

# NETZVERTRÄGLICHKEIT VON PV-KRAFTWERKEN

Dr. C. Nietsch, Powerise Consult, Adlitzer Weg 9, D-91077 Neunkirchen am Brand

[Christoph.Nietsch@Powerise-Consult.de](mailto:Christoph.Nietsch@Powerise-Consult.de)

Dr. C. Schwaegerl, Siemens AG, PTD SE, Freyeslebenstr. 1, D-91052 Erlangen

[Christine.Schwaegerl@siemens.com](mailto:Christine.Schwaegerl@siemens.com)

P. Kremer, Siemens AG, A&D SE S3, Würzburger Str. 121, D-90766 Fürth

[Kremer.Peter@siemens.com](mailto:Kremer.Peter@siemens.com)

## Einführung

In Espenhain, ca. 30 km südlich von Leipzig, entstand eines der größten PV-Kraftwerke der Welt mit 5 MWp elektrischer Leistung. Auf einer ehemaligen Kohlestaubdeponie errichteten die GEOSOL Gesellschaft für Solarenergie mbH, die Shell Solar GmbH und die WestFonds Immobilien-Anlagengesellschaft mbH den „Solarpark Leipziger Land“. Dieser Solarpark hat eine Fläche von 16 Hektar und umfasst 33.264 Solarmodule und wurde in Pfahlbauweise auf neuartigen Robinienholz-Gestellen errichtet.

Der Solarpark Leipziger Land steht auf einem ca. 22 Hektar großen Kohlestaubabsetzbecken, das über 40 Jahre aus dem Braunkohleabbau entstand. Durch den Bau des PV-Kraftwerks konnte das Gelände einer wirtschaftlichen und sinnvollen Nutzung zugeführt werden.

In den letzten Jahren stieg die Anzahl von PV-Kraftwerken mit großen Leistungen (> 1 MWp) stark an. Die Einspeisung von Erzeugerleistungen aus PV-Kraftwerken mit installierten Leistungen größer als 5 MWp kann den lokalen Bedarf übersteigen und damit die Energieflussrichtung ändern. Dies hat erheblichen Einfluss auf die lokale Netzqualität. Am Beispiel des realisierten 5 MWp PV-Kraftwerks wird die Auslegung zur netzverträglichen Anbindung an ein 20 kV-Netz erläutert, mit der die in den entsprechenden Anschlussrichtlinien festgelegten Grenzwerte eingehalten werden. Das Europäische Forschungsprojekt EU-DEEP versucht wegweisend, Möglichkeiten aufzuzeigen, Probleme bei der Netzintegration zu vermeiden und somit den Anteil dezentraler Erzeugungsanlagen an der Gesamterzeugung europaweit zu erhöhen.

## Konzept

Auf Grund der begrenzten Bodenbelastbarkeit des Kohlestaubeckens wurden die Containerstandorte an den Rand des Beckens und die 20 kV-Schaltanlage vor das Gelände platziert. Jeweils zwei Wechselrichter-Container mit 3 x 400 kVA SINVERT solar M/S/S Wechselrichtern nehmen die PV-Leistung von 2 x 1,25 MVA an einem Standort auf und speisen direkt über ausgelagerte 20/0,4 kV-Transformatoren in das 20 kV-Netz (Bild 1).

Im vorgelagerten 20 kV-Schaltanlagegebäude sind die Leistungsschalter mit Schutz für die Transformatorabgänge von 50 kVA sowie die SIMATIC-Steuerung über intelligente SIPROTEC-Schutz- und Feldleitgeräte untergebracht (Bild 2).



Bild 1 Solarpark Leipziger Land; Espenhain

## 20 kV-Netzanalyse

Zur Analyse der 20 kV-Netzeinspeisung und der Auslegung der Betriebsmittel wurde das Netz im Programmsystem PSS<sup>TM</sup>SINCAL modelliert. Das Modell beginnt bei dem 110/ 20 kV-Umspannwerk und reicht bis zu den 0,4 kV-Netzknoten (Bild 3). Mit Hilfe des Netzmodells wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

