

Netzklassen mit quantitativen Unterscheidungsmerkmalen

Statistische Analyse von NS-Verteilungsnetzen und Modellierung von Referenznetzen

Statistical Distribution Grid Analysis and Reference Network Generation

Die zunehmende Anzahl von dezentralen Einspeiseanlagen fordert ein Überdenken der klassischen Planungsstrategien in allen Netzebenen und Netzklassen. Zuverlässige Aussagen über die Aufnahmefähigkeit von Netzen in der Niederspannungsebene sind nur auf Basis statistisch belastbarer Referenznetze möglich. Die Verfasser beschreiben eine Strategie zur Einteilung von Niederspannungsnetzen in typische Netzklassen mit exemplarischen Ergebnissen aus der Netzanalyse und stellen ein Verfahren zur Modellierung von Referenznetzen vor.

SUMMARY

The increasing amount of new distributed power plants demands a reconsideration of the conventional planning strategies in all classes and voltage levels of the electrical power networks. To get reliable results on loadability of low voltage networks statistically firm network models are required. A strategy for the classification of low voltage networks, exemplary results and a method for the generation of reference networks are shown.

Der Anteil der erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch der Stromerzeugung in Deutschland ist im Jahr 2006, bezogen auf den gesamten Bruttostromverbrauch, auf einen Anteil von 12,0 % gestiegen. Die installierte Photovoltaikleistung (Peak) hat im selben Jahr 2 800 MW erreicht und nimmt einen Anteil von 0,3 % am gesamten Bruttostromverbrauch ein [1].

Der Großteil dieser Photovoltaik-(PV-)Anlagen sind Kleinanlagen im Privatbesitz, die in das Niederspannungsnetz einspeisen. Dies führt zunehmend zu Netzproblemen hinsichtlich Spannungshaltung und Betriebsmittelbelastung. Um die Aufnahmefähigkeit der Niederspannungsnetze abschätzen zu können, wurden bereits Untersuchungen durchgeführt mit dem Ergebnis, dass die Integration des PV-Potenzials in ländlichen und dörflichen Strukturen Probleme bereitet [3]. Dies wird durch die Erfahrungen der Energieversorger bestätigt [2]. Bei einem weiteren Zubau von Einspeiseanlagen ist auch in Vorstadtnetzen mit Einzel- und Mehrfamilienhäusern mit Problemen zu rechnen [3].

Um qualitativ hochwertige Aussagen über die Aufnahmefähigkeit dieser Netzstrukturen ableiten bzw. die Wirksamkeit von möglichen Methoden zur Erhöhung der Aufnahmefähigkeit beurteilen zu können, ist es notwendig, die Berechnungen an einer möglichst großen Anzahl von Beispielnetzen oder an statistisch belastbaren Referenznetzen durchzuführen.

Bisher sind keine Referenznetze für die genannten Netzstrukturen bekannt. In der Regel werden exemplarische reale Netze [3], einzelne Netzstrahlen [2] oder aus bekannten technischen Randbedingungen ermittelte, computergenerierte Netzstrukturen [4] als Berechnungs-

grundlage verwendet. Verlässliche Aussagen über die Aufnahmefähigkeit von Netzen und möglichen Verbesserungsmaßnahmen sind jedoch nur aus der Untersuchung der vorhandenen Netzbasis abzuleiten. Dies erfordert entweder Berechnungen von sehr vielen realen Netzen oder von wenigen, entsprechend aussagekräftigen Referenznetzen. Um solche Referenznetze als Basis für allgemeingültige Aussagen modellieren zu können, wurde eine statistische Analyse einer Vielzahl von realen Netze durchgeführt.

Verfahren

Um die große Menge der vorhandenen Netzparameter statistisch auswerten zu können, ist es notwendig, die zu betrachtenden Netze zu digitalisieren. Eine manuelle Eingabe ist sehr zeitaufwendig und fehleranfällig. Deshalb wurde ein halb automatisches Verfahren zur Digitalisierung der wesentlichen Parameter von Niederspannungsnetzen entwickelt.

