

Solarstromeinspeisung in Niederspannungsnetzen

EBERHARD WAFFENSCHMIDT

Der Ausbau der Photovoltaik (PV) stößt immer häufiger an seine Grenzen, jedoch in verschiedenen Siedlungsbereichen unterschiedlich stark. Im Rahmen eines Kurses für Masterstudierende in Elektrotechnik der Fachhochschule Köln wurde nun untersucht, wie viel PV-Leistung in verschiedene Niederspannungsnetze eingespeist werden kann und wie viel der Bezug von Blindleistung oder das dezentrale Speichern von PV-Energie an zusätzlicher Einspeisung ermöglicht. Dabei wurden exemplarische Niederspannungsnetze für vier unterschiedliche Siedlungsbereiche „Ländlicher Bereich“, „Vorstadt“, „Innenstadt“ und „Hochhaussiedlung“ untersucht.

Als Ergebnis kann im ländlichen Bereich nur ein geringer Prozentsatz des großen Flächenpotentials ohne weitere Maßnahmen genutzt werden. Hingegen ist im Innenstadtbereich und in Hochhaussiedlungen schon heute das Flächenpotential für Photovoltaik vollständig nutzbar. Insbesondere das Speichern von PV-Energie bei gleichzeitiger Limitierung der Einspeiseleistung ermöglicht eine etwa dreifache Nutzung des vorhandenen Potentials, was vor allem in Vorortsiedlungen relevant ist.

Deutschland ist ein weltweites Vorbild beim Ausbau der Solarenergie. Inzwischen mehren sich allerdings die Meldungen von Problemen beim weiteren Ausbau. So beklagt der Solarenergie Förderverein Deutschland (SFV) eine vermehrte Anzahl an potentiellen Solaranla-

genbetreibern, denen die lokalen Netzbetreiber den Netzanschluss von Solaranlagen verweigern, weil das entsprechende Netz überlastet würde. Ein Installateur aus dem süddeutschen Raum berichtet beispielsweise in diesem Zusammenhang, dass etwa 20 % seiner Anfragen von Netzbetreibern abgelehnt werden. Auf der anderen Seite gibt es Aussagen von Fachleuten, dass noch viel „Luft“ in den Netzen ist, um neue Anlagen anzuschließen. Um diese widersprüchlichen Aussagen einzuordnen, wurden im Rahmen eines Kurses für Masterstudierende in Elektrotechnik der Fachhochschule Köln Untersuchungen durchgeführt. Ziel war es, die maximale Leistung von Solaranlagen in typischen Niederspannungsnetzen zu ermitteln. In einem weiteren Schritt wurden dann technische Möglichkeiten untersucht, die Einspeisung zu erhöhen.

Eine ähnliche Arbeit hat Jörg Scheffler schon 2002 als Dissertation („Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten“, Technische Universität Chemnitz, 18. Juni 2002) veröffentlicht, allerdings ohne die Berücksichtigung von heute gültigen Anschlussbedingungen und nicht mit realen Daten von Solaranlagen. Seine Vorgehensweise hat jedoch als Vorbild für diese Arbeit gedient.

Vorgehen zur Simulation

Siedlungstypen und exemplarische Netze

Es wird einen Unterschied machen, ob eine Solar-

anlage an ein Netz in einem dicht bebauten oder in einem dünn besiedelten Gebiet angeschlossen werden soll. Daher wurden die Anschlussbedingungen in unterschiedlichen Siedlungsgebieten betrachtet. Scheffler hat eine Klassifizierung von Siedlungsgebieten vorgeschlagen (siehe auch Bundesministerium für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, „Wechselwirkungen zwischen der Siedlungsstruktur und Wärmeversorgungssystemen“, Schriftenreihe „Raumordnung“ Band 06.044, Bonn, 1980).

Aus dieser Liste wurden vier exemplarische Typen ausgewählt (Abbildung 1):

- Typ B: Ländliche Ortschaft mit vorwiegend Gehöften
- Typ C: Ein- und Zweifamilienhausssiedlung mit niedriger Dichte, typisch für Vorortsiedlungen
- Typ H: Innerstädtischer Bereich
- Typ G: Hochhausssiedlung



a) Typ B: Ländliche Ortschaft mit vorwiegend Gehöften

Für die entsprechenden Siedlungsgebiete wurden die von J. Scheffler vorgeschlagenen exemplarischen Netze verwendet. Details zu den Netzen sind in seiner Arbeit zu finden.