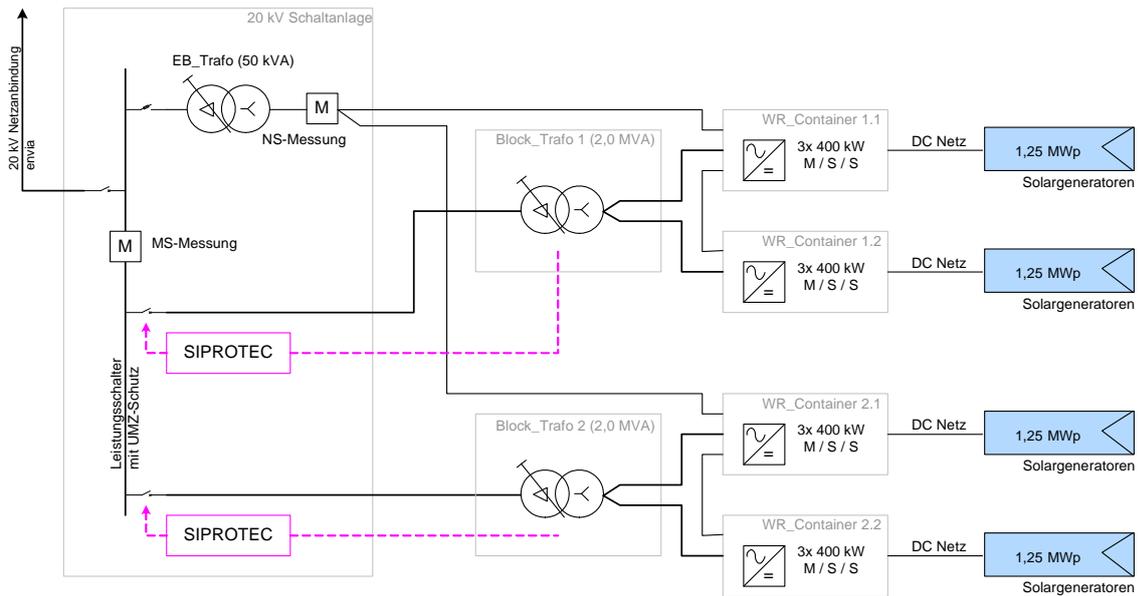


Bild 2 PV-Kraftwerk Anlagenkonzept

- Berechnung der maximalen Spannungsanhebung am Anschlusspunkt bei Normalbetrieb des 20 kV-Netzes und maximaler Solarleistung zur Einhaltung der Grenzwerte nach VDEW Richtlinie „Eigenerzeugungsanlagen am Mittelspannungsnetz“
- Berechnung der minimalen und maximalen Spannung am Wechselrichter unter Berücksichtigung des Netzspannungsbandes und Auslegung des Blocktransformators zur Sicherstellung der Einspeisung bei unterschiedlichen Betriebszuständen und zur Optimierung des Einspeisewirkungsgrades
- Berechnung und Bewertung des maximalen Spannungseinbruchs am Anschlusspunkt beim Zuschalten eines ausgelagerten Transformators
- Ermittlung der Kurzschlussbeanspruchung der Betriebsmittel durch die Berechnung der maximalen Kurzschlussströme ( $I_{k3max}$ ,  $i_{pmax}$ ) und Nachweis der Kurzschlussfestigkeit der Anlagen
- Auswahl geeigneter Schutzsysteme und selektive Einstellung der Schutzgeräte auf Basis der lokalen Netzsituation, des überlagerten Schutzes und der Sternpunktbehandlung des Netzes
- Ermittlung und Bewertung der Oberschwingungsbelastung am Netzanschlusspunkt zur Einhaltung der Grenzwerte nach VDEW Richtlinie.