Netzrelevante Größen wie Transformatorstationen, Hauptleitungen und Kabelverteiler werden im gescannten Lageplan eines Ortsnetzes manuell markiert (*Bild 1*) und danach automatisch digitalisiert. Eine Auswerterroutine ermittelt Längen und Abzweige der Hauptleitungen sowie den wahrscheinlichsten Weg der Hausanschlussleitung abhängig von der im Netz am häufigsten auftretenden Anschlussart (Kabelverteiler- oder Muffenanschluss).

Im Einzelfall können durch dieses Verfahren bei der Ermittlung der Hausanschlusslängen zwar erhebliche Abweichungen auftreten, die mittlere Abweichung gegenüber einer manuellen Vermessung aus dem Lageplan liegt nach Stichprobenuntersuchungen jedoch unter 10 %. Bei den ermittelten Leitungslängen aus den Lageplänen können naturgemäß keine vertikalen Längen berücksichtigt werden. Der daraus resultierende Fehler ist jedoch vernachlässigbar. Damit ist das Verfahren für eine statistische Analyse geeignet.

Statistik

Zur Untersuchung wurden von Mitgliedsunternehmen des Verbands der Bayerischen Elektrizitätswirtschaft e. V. insgesamt 87 Nieder-

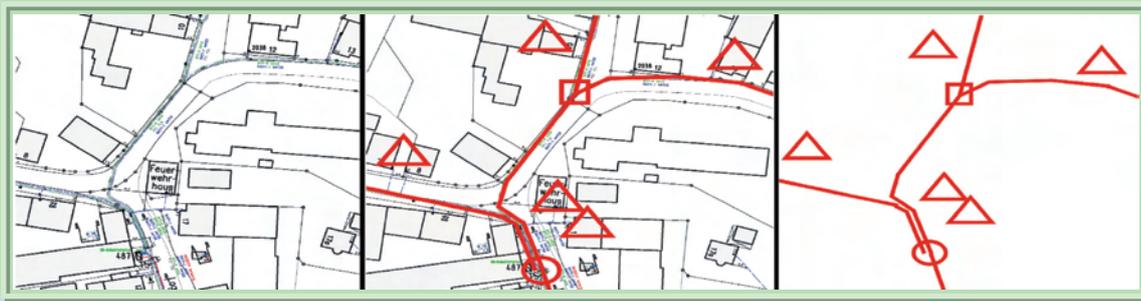


Bild 1. Beispiel des halb automatischen Verfahrens: In einem Netzplan (l.) werden die Transformatorstationen, Kabelverteiler, Hauptleitungen und Hausanschlüsse manuell markiert (m.) und dann nur diese Information (r.) rechnergestützt ausgewertet

spannungsnetze aus verschiedenen Gebieten in Bayern zur Verfügung gestellt.

Da keine eindeutigen Kriterien zur Einteilung in die Kategorie Land-, Dorf- und Vorstadtnetz bekannt sind, wurden nach dem allgemeinen Verständnis der Planer möglichst typische Netze der jeweiligen Kategorien zur Analyse verwendet (Anhaltspunkte für die Klassifikation der Netze sind in [3] beschrieben). Ziel war es, aus dem Vergleich der Netzparameter Gemeinsamkeiten bzw. Unterschiede festzustellen und so eine Definition dieser Netzklassen zu erhalten.

Ausgewertet wurden elektrische und nichtelektrische Parameter sowie Kombinationen und abgeleitete elektrische Größen (Tafel 1). Für alle Parametern wurden Weibull-Verteilungen approximiert und die Konfidenzintervalle bestimmt. Die Anzahl der untersuchten Netze wurde so lange erhöht, bis die Konfidenzintervalle ausreichend klein waren bzw. keine deutlichen Änderungen durch weitere Netze auftraten. Eine endgültige Repräsentativität kann aufgrund der unbekanntenen Grundgesamtheit nicht mit letzter Sicherheit festgestellt werden. Das beschriebene Vorgehen liefert jedoch die beste derzeit bekannte Datenbasis für Niederspannungsnetze.

