



FB-2007/08

06.06.2007

**Aufnahmefähigkeit vorhandener Verteilernetze
für die dezentrale Energieerzeugung
aus Photovoltaik-Anlagen**



Kurzzusammenfassung/Zwischenbericht

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Rolf Witzmann

Bearbeiter: Dipl.-Ing. Georg Kerber

Kurzzusammenfassung/Zwischenbericht

1. Veranlassung und Aufgabenstellung

Erneuerbare Energien stehen zunehmend im Fokus der europäischen und der deutschen Energiepolitik. So wird in Deutschland bis 2020 ein Anteil der Erneuerbaren Energien zur Deckung des Stromverbrauchs von größer 20 % angestrebt. Vor diesem Hintergrund wurden gesetzliche Maßnahmen ergriffen, um den Ausbau der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen zu fördern. Hier ist insbesondere das Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbarer Energien im Strombereich (EEG) zu nennen.

Die wirtschaftlichste und damit sinnvollste Art der erneuerbaren Stromerzeugung ist stark von den regionalen Gegebenheiten geprägt. Während im norddeutschen Raum die Windkraftanlagen die erneuerbaren Energien dominieren, entwickelt sich im süddeutschen Raum aufgrund der im Bundesvergleich hohen Zahl von Sonnenstunden und der um ca. 30 % höheren Globalstrahlung neben der Biomasse insbesondere die Photovoltaik (PV) mit sehr hohen Zuwachsraten. So wird nach Angaben des Verbandes der Bayerischen Elektrizitätswirtschaft e.V. über 40 % der in Deutschland zugebauten PV-Anlagenleistung gegenwärtig in Bayern installiert. Nach Angaben der Zeitschrift „Photon“, Ausgabe 11/2006 wurde allein in 2005 in Baden-Württemberg und in Bayern zusammen eine PV-Anlagenleistung von knapp 1300 MW installiert. Dies entspricht der Nennleistung eines Kernkraftwerkes. Die PV-Anlagen speisen heute aufgrund ihrer Anlagenleistung (häufig 1-100 kW) überwiegend dezentral ins Verteilernetz in Niederspannung (230/400 V) ein.

Hinsichtlich des Anschlusses der dezentralen Energieerzeugungsanlagen wird in § 13 Abs. 1 EEG davon ausgegangen, dass bis zu einer Anschlussleistung von 30 kW der Hausanschluss grundsätzlich den günstigsten Netzverknüpfungspunkt darstellt, d.h. es wird implizit angenommen, dass die Verteilernetze in der Lage sind, Einspeiseleistungen von bis zu 30 kW je Hausanschluss ohne Netzverstärkungen aufzunehmen und zu transportieren.

Mit dem starken Zubau von PV-Anlagen insbesondere in ländlichen Strukturen wurden in den letzten Jahren verstärkt Netzausbaumaßnahmen notwendig, da die in den einschlägigen Vorschriften zum sicheren und zuverlässigen Betrieb der Elektrizitätsversorgungssysteme geforderten Grenzwerte hinsichtlich Betriebsmittelbelastung und Spannungsabweichung je Hausanschluss nicht eingehalten werden konnten.

Erstes Ziel der vorliegenden Untersuchung ist festzustellen, in wie weit das aufgrund von Dachflächen bestehende PV-Potenzial in die existierenden Verteilernetze integriert werden kann, wenn die angenommene Anschlussleistung auf einen Maximalwert von 30 kW je Hausanschluss begrenzt wird.

