Dies erfolgt typischerweise mithilfe des Gleichzeitigkeitsgrades g . Dieser ist definiert als durchschnittlicher, im Rahmen einer Gruppenkalkulation ermittelter Anteil der Höchstlast einer Einzelentnahme an der Höchstlast eines Netzes. [1] Dabei wird nach [2] typischerweise von vollelektrifizierten Haushalten (ohne Elektroheizung) mit einer Spitzenlast $p_s = 30 \text{ kW}$ und einem Gleichzeitigkeitsgrad $g_\infty = 0,06 \dots 0,07$ ausgegangen. Abhängig von der Anzahl der Haushalte, die über ein Betriebsmittel versorgt werden, ergibt sich eine Spitzenleistung p_s nach Gleichung 1. Das Ergebnis für vollelektrifizierte Haushalte ist bis 150 Haushalte in Abbildung 1 dargestellt.

$$p_s(n) = p_s \cdot \left[g_\infty + (1 - g_\infty) \cdot n^{-\frac{3}{4}} \right] \quad (1)$$

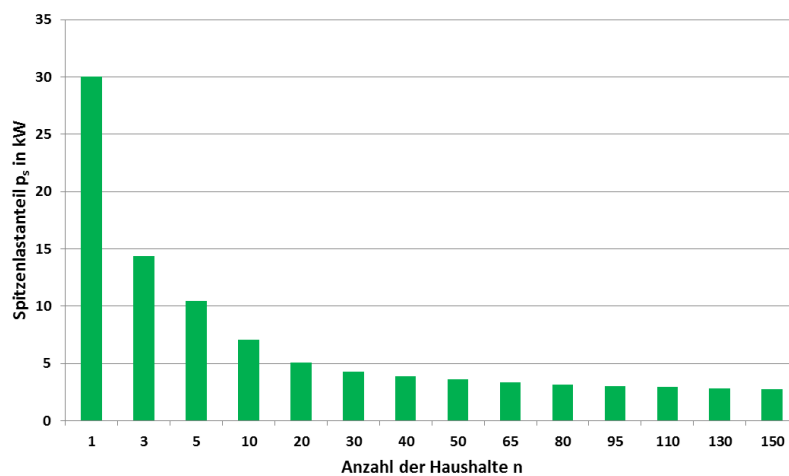


Abbildung 1: Spitzenlastanteil vollelektrifizierter Haushalte

Die Abschätzung der Maximallast mit Gleichzeitigkeitsfaktoren ist zwar in den meisten Fällen hinreichend zur Auslegung der Betriebsmittel im Niederspannungsnetz hinsichtlich des Starklastfalles. Dieser ist aber wegen der vermehrten dezentralen Einspeisung nicht mehr die einzige Situation, die betrachtet werden muss. Hier kann im Rückspeisefall eine höhere Belastung als im Starklastfall auftreten, sodass für die Netzplanung dieser Fall mehr und mehr relevant wird [3].

2.2 Standardlastprofile

Das Verbraucherverhalten kann durch Standardlastprofile abgeschätzt werden. Hierbei kommen üblicherweise die VDEW-Standardlastprofile zum Einsatz. Diese Profile basieren auf einer Datenerhebung des VDEW mit verschiedenen deutschen Energieversorgern Mitte der 1980er Jahre [4]. Das Lastverhalten einer großen Zahl repräsentativer Verbraucher wurde in 15-Minuten-Mittelwerten aufgezeichnet und ausgewertet. Als Ergebnis erhielt man mittlere Ganglinien für Werkzeuge, Samstag sowie Sonn- und Feiertage jeweils für Sommer, Winter und Übergangszeit. Diese Profile gibt es für unterschiedliche Verbrauchertypen, wie Haushalte, Landwirtschaften und verschiedene Gewerbebetriebe. Abbildung 2 zeigt drei Lastgänge für einen Haushalt nach dem VDEW-Standardlastprofil H0 für die Winterzeit. Die Profile sind dabei so skaliert, dass sie einem Jahresverbrauch von 1.000 kWh pro Jahr des

Haushalts entsprechen. Die Maximallast tritt Werkstags gegen 18:30 Uhr auf. Des weiteren findet sich ebenfalls sonntags eine ausgeprägte Mittagsspitze.

Eine Dynamisierungsfunktion (Polynom 4. Grades) bildet jahreszeitliche Schwankungen nach.