Transformatoren

In der Regel werden Standardverteilnetztransformatoren verwendet [5]. Ausnahmen sind selten eingesetzte Transformatoren mit Nennleistungen von 50 bzw. 1 000 kVA. Leistungen ab 800 kVA in einer Station werden i. d. R. durch eine Parallelschaltung von Transformatoren realisiert. Die größte in den untersuchten Netzen aufgetretene

Leistung in einer Netzstation betrug 1 260 kVA.

Die Nennleistung der eingesetzten Transformatoren ist stark vom Netzgebiet abhängig (Bild 2). So werden in Landnetzen überwiegend einzelne Transformatoren kleiner Leistung eingesetzt. In Dorfnetzen ist diese aufgrund der höheren Lastdichte größer, und in Vorstadtnetzen werden i. d. R. nur 400-kVA- und 630-kVA-Transformatoren eingesetzt.

Eine eindeutige Unterscheidung der Netzklassen anhand der Trans-

formatorleistung ist nicht möglich, da die Überschneidung der einzelnen Bereiche zu groß ist.

Die anteilige Transformatorleistung je angeschlossenem Verbraucher ist unabhängig vom eingesetzten Transformatortyp und entspricht annähernd der Lastdichte im Netzgebiet. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen in den verschiedenen Netzen sind deutlich unterscheidbar (Bild 3). Die spezifische Transformatorleistung ist daher als Kriterium zur Klassifizierung der Netze gut geeignet, aufgrund

Tafel 1

Zuordnung	Name	Einheit/Werte
Hausanschluss	Leitermaterial	Typenbezeichnung
	Hausanschlusslänge	m
	Anschlussart	Freileitung, Muffennetz, Kabelverteilernetz
	Verbraucherart	Landwirtschaft, Einfamilienhaus, Sonderverbraucher
	Siedlungsdichte/Hausabstand	m
Netzstrahl	Leitermaterial	Typenbezeichnung
	Länge der Hauptstrahlen	m
	Länge der Nebenstrahlen	m, Ort der Verknüpfung
	Anzahl der Nebenstrahlen	Anzahl
	Verbraucherzahl	Anzahl
	Verteilung der Hausanschlüsse	Ort der Anschlussknoten
Transformatorstation	Verbrauchersummenwiderstand	Ω
	Transformatorkennwerte	Bemessungsleistung, relative Kurzschlussspannung
	Anzahl der Abgänge	Anzahl
	Anzahl der Hausanschlüsse	Anzahl
	Versorgte Fläche	km ²
Netzgebiet	Anzahl der Transformatorstationen	Anzahl
	Summe der Transformatorleistung	kVA
	Anzahl der Verbraucher	Anzahl