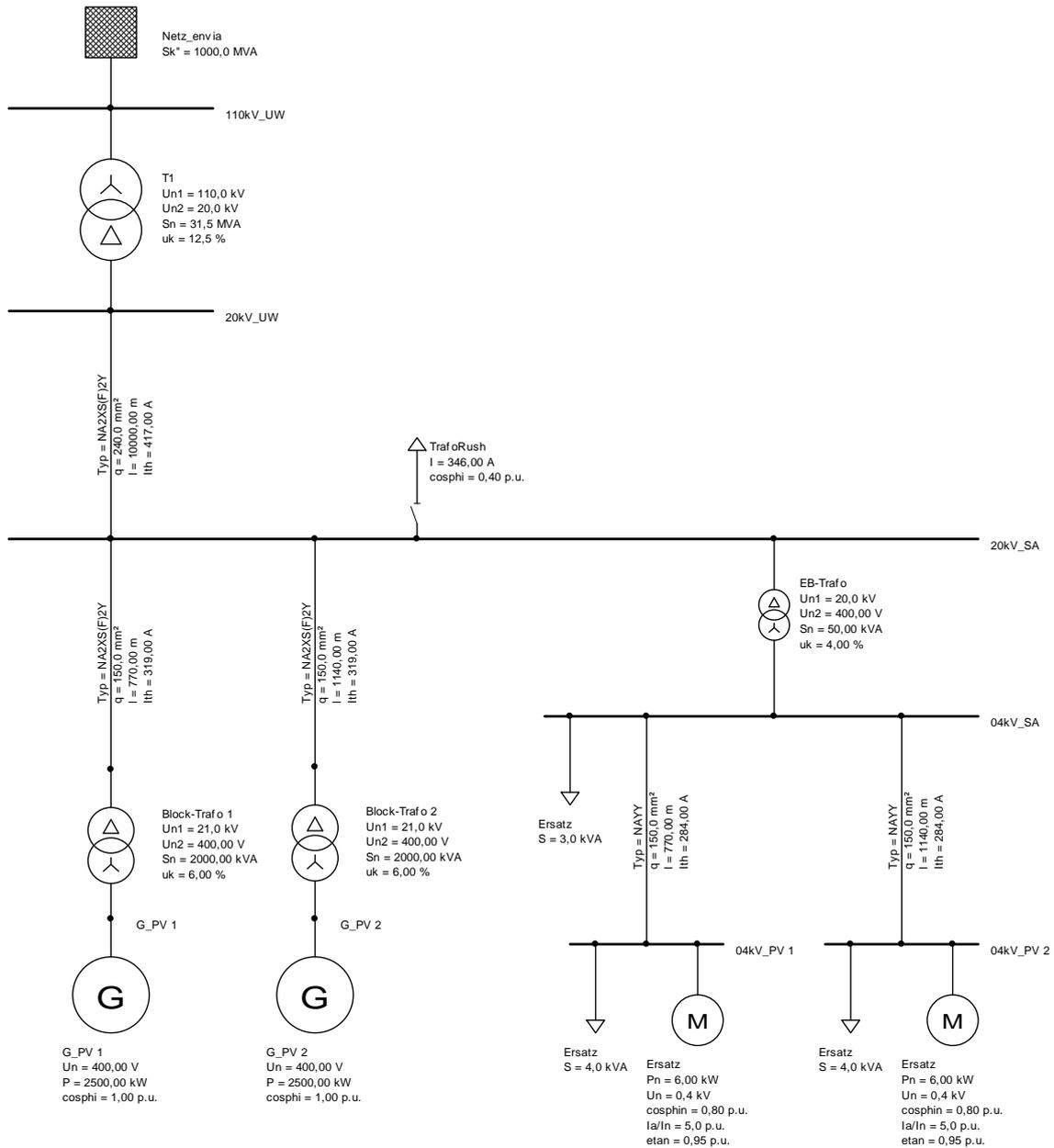


Bild 3 Netzmodell

Darüber hinaus werden die Rückwirkungen hinsichtlich Flicker, Störspannungen und Auswirkungen auf Tonfrequenz-Rundsteueranlagen berücksichtigt.

## 0,4 kV-Netzanalyse

Durch die große flächenmäßige Ausdehnung des PV-Kraftwerks (Kabellängen 700 bis 1.140 m) und des hochohmigen Untergrunds des trockenen Kohlestaubeckens

kommt der Auslegung des 0,4-kV-Netzes hinsichtlich Spannungsqualität, Kurzschlusschutz und Personenschutz besondere Bedeutung zu (Bild 4). Für das 0,4 kV-Netz wurden daher folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Berechnung und Prüfung der maximalen Spannungsfälle im 0,4 kV-Netz im Normalbetrieb und bei Motoranlauf (Lüfter)
- Auslegung der Betriebsmittel
- Berechnung der maximalen und minimalen Kurzschlussströme am Einbauort der Schutzgeräte ( $I_{kmax}$  und  $I_{kmin}$ )
- Auswahl geeigneter Schutzgeräte und Nachweis der Schutzzeiten und der Selektivität im Staffeldiagramm
- Maßnahmen zur Begrenzung der Berührungsspannung, z.B. durch zusätzliche wirksame Erdungsverbindungen zwischen den Containern und deren Ringerdernern sowie zusätzlich zwischen Mittelspannungsstation und beiden Trafostationen.