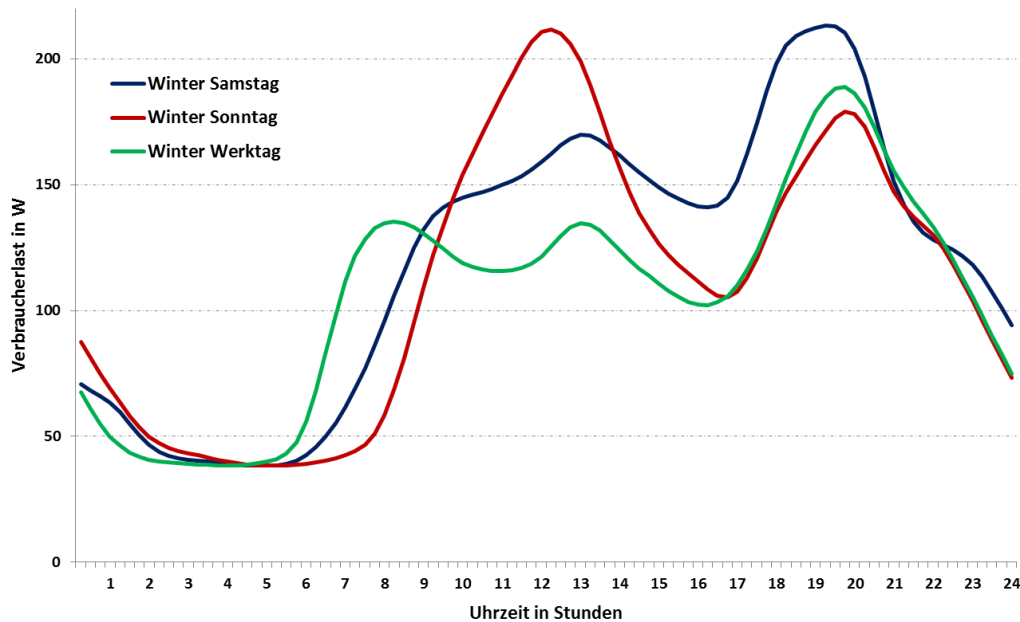


Abbildung 2: Standardlastprofil H0 für Haushalte im Winter

Ab ca. 400 Haushalten ist mit maximalen Abweichungen um den Ganglinienmittelwert von $\pm 10\%$ zu rechnen. Bei geringerer Anzahl von Verbrauchern steigt die Streuung der Lasten stark an und entspricht nicht mehr einer Normalverteilung. Weiterführende Betrachtungen [5] zeigen, dass sich bereits ab 150 Haushalten eine Streuung der Verbraucherlasten um den Mittelwert des Profils einstellt. Bei weniger als 150 Haushalten ist jedoch die Verwendung des VDEW Standardlastprofils H0 nicht mehr zulässig. Hier muss der Verbrauch anderweitig abgeschätzt werden.

Die Standardlastprofile müssen jeweils auf einen durchschnittlichen Energieverbrauch skaliert werden. Tabelle 1 zeigt den durchschnittlichen Jahresstromverbrauch je Haushalt (ohne Heizstromverbrauch) der Jahre 2005 und 2010 für unterschiedliche Haushaltsgrößen. [6] [7] Für ein typisches Einfamilienhaus mit vier Personen ergibt sich somit ein durchschnittlicher Jahresverbrauch von gut 4.500 kWh.

Tabelle 1: Stromverbrauch je Haushalt nach Haushaltsgrößen in kWh

<i>Haushalte mit</i>	<i>Jahr 2005</i>	<i>Jahr 2010</i>
1 Person	1790	2050
2 Personen	3030	3440
3 Personen	3880	4050
4 Personen	4430	4940

2008 teilten sich wie Haushaltsgrößen wie in Abbildung 3 aufgezeigt auf. [8] Allerdings sind diese Werte stark gebietsabhängig. So trifft man in städtischen Gebieten verhältnismäßig viele Ein- und Zweipersonen-Haushalte an; im ländlichen Raum, wo derzeit der Großteil der dezentralen Einspeisung, etwa durch PV-Anlagen, stattfindet, sind hingegen Ein- oder Mehrfamilienhäuser mit mehreren Personen je Haushalt vorherrschend. Somit ist der Siedlungstyp eine nicht zu unterschätzende Einflussgröße bei der Generierung synthetischer Lastprofile.