Tafel 1. Übersicht der direkt aus den Quelldaten ausgewerteten Netzparameter

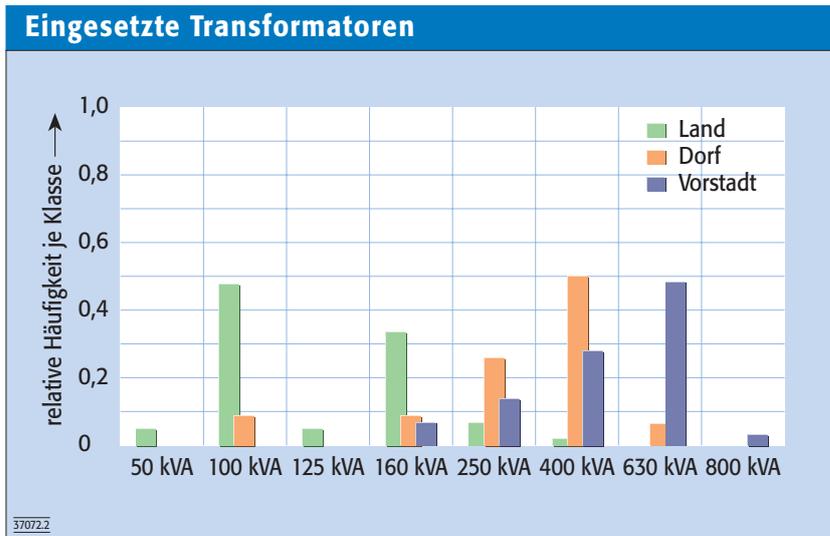


Bild 2. Eingesetzte Transformatoren in den verschiedenen Netzklassen

der sich teilweise überschneidenden Konfidenzintervalle jedoch nicht eindeutig.

Die spezifische Transformatorleistung stellt bei einer kontinuierlichen Einspeisung ohne Berücksichtigung des Verbrauchs bereits einen Grenzwert für die Belastungsfähigkeit von Niederspannungsnetzen dar. In Landnetzen stehen unter Berücksichtigung des Konfidenzintervalls im Mittel nicht mehr als 15 kVA je Hausanschluss zur Verfügung (Bild 3, Punkt A). Dies geht in Dorf- und Vorstadtnetzen weiter zurück bis auf mittlere Werte von rd.

5 kVA je Hausanschluss im Vorstadtnetz (Bild 3, Punkt B). Dies ist auf die größere Anzahl der angeschlossenen Wohneinheiten und den daraus resultierenden geringeren Spitzenlastanteil zurückzuführen, der für die Dimensionierung der Betriebsmittel maßgeblich ist [6].

Leitermaterial

Im Niederspannungsbereich werden fast ausschließlich einheitliche Querschnitte verwendet. Dies sind vor allem 150-mm²-Al-Kabel. Je nach Netzbetreiber werden auch

185-mm²-Al- oder 70-mm²-Cu-Kabel gelegt. Wenn diese Kabeltypen zum Einsatz kommen, so werden sie, mit Ausnahme von Altlasten, im gesamten Netzgebiet einheitlich verwendet. Eine Klassifizierung der Netze aufgrund des Leitermaterials ist daher nicht möglich.

Des Weiteren wurde die Häufigkeit von Niederspannungsfreileitungen untersucht. Deren Anteil im Netz ist stark von der Philosophie des Netzbetreibers abhängig. In den untersuchten Landnetzen beträgt der Längenanteil von Freileitungen rd. 50 %. In Dorf- und Vorstadtnetzen liegt dieser unter 10 %. Als Querschnitte werden vor allem 50 mm² Al, 70 mm² Al und 95 mm² Al eingesetzt, wobei der Anteil der 70-mm²-Al-Leitung doppelt so hoch ist wie der der anderen Querschnitte. Somit können Niederspannungsfreileitungen in Dorf- und Vorstadtnetzen vernachlässigt werden, nicht jedoch in Landnetzen.

Netzstruktur

Als Netzform sind vorwiegend Strahlen- und offene Ringnetze anzutreffen. Nur in Vorstadtstrukturen werden auch vermaschte Netze betrieben. Da in diesen Fällen von einer annähernd gleichmäßigen Belastung ausgegangen werden kann, wurden die Maschen zur vereinfachten Analyse am Knoten mit der zu erwartenden minimalen Spannung aufgeteilt.

Länge der Netzstrahlen

Die Analyse der Länge der Netzstrahlen oder der Anzahl derer Verzweigungen erwies sich zur Unterscheidung der Netzklassen als wenig aussagekräftig.

Verbrauchersummenwiderstand

Um die komplexen Netzstrukturen mit verschiedenen Leitungsquerschnitten miteinander vergleichen zu können, wurde der Verbrauchersummenwiderstand (komplex) definiert und für jeden Netzstrahl berechnet. Dabei dient nicht die Leitungslänge, sondern die Leitungsimpedanz als Vergleichsgröße.

In Bild 4 ist der einfachste Fall eines Netzstrahls ohne Verzweigung dargestellt. Angenommen wird, dass alle Verbraucher den konstanten Strom *I* beziehen und dass alle Leitungen vom gleichen Typ sind (Widerstandsbelag *R'* und Reaktanzbelag *X'*).