2. Aufnahmefähigkeit von Niederspannungs-Verteilernetzen an Hand von Beispielnetzen

Um frühzeitig grundlegende Aussagen zur Aufnahmefähigkeit treffen zu können wurden in einem ersten Schritt Untersuchungen an einzelnen Beispielnetzen durchgeführt. Zunächst wurden dabei folgende begründete Vereinfachungen angenommen:

- Vernachlässigung der Lasten an den einzelnen Hausanschlüssen
- Vernachlässigung der Stochastik der Leistungseinspeisung (zeitliche Abhängigkeit)
- Vereinfachte Berücksichtigung des PV-Ausbaupotenzials
- Keine Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufes des PV-Zubaues

Aufgrund der unterschiedlichen Struktur von Niederspannungsnetzen wurden Beispielnetze für verschiedene Netzstrukturen ausgewählt und deren Betriebsmitteldaten und Topologie in einem Simulationsprogramm abgebildet. Folgende Strukturen wurden betrachtet:

- Stadtnetz
- Blockbebauung
- Gewerbegebiet
- Vorstadtnetz (z.B. Reihenhausbebauung)
- Landnetz
- Dorfnetz

Für die betrachteten Netze wurde mit Hilfe eines geographischen Informations-Systems das Dachflächenpotenzial (vertikale Projektion) und daraus mit einem vereinfachten Ansatz des PV-Ausbaupotenzial ermittelt. Die potenziellen PV-Anlagen wurden in dem Simulationsprogramm den einzelnen Hausanschlüssen zugeordnet und als Leistungseinspeisung mit einer Limitierung auf maximal 30 kW berücksichtigt. Für die verschiedenen Netze wurden die PV-Leistungseinspeisungen kontinuierlich gesteigert, bis einer der vorgegebenen Grenzwerte hinsichtlich Spannungsband oder Betriebsmittelbelastung überschritten wurde. Die dabei ermittelte PV-Einspeiseleistung entspricht - bezogen auf die installierbare PV-Leistung - dem PV-Ausbaupotenzial, das genutzt werden kann, ohne dass ein Netzausbau vorgenommen werden muss.

Die Untersuchungen zeigen für die verschiedenen Netzstrukturen ein differenziertes Bild:

- In Stadtnetzen und bei Blockbebauung kann das vorhandene PV-Ausbaupotenzial nahezu vollständig in die bestehenden Verteilernetze integriert werden, ohne dass Netzausbaumaßnahmen notwendig sind. Ursache ist die hohe Anzahl von Hausanschlüssen, die einer gemeinsamen Dachfläche zugeordnet sind.
- Aufgrund der typischerweise hohen Anschlussleistungen von Einzelanschlüssen in Gewerbegebieten ist in solchen Netzen der Anschluss von Einspeiseanlagen mit 30 kW praktisch immer ohne Netzausbau möglich.
- Bei Vorstadt- und Dorfnetzen beträgt aufgrund der verfügbaren Dachfläche das mittlere PV-Ausbaupotenzial je Hausanschluss ca. 10 kW. Dennoch kann selbst auch diese Leistung nicht ohne weitere Maßnahmen von den bestehenden Netzen aufgenommen werden. Ursache der Limitierung ist die hohe Gleichzeitigkeit der PV-Einspeisung bei - im Vergleich zum Stadtnetz - hohem PV-Dachflächenpotenzial je Hausanschluss bei Einzel- oder Reihenhäusern.

- Bei ländlichen Strukturen stehen niedrige Lastdichten und große Leitungslängen hohen PV-Ausbaupotenzialen aufgrund großer Dachflächen (Landwirtschaften) gegenüber. Hier greift die in der vorliegenden Studie angesetzte Begrenzung auf 30 kW je Hausanschluss bei etwa jedem zweiten potenziellen Anschluss. Trotz dieses Ansatzes lässt sich je nach Netzaufbau nur ein Teil des PV-Potenzials nutzen, ohne dass ein Netzausbau notwendig ist.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Annahme, in Verteilernetzen sei für dezentrale Erzeugungsanlagen mit einer Anschlussleistung bis 30 kW der vorhandene Hausanschluss der günstigste Verknüpfungspunkt, nicht generell gilt.

Land-, Dorf- und Vorstadtnetze können als für Einspeisung aus PV „kritische“ Netze angesehen werden und sind vertieft zu betrachten.