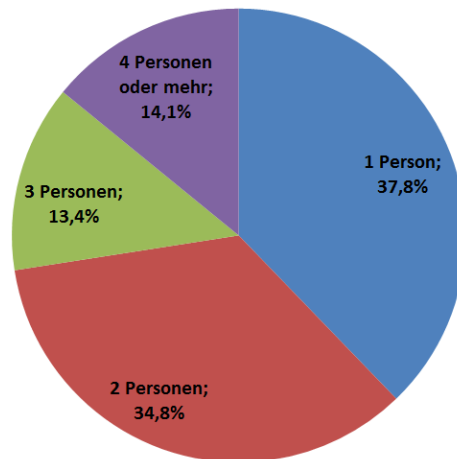


Abbildung 3: Verteilung der Haushaltsgrößen

2.3 Abschätzung der minimal anzurechnenden Verbraucherlast

Für einzelne Haushalte kann als gesicherter Verbrauch nur der Stand-by-Verbrauch angenommen werden. Dieser liegt bei etwa 11 % des Jahresenergieverbrauches. [9] Bei einem Jahresenergieverbrauch von 4.500 kWh für einen Vierpersonenhaushalt ergibt sich eine Dauerlast P_D unabhängig von der Tageszeit nach Gleichung 2.

$$P_D = \frac{4500 \text{ kWh/a} \cdot 11\%}{8760 \text{ h/a}} = 57 \text{ W} \quad (2)$$

Ab zehn Haushalten kann die Taktung von Kühl- und Gefriergeräten vernachlässigt werden. Ihr Anteil am Energieverbrauch von ca. 31 % [9] kann ebenfalls als gesichert angesehen werden. Die getaktete Dauerlast $P_{D,t}$ ergibt sich damit entsprechend Gleichung 3.

$$P_{D,t} = \frac{4500 \text{ kWh/a} \cdot 31\%}{8760 \text{ h/a}} = 160 \text{ W} \quad (3)$$

Für den Bereich von zehn bis 150 Haushalten wird in anderen Arbeiten [10] eine lineare Interpolation zwischen dem gesicherten personenunabhängigen Verbrauch und der aus dem VDEW-Standardlastprofil ermittelbaren anrechenbaren Verbraucherlast vorgeschlagen.

3 Probabilistisches Lastmodell für Haushalte

Abschätzungen der maximalen und minimalen Last sowie Standardlastprofile, wie in Abschnitt 2 beschrieben, reichen aufgrund der sich durch zunehmende dezentrale Einspeisung entscheidend wandelnden Betriebsweise von Niederspannungs-Verteilnetzen oftmals nicht aus. Hier bietet sich ein probabilistisches Lastprofil für Haushalte an, dessen Grundzüge in diesem Abschnitt vorgestellt werden.

3.1 Einteilung in Verbraucherklassen

Zur Nachbildung der Verbraucherlast ist es sinnvoll, die einzelnen Verbraucher im Haushalt in ähnliche Klassen einzuteilen. In der Literatur findet man verschiedene, aber im Großen und Ganzen ähnliche Zusammenstellungen über den Anteil der einzelnen Klassen am Gesamtverbrauch. In Abbildung 4 ist der Anteil der einzelnen Verbraucher am Haushaltsverbrauch im Jahre 2005 dargestellt. [6] In der Literatur sind weitere ähnliche Einteilungen zu finden. [9] [11]

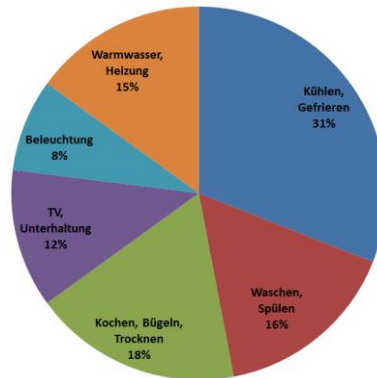


Abbildung 4: Anteil der Haushaltsverbraucher am Gesamtverbrauch nach VDEW 2005

Der spezifische Verbrauch der jeweiligen Verbraucher sowie deren typische Nutzungsdauer und Taktung sind ebenfalls in verschiedenen Publikationen erfasst. [8] [9]

3.2 Nachbildung des Lastverlaufs mit einer Verteilungsfunktion

Bisherige Verfahren zur Modellierung von Haushaltlasten, wie etwa in [9], nutzen zumeist nur ein per Zufallsgenerator gesteuertes Zu- und Wegschalten der maximal zulässigen Last pro Hausanschluss von 30 kW. Dies liefert zwar global betrachtet ab einer gewissen Anzahl von Haushalten brauchbare Ergebnisse, ist aber für Niederspannungsnetze mit Betrachtung einzelner Lasten ungeeignet.