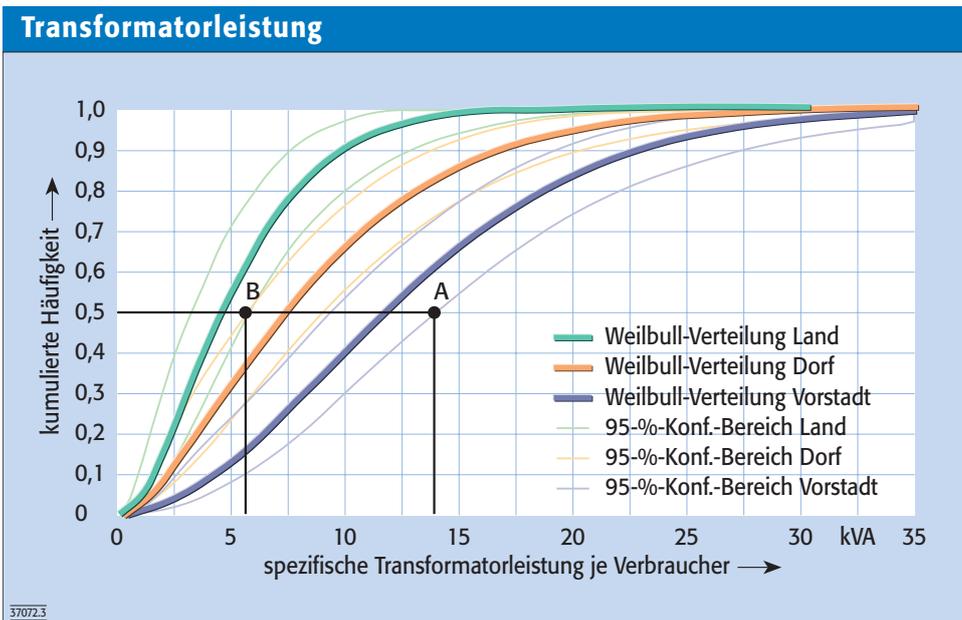


Bild 3. Transformatorleistung je Verbraucher in den verschiedenen Netzklassen

Der interessierende maximale Spannungsfall an einem Strahl mit n identischen Lasten wird nach Gl. (1) ermittelt.

Der Term in den eckigen Klammern entspricht der Summe der einzelnen Längen vom Transformator zu den verschiedenen Verbrauchern und wird daher als Verbrauchersummenlänge definiert. Das Produkt aus Strom und Verbrauchersummenlänge wird, in Anlehnung an die Mechanik, als Strommoment \underline{M} (Gl. 2) bezeichnet [7].

Bei Berücksichtigung unterschiedlicher Leitungstypen müssen für die Leitungsabschnitte unterschiedliche Widerstands- und Reaktanzbeläge berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich Gl. (3).

In diesem Fall entspricht der Ausdruck in den eckigen Klammern dem komplexen Verbrauchersummenwiderstand einer mit n gleichen Verbrauchern belasteten Leitung. Er stellt eine charakteristische Größe für die Struktur der Netzstrahlen dar.

Strukturen mit mehreren Abzweigen können, wie in [7] beschrieben, durch eine Mehrfachbewertung einzelner Lastknoten auf einen Strahl überführt werden. Somit sind Vergleiche zwischen den Netzen unabhängig von der Anzahl der Verzweigungen und der verwendeten Leitungen möglich.

Festgestellt werden konnte, dass das Verhältnis des ohmschen und induktiven Anteils des Verbrauchersummenwiderstands nahezu bei allen Netzen bei $R/X = 2,5$ liegt (Zu beachten ist, dass der Verbrauchersummenwiderstand bis zur Niederspannungssammelschiene ermittelt wird. Die Transformatorimpedanz ist nicht enthalten). Eine gesonderte Berücksichtigung des induktiven Anteils ist daher nicht erforderlich. Im Weiteren werden daher die Ergebnisse nur für den ohmschen Anteil des Verbrauchersummenwiderstands dargestellt, auf eine gesonderte Darstellung des induktiven Anteils kann verzichtet werden.