Aufgrund der geringen Anzahl von Beispielnetzen, mit denen die Untersuchungen durchgeführt wurden, kann eine Allgemeingültigkeit der gewonnenen Erkenntnisse nicht ohne weiteres angenommen werden. Aus diesem Grund war die Entwicklung von Referenznetzen sinnvoll und notwendig.

3. Entwicklung von Referenznetzen

Um die gewonnenen Erkenntnisse auch statistisch aussagekräftiger zu machen und damit den Einfluss von spezifischen Netzkonfigurationen zu minimieren wurden Referenznetze entwickelt, welche für eine Vielzahl realer Netze in ihrer grundlegenden Struktur beispielhaft sind.

Für die Niederspannung sind keine Arbeiten bekannt, die sich mit einer systematischen Analyse verschiedener Netzstrukturen befassen. Datenerhebungen von relevanten Netzparametern wurden bisher nur vor dem Hintergrund von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für verschiedene Netzbetreiber durchgeführt. Technische Aussagen, differenziert nach verschiedenen Netzstrukturen, sind daraus nicht ableitbar. Aus diesen Gründen wurde eine eigenständige Analyse einer Vielzahl von real existierenden Niederspannungs-Verteilernetzen durchgeführt, die den genannten Strukturen zugeordnet werden können. Aus den oben genannten Relevanz- wie auch Kapazitätsgründen wurde diese Netzanalyse nur für die als kritisch erachteten Netzklassen der Land-, Dorf- und Vorstadtnetze durchgeführt.

Die elektrisch relevanten Parameter der Verteilernetze von verschiedenen bayerischen Netzbetreibern wurden mittels eines selbst entwickelten halbautomatischen Verfahrens digitalisiert und mit statistischen Methoden ausgewertet.

Die Zahl der analysierten Netzgebiete wurde soweit erhöht, bis aufgrund der resultierenden Verteilungsfunktionen keine wesentlichen Abweichungen mehr zu erwarten waren. Insgesamt wurden die Daten von 86 real existierenden Verteilernetzen berücksichtigt.

Als aussagekräftige Parameter zur Beschreibung der Strukturen Land-, Dorf- und Vorstadtnetz, die auch eine Differenzierung erlauben, konnten die Größen Siedlungsdichte, Transformatorleistung, Verbrauchersummenwiderstand unter Berücksichtigung der Verbraucherzahl sowie Leitungsparameter identifiziert werden.

Mit Hilfe der gewonnenen Daten können für die zu betrachtenden Strukturen Referenznetze abgeleitet werden, die die häufigste Netzkonfiguration darstellen (typisches Netz bzw. Mittelwertnetz). Weiterhin können Extremwertbetrachtungen mit statistisch belastbaren Parametern durchgeführt werden, die eine Aussage über den größten Teil der in Bayern vorhandenen Netze zulassen.

Vergleiche der Netzparameter der in der ersten Untersuchung verwendeten Beispielnetze mit den Ergebnissen der Netzanalyse zeigen, dass diese Beispielnetze in der Gesamtheit der Referenznetze der jeweiligen Klasse enthalten sind. Daraus kann geschlossen werden, dass die Resultate aus Kap.2, die mit wenigen spezifischen Beispielnetzen gewonnen wurden, qualitativ auch für die Referenznetze zutreffend sind.

Aus der Netzanalyse kann direkt geschlossen werden, dass eine Aufnahmefähigkeit von 30 kW je Hausanschluss bei Land-, Dorf- und Vorstadtnetzen in der Regel nicht gegeben ist. Eine Quantifizierung der Aufnahmefähigkeit ist mit Hilfe der Referenznetze möglich und wird in den nächsten Arbeitsschritten durchgeführt.