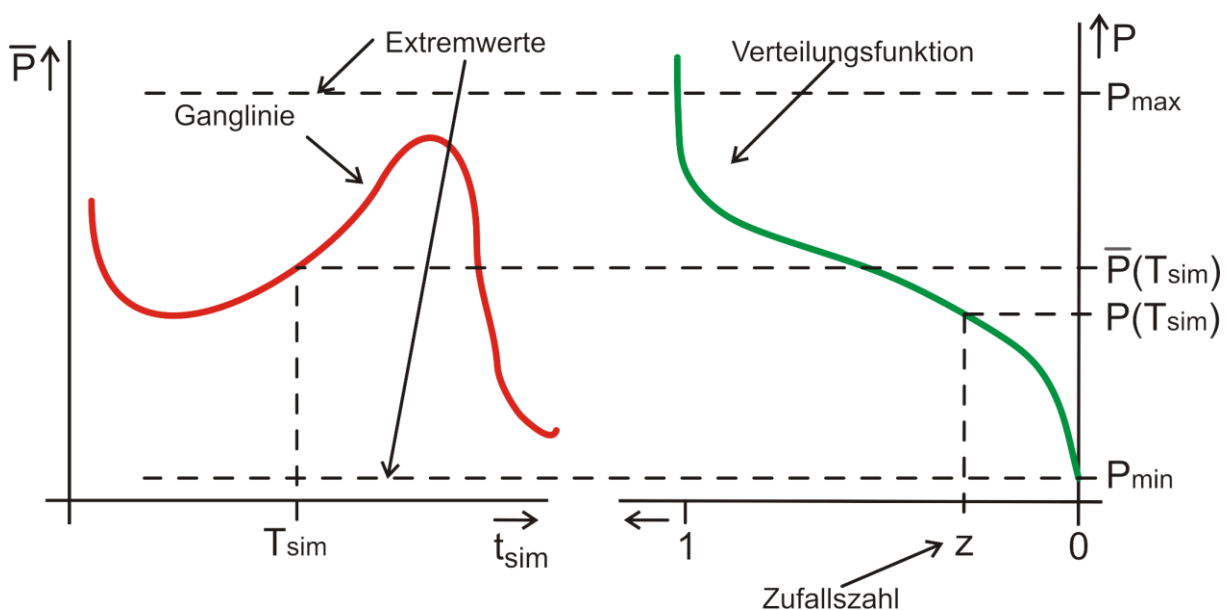


Abbildung 5: Individuelles Lastmodell

Eine sinnvolle Methode besteht in einer Umsetzung der in [9] beschriebenen Modellierung für individuelle Ganglinien auf Haushaltsverbraucher (siehe Abbildung 5).

Notwendig für dieses Verfahren ist die Vorgabe einer Ganglinie als Führungsprofil. Diese soll für jeden Simulationszeitpunkt T_{sim} den Erwartungswert der Verbraucherleistung $\bar{P}(T_{sim})$ enthalten. Für jeden Simulationszeitpunkt T_{sim} wird eine Verteilungsfunktion mit Erwartungswert $\bar{P}(T_{sim})$ und zugehöriger Standardabweichung errechnet. Die Verteilung soll als Maximum die größte zulässige Last pro Haushalt P_{max} aufweisen und als Minimum die kleinste auftretende Leistung P_{min} .

In [12] wurde untersucht, welche Verteilungsfunktionen die Leistungsaufnahme von Verbrauchern im Haushalt am geeignetsten beschreiben. Vorgeschlagen wird in dieser Untersuchung die Gamma-Verteilung, die auch für das im Folgenden vorgestellte Modellierungsverfahren verwendet wird. Andere Publikationen verwenden die Beta-Verteilung [13] [14], die Weibullverteilung oder die logarithmische Normalverteilung [15].

Die Gammaverteilung ist eine kontinuierliche Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Menge der positiven reellen Zahlen. Sie ist eine Verallgemeinerung der Exponentialverteilung und kommt vor allem in der Versicherungsmathematik zur Modellierung von Schadenhöhen zum Einsatz. Sie ist durch folgende Wahrscheinlichkeitsdichte mit den reellen Parametern $b > 0$ und $p > 0$ definiert (Gleichung 4):

$$f(x) = \begin{cases} \frac{b^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-bx}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases} \quad (4)$$

$\Gamma(p)$ steht für die Gammafunktion (Gleichung 5), nach der die Verteilung auch benannt ist.

$$\Gamma(p) = \int_0^p t^{p-1} e^{-t} dt \quad (5)$$

Ein Vorteil der Gammaverteilung ist, dass die Parameter b und p der Verteilung im Gegensatz etwa zur Weibullverteilung sehr einfach aus dem gewünschten Erwartungswert \bar{P} (Gleichung 6) und der Standardabweichung σ (Gleichung 7) berechnet werden können.