Der Vergleich der Verbrauchersummenwiderstände ergibt nur minimale Unterschiede zwischen den Netzklassen. Daraus kann geschlossen werden, dass diese unterschiedlichen Netze in Bezug auf die Spannungsänderung sehr ähnlich ausgelegt sind. Zur Klassifizierung der Netze ist dieser Parameter somit nicht geeignet.

Gleichungen

$$\Delta \underline{U} = \underline{I} \cdot (R' + jX') \cdot [(l_1 + (l_1 + l_2) + \dots + (l_1 + l_2 + \dots + l_{n-1} + l_n))] \quad (1)$$

$$\underline{M} = \underline{I} \cdot \sum_{n=1}^n l_n \quad (2)$$

$$\Delta \underline{U} = \underline{I} \cdot [n \cdot l_1 (R'_1 + jX'_1) + (n-1) \cdot l_2 (R'_2 + jX'_2) + \dots + 1 \cdot l_n (R'_n + jX'_n)] \quad (3)$$

Einfacher Netzstrahl

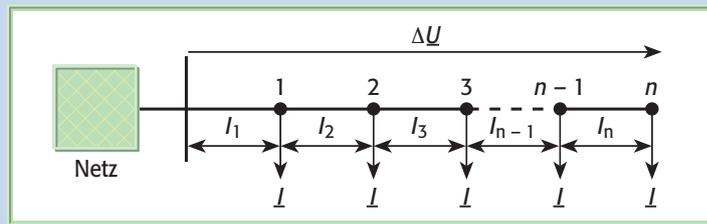


Bild 4. Beispiel eines Netzstrahls mit identischen Lasten

Bezogener Verbrauchersummenwiderstand

Wird die unterschiedliche Anzahl der Hausanschlüsse mit dem Verbrauchersummenwiderstand in Beziehung gesetzt, so ergeben sich deutliche Unterschiede. In Bild 5 wird die Anzahl der Hausanschlüsse auf den Verbrauchersummen-

widerstand eines Leitungsstrangs bezogen. Die unterschiedliche Verteilung der Werte für die verschiedenen Netzklassen ist gut zu erkennen. Bei Landnetzen resultiert der Verbrauchersummenwiderstand aus großen Leitungslängen bei wenigen Verbrauchern, bei Vorstadt-