Verbrauchs- und Einspeiseprofile

Um den Verbrauch zu simulieren, wurden Standard-Lastprofile von Eon [EoN Mitte, Standard Lastprofile (nach BDEW), Jan 2012: www.eon-mitte.com/index.php?parent=8847] verwendet und pro Wohneinheit (WE) auf 3.000 kWh/a skaliert.

Zur Simulation der Solareinspeisung wurde ein real gemessenes Einspeiseprofil einer Solaranlage in Kronberg im Taunus verwendet (Private Mitteilung der Messdaten der Solaranlage von Herrn Michael Brod, Kronberg, Taunus, Feb 2012, für den Zeitraum von 1.1.2011 bis 31.12.2011). Die Anlage hat eine Spitzenleistung von 4.51 kWpk, Dachneigung 30°, Abweichung von Süden 40°



b) Typ C: Vorortsiedlung



c) Typ H: Innerstädtischer Bereich



d) Typ G: Hochhausssiedlung

Abbildung 1: Exemplarische Bilder untersuchter Siedlungsgebiete

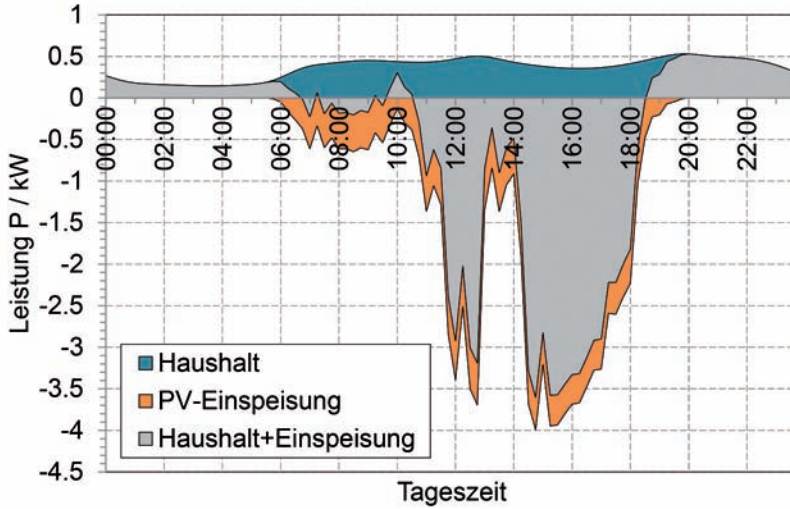


Abbildung 2: Lastprofil und Einspeisedaten für den 9. Aug. 2011, den Tag mit höchster Netzbelastung. Skalierung: Jeweils ein Haushalt und eine Solaranlage mit 4 kWpk.

nach Westen. Die Größe entspricht einer typischen Einfamilienhaus-Anlage.

Limitierungen für Einspeisung

Die Betriebsmittel wie Transformatoren und Leitungen werden mit maximal 100 % der angegebenen Nennleistungen und -ströme belastet. Die Nenndaten sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Des Weiteren darf sich die Netzspannung nach Niederspannungsrichtlinie [„Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz – Technische Mindestanforderungen für Anschluss und Parallelbetrieb von Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz“, VDE Anwendungsregel VDE-AR-N 4105, 8/2011, verbindlich gültig ab 1.1.2012.] an jedem beliebigen Knoten des Netzes bei Anschluss aller Solaranlagen um maximal +/- 3% von der Spannung ohne Anschluss von Solaranlagen unterscheiden.

Maßnahmen zur Ermöglichung höherer Solareinspeisung

Weiterhin wurden Maßnahmen untersucht, welche die installierte PV-Leistung erhöhen können.

Blindleistung

Durch den Bezug von induktiver Blindleistung

kann die Spannung am Einspeisepunkt abgesenkt werden, sodass mehr Solaranlagen angeschlossen werden können. Neue Solaranlagen müssen nach der Niederspannungsrichtlinie in der Lage sein, Blindleistung mit einem Leistungsfaktor $\cos \varphi = 0.95$ bzw. $\cos \varphi = 0.90$ (über 13 kWpk) zu beziehen.

Speichern von Solarstrom und Limitierung der Einspeiseleistung

Um mehr Solaranlagen an einen Netzzweig anschließen zu können, ist es auch möglich, die maximale Einspeisung zu limitieren. Damit keine Energie verloren geht, muss dann der Strom zu Spitzenzeiten zwischengespeichert werden und kann später, wenn die Einstrahlung zurückgegangen ist, wieder eingespeichert werden.