$$\bar{P} = \frac{p}{b} \quad (6)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{p}{b^2}} \quad (7)$$

Um die Leistung für einen einzelnen Verbraucher zum Simulationszeitpunkt t_{sim} zu erhalten, werden so viele Gamma-verteilte Zufallszahlen mit dem Erwartungswert $\bar{P}(t_{sim})$ generiert, wie insgesamt Verbraucher im zu simulierenden Netz vorhanden sind. Diese Zufallszahlen entsprechen dann jeweils den Leistungen P , welche die Haushalte zum Zeitpunkt t_{sim} beziehen. Mit diesem Vorgehen ist sichergestellt, dass sich die summierte Gesamtleistung im Netz mit zunehmender Anzahl der Haushalte immer besser dem als Erwartungswert \bar{P} vorgegebenen Wert aus der Ganglinie annähert.

3.3 Generierung synthetischer Lastgänge

Synthetische Lastprofile werden im Rahmen des hier vorgestellten Konzepts durch Überlagerung der probabilistischen Lastgänge der in Abschnitt 3.1 aufgeführten Verbraucherklassen generiert. Es wird ein „bottom up“-Ansatz gewählt, das heißt, zunächst werden Lastprofile für einzelne Verbrauchergruppen generiert, die anschließend zu einem synthetischen Lastgang für einen Haushalt aufsummiert werden. Der große Vorteil dieser Vorgehensweise liegt darin, dass nicht auf vorgefertigte Lastgänge für Haushalte, wie etwa das VDEW-Standardlastprofil zurückgegriffen werden muss, die lediglich stochastisch variiert werden. Die prinzipielle Vorgehensweise ist in Abbildung 6 dargestellt. Ein ähnliches Grundprinzip wird beispielsweise auch in [16] verfolgt.

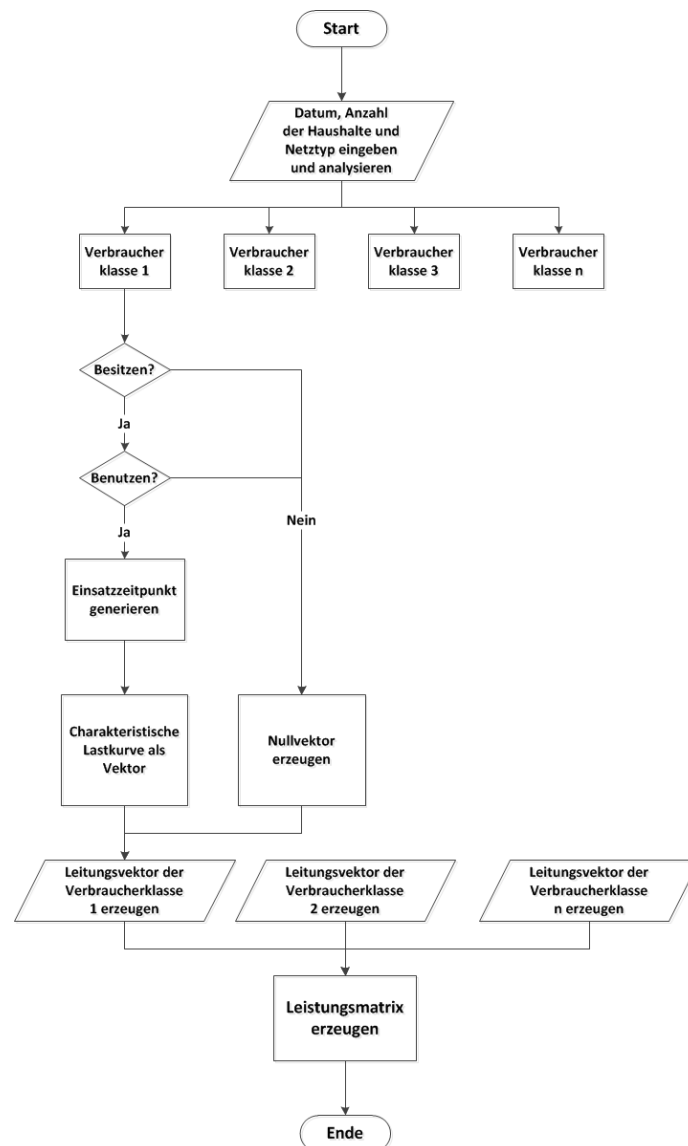


Abbildung 6: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Erstellung synthetischer Lastprofile