4. Qualitativer Vergleich der Möglichkeiten zur Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes bei gleichzeitiger Erhöhung der Aufnahmefähigkeit

Die Untersuchung in Kapitel 2 hat gezeigt, dass mit zunehmender Integration von PV-Einspeiseleistung im Allgemeinen zunächst die zulässige Spannung am Hausanschluss bzw. am Netzverknüpfungspunkt überschritten wird. Eine thermische Überlastung von Betriebsmitteln, zunächst der Einspeisetransformatoren und folgend der Kabel und Leitungen, erfolgt erst bei höheren Einspeiseleistungen. Diese Aussagen beziehen sich auf das derzeit einzuhaltende Spannungsband von $+6/-10\%$ der Netzennennspannung $U_{N,n}$ [1].

Die Erweiterung des zulässigen Spannungsbandes auf $+10/-10\%$ $U_{N,n}$ [2] lässt zwar eine Entspannung dieser Problematik erwarten, dennoch kann nicht ausgeschlossen werden, dass durch den Zubau von dezentralen Einspeiseanlagen unzulässig hohe Spannungen im Netz auftreten, bevor die Überlastung eines Betriebsmittels erfolgt.

Kann aufgrund einer technischen Maßnahme die Einhaltung des Spannungsbandes sichergestellt werden, so hat dies folgende Vorteile:

- Netzanschlussverfahren können stark vereinfacht werden, da keine aufwändige Berechnung der Spannungsanhebung stattfinden muss. Die Netzbelastbarkeit wird in diesem Fall nur noch durch die maximale Strombelastbarkeit der Betriebsmittel (Transformatoren und Leitungen) begrenzt, welche gut abschätzbar ist.
- In Netzen, bei denen die Spannungsproblematik vorherrschend ist, kann die Aufnahmefähigkeit für dezentrale Einspeiseanlagen erhöht werden und ein erforderlicher Netzausbau muss erst bei höheren Einspeiseleistungen erfolgen und kann damit zumindest zeitlich verzögert werden.

Eine dezentrale Einspeiseleistung von 30 kW oder mehr je Hausanschluss in allen Niederspannungs-Verteilernetzen kann durch technische Maßnahmen zur Einhaltung des Spannungsbandes jedoch im Allgemeinen nicht erreicht werden.

Folgende technische Maßnahmen zur Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes wurden diskutiert und qualitativ bewertet:

- Spannungsregelung am Ortsnetztransformator
- Blindleistungsregelung durch PV-Wechselrichter
- Erzeugungsmanagement

Die Untersuchungen wurden an den Simulationsmodellen und Beispielnetzen aus der Voruntersuchung durchgeführt und unterliegen deshalb denselben Annahmen und Einschränkungen.

4.1. Spannungsregelung am Ortsnetztransformator:

Durch einen im Betrieb regelbaren Transformator kann abhängig von Verbrauch bzw. Einspeisung die Netzspannung geregelt und somit der nutzbare Spannungsbereich erhöht werden.

Die Veränderung der Spannung erfolgt nicht durch den verursachenden Einspeiser sondern zentral an der Sammelschiene und somit für das gesamte Netz. Eine ungleichmäßige Verteilung von Einspeisung bzw. Verbrauch an verschiedenen Netzstrahlen kann den möglichen Einsatzbereich einer Transformatorspannungsregelung einschränken.

Derzeit ist auf dem Markt kein regelbarer Transformator für diesen Einsatz verfügbar. Es existieren jedoch Lösungen für ähnliche Anforderungen im Mittelspannungsnetz sowie konkrete Forschungsprojekte für diese Technologie.

Der Einsatz eines solchen Transformators im Netz obliegt dem Netzbetreiber und ist als Transformatortausch ebenfalls eine Netzausbaumaßnahme.

Die Kosten dieser Maßnahme sind im Vergleich zu den anderen anschließend angeführten Methoden erheblich.