Der Solarenergie-Förderverein Deutschland e.V. (SFV) hat dazu einen ausführlichen Vorschlag erarbeitet (siehe auch W. v. Fabeck, Solarzeitalter 3/2012), der auch ein entsprechendes Modell für eine finanzielle Förderung dieser Methode enthält [8/2012: www.sfv.de/artikel/beitrag_von_photovoltaikanlagen_mit_integrierten_stromspeichern_zur_energiewende.htm]. Dort wird eine Limitierung der Einspeiseleistung auf 30 % der installierten Photovoltaikleistung vorgeschlagen.

Simulation

Zur Simulation der elektrischen Größen im Netz wurde das Programm NEPLAN, Vers. 5.5 [15. 8. 2012; www.neplan.ch] verwendet. Zunächst wurde der 9. Aug. 2011 als Tag der größten Netzbelastung ermittelt (siehe Abbildung 2). Für diesen Tag wurden dann Lastflussberechnungen durchgeführt. Aus detaillierten Darstellungen der kritischen Parameter der einzelnen Knoten wurden dann die ungünstigsten Bedingungen für Netzspannung und Belastungen von Leitungen und Mittelspannungstransformator ermittelt. Bei allen Simulationen wurde der Wert der Mittelspannung auf Nennspannung gehalten.

Ergebnisse

Höchste Spannungen und Ströme im Netz

Die Diagramme in Abbildung 3 zeigen die wich-

tigsten Simulationsergebnisse. Die Symbole zeigen die berechneten Punkte. In orange sind die höchsten Spannungen, die im jeweiligen Netz auftreten, dargestellt. Sie sind auf die Nennspannung von 400 V (Phase zu Phase) normiert. Sobald diese den Wert von 3 % mehr als ohne PV-Einspeisung überschreitet (braune Linie), ist zu viel Solarleistung installiert. Die grauen Kurven stellen die Stromauslastung der Kabel an der am stärksten beanspruchten Stelle dar. Wenn der Wert 100 % überschritten wird (dunkelgraue Linie), ist ebenfalls zu viel Solarleistung angeschlossen. Man erkennt, dass bei den Siedlungsgebieten Typ B (ländlich) und Typ C (Vorort) das Einspeiselimit vor allem durch zu hohe Spannungen erreicht wird. Die Strombelastung ist vergleichsweise gering. Für die Typen H (Innenstadt) und G (Hochhaussiedlung) ist die Strombelastung deutlich größer und wirkt zum Teil sogar limitierend. Weiterhin ist sichtbar, dass der Bezug von Blindleistung die

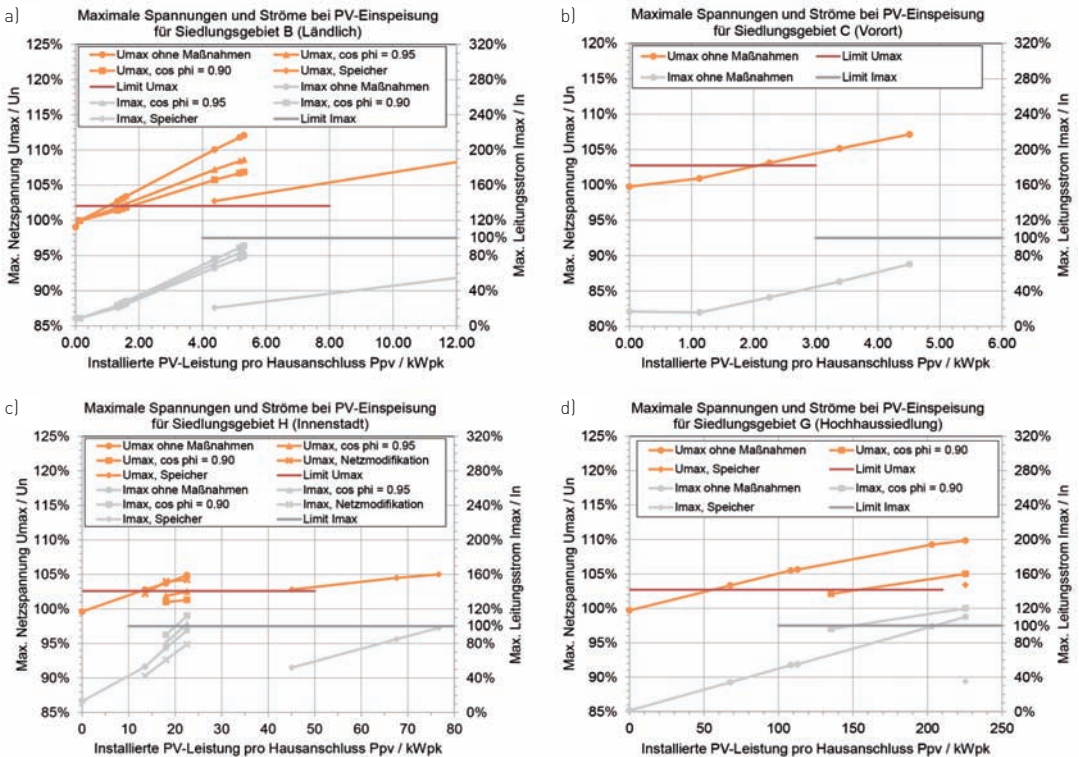


Abbildung 3: Maximale PV-Spannungen und Ströme im Netz als Funktion der installierten Solarleistung pro Hausanschluss für unterschiedliche Siedlungsgebiete