Zunächst muss der Zeitraum, für den die Lastgänge erstellt werden sollen, spezifiziert werden. Hier gibt es eine starke Abhängigkeit von der Jahreszeit und vom Wochentag (siehe Abbildung 2). Außerdem müssen Daten zum Netztyp zur Verfügung gestellt werden. Hierbei ist vor allen zwischen ländlichen und städtischen Gebieten zu unterscheiden, da in beiden

jeweils unterschiedliche Siedlungstypen vorherrschend sind. Dies hat vor allem in folgenden Punkten Einfluss auf das Simulationsmodell:

- Verteilung der Haushaltsgrößen im Netz (siehe Abschnitt 3.3)
- Soziale Faktoren (Bevölkerungsstruktur, usw.)
- Ausstattung der Haushalte

Anschließend wird sukzessive für jede Verbraucherklasse ein individueller Leitungsvektor in minutengenauer Auflösung erzeugt. Dabei wird zuerst anhand statistischer Daten geprüft, ob der betrachtete Haushalt den jeweiligen Verbraucher besitzt und falls ja, ob er ihn auch zum betrachteten Zeitpunkt auch nutzt. Es wird zwischen folgenden Verbrauchern unterschieden:

- Dauerlast durch Stand-by Verluste usw.
- Beleuchtung, unterteilt in
 - Tageszeitunabhängige Komponente
 - Tageszeitabhängige Komponente
- Kühlschrank und Gefrierschrank als taktende Lasten
- Waschmaschine und Wäschetrockner mit typischen Lastkurven
- Geschirrspüler mit typischer Lastkurve
- Kochgeräte (Herd, Backofen)
- Unterhaltung (TV, Audio) und Büro
- Umwälzpumpen
- Gegebenenfalls Durchlauferhitzer zur Warmwassererzeugung

Zur Erstellung von probabilistischen Lastgängen für die oben aufgeführten Verbraucherklassen sind Kenntnisse über deren statistisches Nutzungsverhalten unabdingbar. Erforderlich sind vor allem Kenntnisse über Erwartungswert und Streuung für folgende Daten:

- Benutzungshäufigkeiten
- Nutzungszeiten und
- Dauer der Benutzung

Die zeitliche Auflösung der erstellten Lastprofile ist aufgrund des gewählten Ansatzes veränderbar. Standardmäßig wird ein Zeitschritt von einer Minute zugrunde gelegt. Optional ist aber ein Zeitschritt von 30 Sekunden oder noch kleiner ohne Weiteres möglich.

Abschließend werden die einzelnen Leistungsvektoren pro Haushalt aufsummiert und eine Leistungsmatrix erzeugt.

4 Bewertung des probabilistischen Lastmodells

Abbildung 7 zeigt die durchschnittliche Leistung je Haushalt für eine unterschiedliche Anzahl von Haushalten. Je mehr Haushalte betrachtet werden, desto deutlicher ist eine Vergleichsmäßigung bemerkbar. Mit zunehmender Anzahl an Haushalte nähert sich die durchschnittliche Verbraucherlast ja Haushalt immer mehr einer Kurve ähnlich dem VDEW-Standardlastprofil an.