Bezogener Verbrauchersummenwiderstand

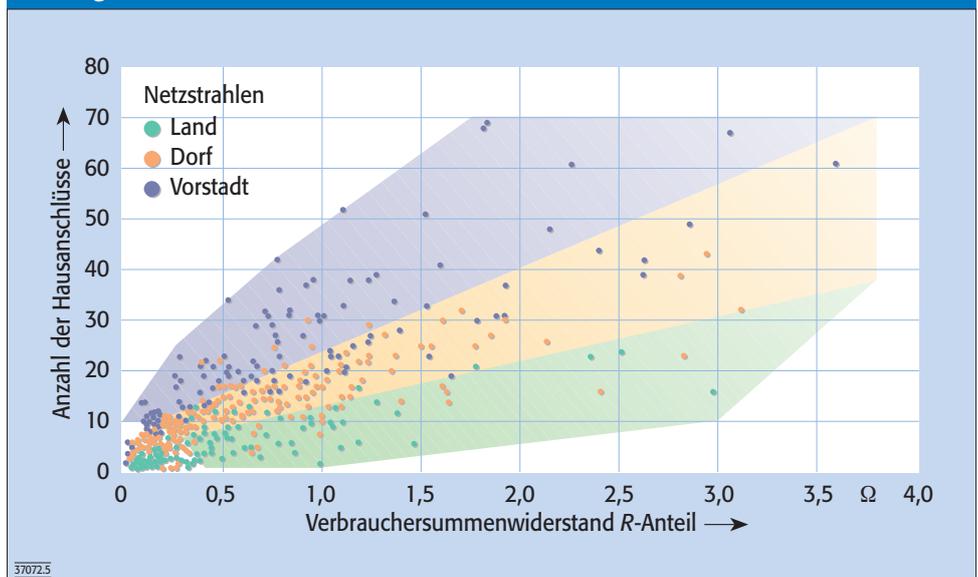


Bild 5. Anzahl der Hausanschlüsse bezogen auf den Verbrauchersummenwiderstand im jeweiligen Strang für Land-, Dorf- und Vorstadtnetze; die Gebiete des erwarteten Auftretens in den verschiedenen Netzklassen sind farblich hervorgehoben

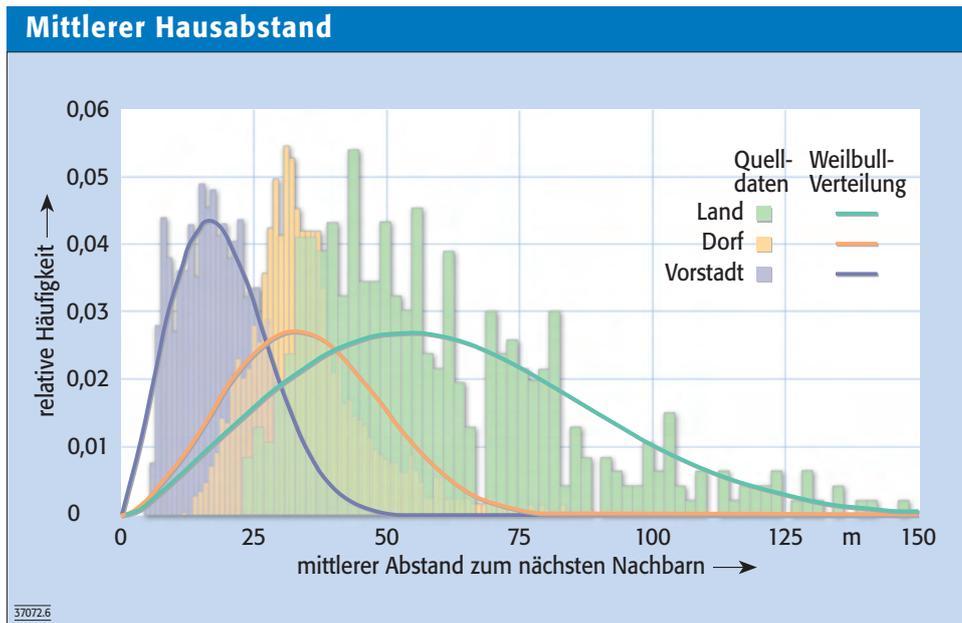


Bild 6. Histogramme und zugehörige Weibull-Verteilung des mittleren Hausabstands für Land-, Dorf- und Vorstadtnetze

len bei vergleichsweise geringen Leitungslängen.

Die Kombination aus Verbrauchersummenwiderstand und Anzahl der Hausanschlüsse eignet sich als Kriterium zur Unterscheidung der Netzklassen.

Hausanschlussleitungen

Bei Muffenanschlüssen konnte eine mittlere Hausanschlusslänge von 12 m, bei Kabelverteileranschlüssen von 32 m festgestellt werden. Zwischen den Netzstrukturen konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden. Damit ist dieser Parameter nicht zur Klassifizierung der Netze geeignet.

Mittlerer Hausabstand

Bei dieser nichtelektrischen Größe wird der mittlere Abstand eines Hauses zu seinen vier nächsten Nachbarn ausgewertet. In Bild 6 sind die Histogramme der mittleren Hausabstände nach den Netzklassen aufgetragen. Die durchgezogene Kurve stellt die approximierete Weibull-Verteilung dar. Der Median des mittleren Hausabstands ist bei Landnetzen 54 m, bei Dorfnetzen 32 m und in der Vorstadt 17 m. Mit den deutlich voneinander abweichenden Verteilungen ist der mittlere Hausabstand am besten zur Unterscheidung der Netzklassen geeignet.