maximale Spannung (wie erwartet) reduziert, sodass das Spannungs-Limit erst bei einer höheren PV-Einspeisung erreicht wird. Gleichzeitig sieht man, dass dabei die Strombelastung auf den Kabeln steigt. Bei den Siedlungstypen H (Innenstadt) und G (Hochhaussiedlung) führt das dazu, dass nun die PV-Einspeisung nicht mehr durch zu hohe Spannungen, sondern durch zu hohe Strombelastung limitiert ist. Bei der Verwendung von Speichern mit Einspeiselimit ist dieser Effekt nicht vorhanden. Deutlich zu erkennen ist, dass die installierte Leistung nun 3.3 mal größer sein kann, ohne dass es zu einer Strom-Überlastung der Leitungen kommt.

Maximal installierte PV-Einspeisung

Die wichtigsten Ergebnisse der vorherigen Bilder sind in Abbildung 4a zusammengefasst. Hier ist die maximal mögliche installierte PV-Leistung pro Hausanschluss dargestellt. Diese PV-Leistung ergibt sich in den Graphiken in Abbildung 3a bis d aus den Schnittpunkten der ermittelten Kurven mit den Geraden für die Limits.

Man erkennt klare Unterschiede: Im ländlichen Bereich und in Vororten ist deutlich weniger Potenzial zur Einspeisung vorhanden als im städtischen Bereich. Im städtischen Bereich sind die Leitungen deutlich kürzer und kräftiger ausgelegt. Darum ist

der Spannungsabfall wesentlich geringer und die Leitungen können besser ausgenutzt werden. Im ländlichen Bereich hingegen kommt es schnell zu hohen Spannungen, denn die Leitungen sind im Mittel deutlich länger.

Mit Blindleistungsbezug zeigt sich eine leichte Verbesserung. Aber gerade im ländlichen Bereich ist die Verbesserung nur mäßig, und im Innendstadtbereich erzielt Blindleistung nicht ganz so großen Nutzen, da dann die Strombelastung das Kriterium für das Limit ist. Nur für Hochhaussiedlungen zeigt sich ein wirklich deutlicher Vorteil. Für alle Siedlungsbereiche bringt eine Speicherung mit Einspeiselimitierung am zuverlässigsten die Möglichkeit der Erweiterung. In allen Bereichen können rund 3,3 mal mehr Solaranlagen ans Netz angeschlossen werden.

Ausnutzung der vorhandenen PV-Fläche

In den verschiedenen Siedlungsgebieten steht unterschiedlich viel Fläche zur Solarenergienutzung zur Verfügung. Tabelle 1 listet die verfügbaren Dachflächen auf. Es ist nachvollziehbar, dass im ländlichen Raum rund zehnmals mehr Dachfläche pro Wohneinheit zur Verfügung steht als im dichtbesiedelten Innenstadtbereich. Die nutzbaren Flächen wurden aus Angaben zu Dachflächen ermittelt. Auf Schrägdächern lässt sich typischer-

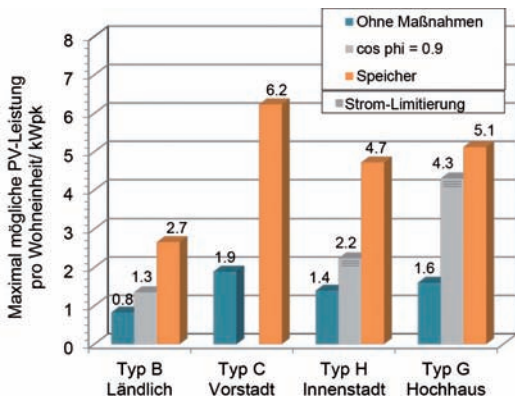


Abbildung 4a: Maximal mögliche installierte Photovoltaik-Leistung pro Wohneinheit;