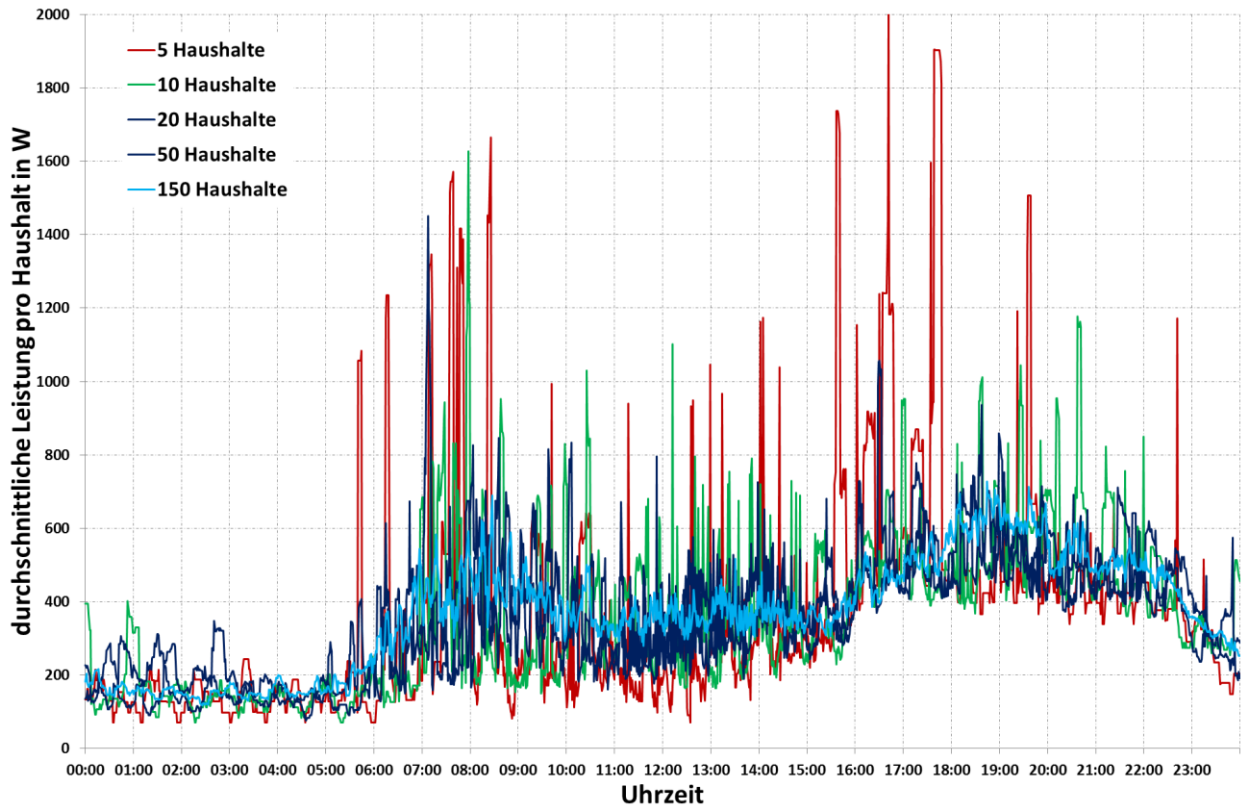


Abbildung 7: Durchschnittliche Leistung je Haushalt für unterschiedliche Anzahl von Haushalten

Eine weitere Bewertungsmöglichkeit ist in Abbildung 8 dargestellt. Für eine definierte Anzahl von Haushalten wurden jeweils Lastgänge simuliert und anschließend der Gleichzeitigkeitsgrad g in Abhängigkeit der Anzahl der Haushalte berechnet. Dieser wird mit dem theoretischen Gleichzeitigkeitsgrad g (siehe Abbildung 1 und Gleichung 1) verglichen. Es kann eine gute Übereinstimmung festgestellt werden.

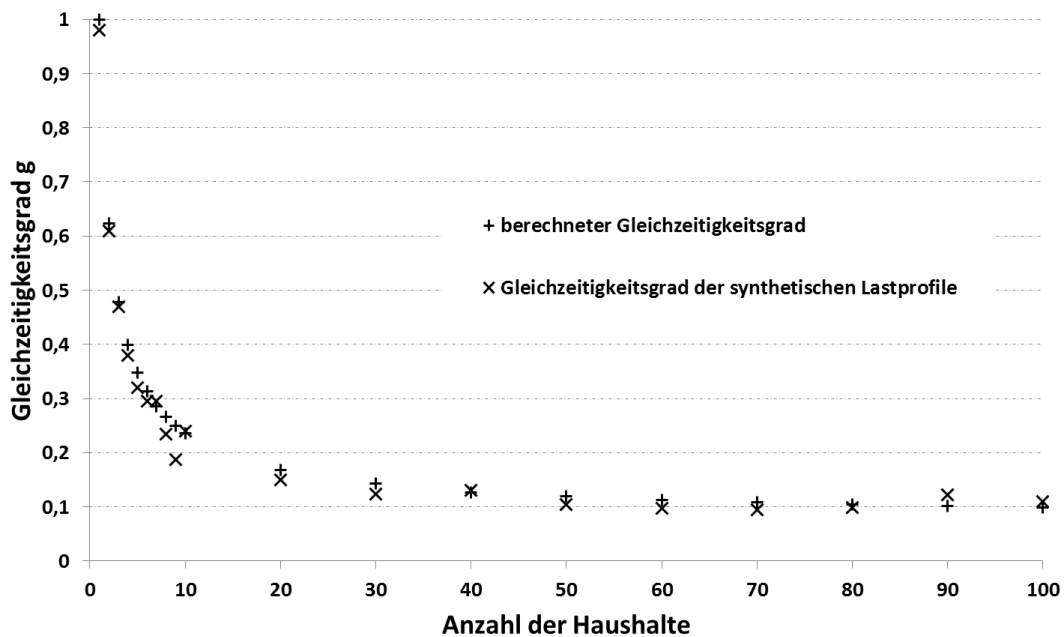


Abbildung 8: Vergleich der Gleichzeitigkeitsgrade der synthetischen Lastgänge mit der Näherung für unterschiedliche Anzahl an Haushalten