4.2. Blindleistungsregelung durch PV-Wechselrichter:

Durch einen Bezug von Blindleistung bei gleichzeitiger Einspeisung von Wirkleistung durch die PV-Wechselrichter kann eine Verringerung der Spannungsanhebung im Netz erreicht werden. Diese Möglichkeit ist bei aktuellen PV-Wechselrichtern inhärent vorhanden, wird aber derzeit nicht genutzt.

Der Blindleistungsbezug findet direkt durch den Einspeiser statt. Damit wirkt also der Verursacher selbst der Spannungsanhebung entgegen. Dies führt jedoch in geringem Maße zu einer Erhöhung der Netzbelastung.

Die Herausforderung bei der Nutzung einer Blindleistungsregelung ist das erforderliche Regelkonzept. Die große Zahl von PV-Anlagen im Netz erfordert eine automatische Regelung. Eine Realisierung durch Kommunikationstechnik ist grundsätzlich möglich, führt jedoch zu erhöhten Kosten und Sicherheitsproblemen. Weiterhin ist eine zentrale Koordination aufgrund der Vielzahl der Anlagen sehr aufwändig. Daher ist eine autonome Realisierung im Umrichter (z.B. Kennlinienregelung) vorzuziehen. Eine für den Massenbetrieb einsetzbare Methode einer solchen Regelung muss jedoch noch entwickelt werden.

Eine erweiterte, zeitabhängige Blindleistungsregelung durch die Wechselrichter bietet darüber hinaus die Möglichkeit, auftretende Spannungsschwankungen aufgrund von Wolkenzugerscheinungen zu reduzieren.

Eine Abschätzung der notwendigen Blindleistung je PV-Anlage zeigt, dass die Mehrkosten im Vergleich zu den Anlagengesamtkosten aufgrund der inhärent vorhandenen Technologie im Wechselrichter sehr gering sind.

4.3. Erzeugungsmanagement

Das Energieversorgungsnetz muss in jedem Betriebsfall die Einhaltung des zulässigen Spannungsbandes garantieren. Dies führt zu einer Dimensionierung auf Grundlage einer maximalen Annahme, selbst wenn dieser Fall nur selten eintritt. Die Idee des Erzeugungsmanagements ist es, mehr Einspeiseleistung als bei der klassischen Dimensionierung zuzulassen und die Einhaltung des Spannungsbandes durch eine Einspeiselimitierung in diesem Fall sicherzustellen. Diese Systematik wird zum Teil beim

Anschluss von Windkraftanlagen angewendet. Es ist jedoch anzumerken, dass bei der derzeitigen gesetzlichen Regelung auch bei Windkraftanlagen mit einem solchen Ansatz ein zusätzlicher unverzüglicher Netzausbau gefordert wird.

Die grundsätzliche Eignung der PV-Wechselrichter für das Erzeugungsmanagement ist gegeben.

Aufgrund der Vielzahl von PV-Anlagen im Netz ist jedoch eine individuelle Begrenzung der Einspeisung für jede Anlage - vergleichbar mit den Windkraftanlagen - nicht möglich. Erforderlich ist eine automatische Regelung, deren Anforderungen ähnlich der Blindleistungsregelung sind.

Eine Möglichkeit der Reduktion der Spannungsschwankungen bei Wolkenzug besteht beim Erzeugungsmanagement nicht.

Durch die Reduktion der Einspeiseleistung geht grundsätzlich erneuerbare Energie verloren. Dies steht im Widerspruch zur derzeit geltenden Vorrangregelung. Die tatsächlich verlorene Energiemenge ist von der Häufigkeit des Auftretens der Limitierung abhängig. Es bleibt jedoch die volkswirtschaftliche Frage zu klären, inwieweit ein solcher Verlust toleriert wird bzw. einem Netzausbau vorzuziehen ist. Ggfs. muss eine Regelung zur Erfassung der Verlustenergie gefunden werden.