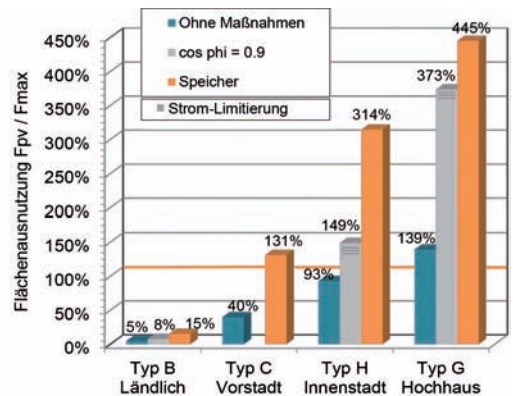


Abbildung 4b: Maximal mögliche Flächenausnutzung von möglichen Solarflächen

„cos phi = 0.9“: Bezug von Blindleistung mit Leistungsfaktor $\cos \phi = 0.9$
 „Speicher“: Solarspeichern mit Einspeise-Limit von 30% der Spitzenleistung

Typ	Gebäudegrundfläche je Wohneinheit / m ²	Wohneinheiten pro Hausanschluss	Gebäudegrundfläche / m ²	Dachform	Reduktionsfaktor für PV-Fläche	Verfügbare PV-Fläche pro Hausanschluss / m ²	Verfügbare PV-Fläche pro Wohneinheit / m ²
B	350	1.3	455	Steildach	40%	182	140
C	95	1.1	104.5	Steildach	40%	41.8	38
G	23	35	805	Flachdach	40%	322	9.2
H	30	9	270	Steildach	40%	108	12

Tabelle 1: Verfügbare PV-Flächen nach Jörg Scheffler, „Bestimmung der maximal zulässigen Netzanschlussleistung photovoltaischer Energiewandlungsanlagen in Wohnsiedlungsgebieten“

weise nur eine Dachseite nutzen und auf Flachdächern müssen die Solar-Module einen Abstand haben, um Verschattung zu vermeiden. Daher lassen sich nur effektiv rund 40 % der Grundfläche des Dachs nutzen. Die pro Leistung benötigte Fläche wurde konservativ mit 8 m²/kWpk angenommen.

Abbildung 4b zeigt nun, wie viel der vorhandenen Fläche zur Photovoltaiknutzung verwendet werden kann, bevor das Netz überlastet wird. Werte unter 100 % bedeuten, dass nur ein Teil der vorhandenen Solarflächen genutzt werden kann. Man erkennt deutlich, dass im ländlichen Bereich nur ein Bruchteil des großen Flächenpotenzials genutzt werden kann. Ohne Maßnahmen könnten nur 5 % der Flächen genutzt werden, und auch Speichern mit Einspeiselimit ermöglicht nur 15 % des Potenzials auszuschöpfen. Damit wird deutlich, dass im ländlichen Bereich nur die Verstärkung des Niederspannungsnetzes die volle Nutzung der Photovoltaik ermöglicht.

Im Vorstadtbereich sind die verfügbaren Flächen deutlich kleiner. Trotzdem können diese ohne weitere Maßnahmen nur zu rund einem Drittel genutzt werden. Speicherung mit Einspeiselimitierung hingegen kann helfen, das Potenzial voll zu nutzen. Im Innenstadtbereich und in Hochhaussiedlungen hingegen können schon jetzt die Potenziale voll genutzt werden. Mit Speicherung und Einspeiselimitierung könnte hier rund drei bis viermal mehr Photovoltaik angeschlossen werden, als Flächen zur Verfügung stehen.

Fazit

Als Ergebnis kann im ländlichen Bereich nur ein geringer Prozentsatz des großen Flächenpotenzials der Photovoltaik genutzt werden. Hier ist der Ausbau der Netzinfrastruktur alternativlos. Hingegen ist im Innenstadtbereich und in Hochhaussiedlungen schon heute das Flächenpotenzial vollständig nutzbar. Insbesondere das Speichern von PV-Energie bei gleichzeitiger Limitierung der Einspeiseleistung ermöglicht eine etwa dreifache Nutzung des vorhandenen Potenzials. Dies ist vor allem in Vorortsiedlungen relevant, denn es ermöglicht die volle Ausnutzung des dortigen PV-Potenzials ohne zusätzlichen Netzausbau.



Dr. Eberhard Waffenschmidt ist Professor an der Fachhochschule Köln mit dem Lehrgebiet Elektrische Netze.

Kontakt: eberhard.waffenschmidt@fh-koeln.de

Herrn Michael Brod wird für die Bereitstellung seiner Solardaten gedankt sowie den Co-Autoren Benjamin Klaus, Bernd Egbringhoff, Christian Knoll, Florian Eck, Ivo Trebing, Sebastian Steneberg, Stefan Schleifer, Tobias Frinken, Ulf Wahner, Uli Lück.