5 Zusammenfassung und Ausblick

Für die Planung und den Betrieb von Niederspannungsnetzen sind Lastmodelle nötig. In der Vergangenheit wurde außer Standardlastprofilen, die erst ab einer größeren Anzahl von Verbrauchern Gültigkeit erlangen, und der maximalen Jahreslast gemessen am Ortsnetztransformator wenig Aufmerksamkeit auf die Verhältnisse in der Niederspannungsebene gelegt. Der steigende Kostendruck durch die Anreizregulierung und die stark zunehmende Integration dezentraler Erzeuger erfordern nunmehr ein besseres Verständnis des Verbraucherverhaltens von Haushalten.

Das hier vorstellte probabilistische Verfahren zur Generierung von synthetischen Lastflüssen für Haushalte kann ein wichtiges Werkzeug zur Planung und Optimierung von Niederspannungsnetzen darstellen. Der gewählte „bottom up“-Ansatz, bei dem die jeweiligen Verbraucherklassen im Haushalt individuell betrachtet werden, ermöglicht eine große Flexibilität bei der Erstellung von Lastgängen für eine Vielzahl denkbarer Situationen. Ebenso sind mittels Abschätzungen und Prognosen zum zukünftigen Nutzerverhalten, den zukünftigen Geräteeigenschaften und der Durchdringung auch Aussagen zum zukünftigen Lastverhalten in Niederspannungsnetzen möglich.

6 Literatur

- [1] Stromnetzentgeltverordnung vom 25. Juli 2005 (BGBl. I S. 2225), geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 28. Juli 2011 (BGBl. I S. 1690)
- [2] Kaufmann, W.: Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme, VWEW-Verlag, Berlin, 1995
- [3] Pardatscher, R.; Witzmann, R.; Wirth, G.; Becker, G.; Garhamer, M.; Brantl, J.: Untersuchung zu den Auswirkungen von Photovoltaikeinspeisung auf das Nieder- und Mittelspannungsnetz, ETG-Kongress 2011, Würzburg, 8.-9. November 2011; Paper 1.3
- [4] Düwall, P.: Ermittlung der Lastganglinien bei der Benutzung elektrischer Energie durch die bundesdeutschen Haushalte während eines Jahres, VDEW Verlag 1985
- [5] Dr.-Ing. Klaus Engels: Probabilistische Bewertung der Spannungsqualität in Verteilnetzen, Dissertation RTWH Aachen, 2000
- [6] Haushaltsverbrauch VDEW 2005, VDEW, 24.01.2005
- [7] Anhang zur BDEW Presseinformation „Haushaltsgröße beeinflusst Strombedarf“, BDEW, 25. Februar 2010
- [8] BDEW (Hrsg.): Trendstudie Energiemarkt 2020 mit Ausblick auf 2030, VWEW Energieverlag, Frankfurt, 2009
- [9] Scheffler J.: Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten, Doktorarbeit, Universität Chemnitz, 2002
- [10] Kerber, G.: Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilnetzen für die Einspeisung aus Photovoltaikkleinanlagen, Dissertation, Technische Universität München, 2011

- [11] Dickert, J., Schegner, P.: Neue Ansätze der Modellierung synthetischer Lastgänge für Planung und Betrieb von Smart Grids, ETG-Kongress 2011, Würzburg, 8.-9. November 2011; Paper 1.6
- [12] Carpanetto, E., Chicco, G.: Probability distributions of the aggregated residential load, 9th International Conference on Probabilistic Methods applied to Power Systems, Stockholm, Schweden, 11.-15. Juni 2006
- [13] Herman, R., Gaunt, C.T.: A Practical Probabilistic Design Procedure for LV Residential Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 23, No. 4, 4. Oktober 2008
- [14] Dickert, J., Schegner, P.: Residential Load Models for Network Planning Purposes, Modern Electric Power Systems, 2010, Wroclaw, Polen, Paper 04.1
- [15] Probst, A., Braun, M., Tenbohlen, S.: Erstellung und Simulation probabilistischer Lastmodelle von Haushalten und Elektrofahrzeugen zur Spannungsbandanalyse, ETG-Kongress 2011, Würzburg, 8.-9. November 2011; Poster 6
- [16] Dickert, J., Schegner, P.: A Time Series Probabilistic Synthetic Load Curve Model for Residential Customers, IEEE Trondheim Powertech, Trondheim, Norwegen, 19.-23. Juni 2001