Die Kosten für die technische Umsetzung sind sehr gering. Eventuelle mit einem Erzeugungsmanagement verbundene administrative Erfordernisse (Zählung, Abrechnung etc.) sind schwer zu quantifizieren. Bei der Umsetzung muss auf eine Massentauglichkeit geachtet werden.

4.4. Ergebnis

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass technisch jede der genannten Technologien geeignet ist, für eine Einhaltung des Spannungsbandes im Netz zu sorgen. Entscheidend für die Einsetzbarkeit sind daher die Rahmenbedingungen bzw. Anforderungen, die jede der Technologien stellt.

Basierend auf dem derzeitigen Wissensstand wird eine Blindleistungsregelung durch PV-Wechselrichter favorisiert.

5. Zusammenfassung und weiteres Vorgehen

Die in § 13 Abs. 1 EEG implizit getroffene Annahme, dass in Verteilernetzen für dezentrale Erzeugungsanlagen mit einer Anschlussleistung bis 30 kW der vorhandene Hausanschluss den günstigsten Verknüpfungspunkt darstellt, ist nicht generell gültig.

Erste Untersuchungen haben gezeigt, dass Probleme insbesondere für Land-, Dorf- und Vorstadtnetze mit einem hohen Anteil an Einzel- oder Reihenhäusern und hohen Dachflächenpotenzialen zu erwarten sind.

Hier kann in der Regel nur ein Teil der angesetzten 30 kW je Hausanschluss vom Netz aufgenommen werden. Dieses Ergebnis wurde durch eine statistische Analyse von Netzen dieser Kategorien untermauert.

Zur Einhaltung des Spannungsbandes bei gleichzeitiger Erhöhung der Aufnahmefähigkeit wurden mehrere Maßnahmen anhand von Beispielnetzen miteinander verglichen. Technisch sind alle betrachteten Möglichkeiten in der Lage, eine Überschreitung des Spannungsbandes zu verhindern bis eine Überlastung der Betriebsmittel eintritt. Aufgrund der vielfältigen Einsetzbarkeit und der geringen Kosten wird eine Blindleistungsregelung mit PV-Wechselrichtern favorisiert. Eine Aufnahmefähigkeit von 30 kW je Hausanschluss ohne Netzausbau wird jedoch auch bei Anwendung dieser Methoden nicht möglich sein.

In den nächsten Arbeitsschritten sind die getroffenen Annahmen und Vereinfachungen zu überprüfen bzw. durch detaillierte Ansätze zu ersetzen. Dies gilt insbesondere für die Berücksichtigung der Lasten, die Stochastik der Einspeisung sowie das Verhalten der Betriebsmittel bei den durch die Einspeisung veränderten Belastungsprofilen.

Mit Hilfe der so gewonnenen Erkenntnisse kann unter Verwendung von statistisch belastbaren Referenznetzen die Qualität der Aussagen zur Aufnahmefähigkeit von Niederspannungs-Verteilernetzen verbessert werden. Dies erlaubt es, auch Prognosen zu den wirtschaftlichen Auswirkungen des starken Zuwachses an PV-Anlagen zu erstellen.

Parallel werden Möglichkeiten der Realisierung einer autonomen Blindleistungsregelung für PV-Wechselrichter untersucht und mit Hilfe der vorhandenen Simulationsmodelle überprüft. Damit wird das übergeordnete Ziel verfolgt, Netzanschlussverfahren stark vereinfachen zu können, da keine aufwändige Berechnung der Spannungsanhebung erfolgen muss, sowie einen erforderlichen Netzausbau in Netzen, bei denen die Spannungsproblematik vorherrschend ist, zumindest zeitlich verzögern zu können.

Literatur

- [1] IEC-Normspannungen (DIN-IEC 60038)
VDE-Verlag 2002
- [2] Quadflieg Dieter
EN 50160 (Artikel)
VDN – Nachrichten 2007
- [3] Scheffler, Jörg
Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer
Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten.
Dissertation Technische Universität Chemnitz 2002