Erstellung von Referenznetzen

Die Netzanalyse hat ergeben, dass die betrachteten Netze mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einer Klasse zugeordnet werden können. Somit ist es umgekehrt möglich, typische Referenznetze für jede Netzklasse zu erzeugen. Dazu sind typische Transformatorleistungen mit typischen Stranglängen sowie einer durchschnittlichen Anzahl von Abzweigen und Hausanschlüssen zu kombinieren. Diese Daten können aus den ermittelten Verteilungsfunktionen bestimmt werden. Bei einer Kombination aus den Mittelwerten der Parameter ergibt sich ein Mittelwertnetz, das den am häufigsten auftretenden Fall darstellt. Aussagen, die aus Berechnungen dieser mittleren Netze abgeleitet werden, gelten daher für den größten Teil der real vorhandenen Netze.

Zur Abschätzung der Aufnahmefähigkeit von Niederspannungsverteilungsnetzen interessieren jedoch auch extreme Netzbeanspruchungen und Konfigurationen, wie sie in der Realität gerade noch so häufig vorkommen, dass sie nicht zu vernachlässigen sind. Entsprechende Beispielnetze werden nicht aus den Mittelwerten der Netzparameter, sondern aus den 95%-Quantilen der Verteilungsfunktionen generiert. Aus verschiedenen Kombinationen solcher extremwertigen Pa-

rameter resultieren dann die Extremwertnetze. Noch extremere Situationen als in diesen Netzen sind zwar möglich, können dann jedoch als Sonderfälle behandelt werden.

Zusammenfassung

Mit einem halb automatischen Verfahren wurde eine Vielzahl von Niederspannungsnetzen der für den Zubau von PV-Anlagen relevanten Land-, Dorf- und Vorstadtnetze untersucht. Die Ergebnisse sind statistisch belastbar und liefern erstmals quantitative Unterscheidungsmerkmale zwischen den Netzklassen. Damit ist es möglich, eine wahrscheinliche Zugehörigkeit von beliebigen Netzen zu einer dieser Klassen zu bestimmen. Des Weiteren können typische Netzkonfigurationen aus den statistischen Daten abgeleitet und auf diese Weise Referenznetze erstellt werden, anhand derer aussagekräftige Untersuchungen zur Belastungsfähigkeit von Verteilnetzen durchgeführt werden können. Durch die bekannten Verteilungsfunktionen mit den Konfidenzintervallen können auch allgemeine Aussagen über die Relevanz von Berechnungs- oder Messergebnissen für Niederspannungsnetze getroffen werden.

LITERATUR

- [1] Entwicklung der erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2006. Bericht Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit Stand 2007; www.erneuerbare-energien.de.
- [2] Sakulin, M.; Fickert, L.; Hipp, W.; Stranner, B.; Renner, H.; Schmautzer, E.: Der Einfluss dezentraler Erzeugung auf die Verteilnetze. VEÖ 2005.
- [3] Witzmann R.; Kerber G.: Aufnahmefähigkeit der Verteilnetze für Strom aus Photovoltaik. ew, Jg. 106 (2007), H. 4, S. 50 – 54.
- [4] Scheffler, J.: Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten. Dissertation Technische Universität Chemnitz, 2002.
- [5] DIN 42 508: Transformatoren Öltransformatoren mit Umsteller oder mit Stufenschalter für Drehstrom 50 Hz, 12 500 bis 80 000 kVA und U_m bis 123 kV. Mai 1983.
- [6] Kaufmann, W.: Planung öffentlicher Elektrizitätsverteilungs-Systeme. VWEW Energieverlag, 1995.
- [7] Heuck, K.; Dettman, K.-D.: Elektrische Energieversorgung. Vieweg, 2002.

(37072)

georg.kerber@tum.de

www.een.ei.tum.de