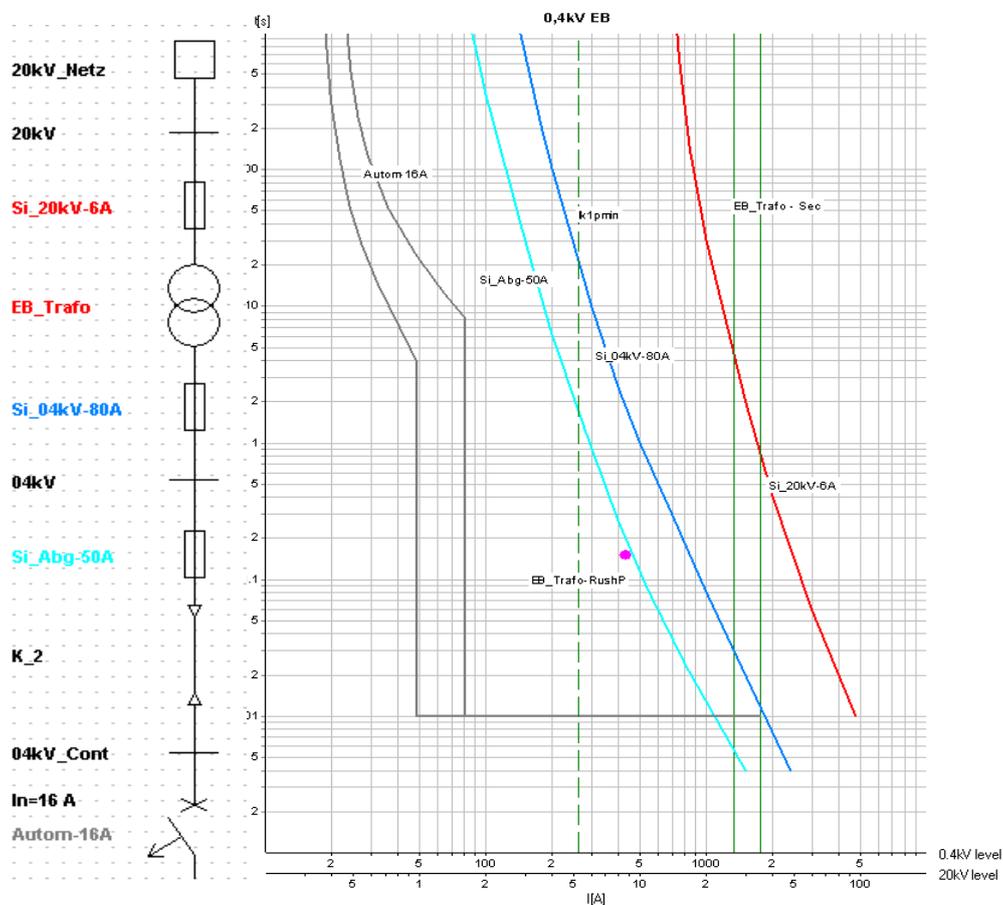


Bild 4 Eigenbedarf, Schutzkonzept (Staffeldiagramm) und Selektivitätsnachweis

## **EU-DEEP - Gegenstand der Forschungsprojektes**

Das europäische Forschungsprojekt EU-DEEP (The birth of a European Distributed EnErgy Partnership that will help the large-scale implementation of distributed energy resources in Europe) ([www.eu-deep.com](http://www.eu-deep.com)) untersucht auf technischer, wirtschaftlicher und regulatorischer Ebene Wege, den gegenwärtigen Durchdringungsgrad mit dezentralen Erzeugungsanlagen (DEA) zu erhöhen. Mit einem Gesamtaufwand von mehr als 2500 Mannmonaten versuchen 39 Europäische Partner von Energieversorgungsunternehmen (Gaz de France, Tractebel, Iberdrola, RWE Energy, Energetyczny Lodz, EA Cyprus, ...), Industrie (Siemens, Tedom, SAFT, Bowman, ...) und von Universitäten/Forschungsinstituten (Uni Valencia, Uni Lund, TU Riga, NTU Athens, KU Leuven, VTT Finland, Labein, Laborelec, STRI, Technical Research Council of Turkey, ...) nahezu alle derzeit relevanten Fragen bei einer erhöhten Einbindung dezentraler Erzeugung zu beantworten.

Das Gesamtbudget dafür liegt bei 28,9 Mio. €, wovon 15 Mio. € von der Europäischen Union im 6. Forschungsrahmenprogramm als Förderung zur Verfügung gestellt werden. Das Projekt startete am 01.01.2004, abschließende Forschungsergebnisse sind für den 30.06.2009 geplant.

Die komplexen Fragestellungen werden in verschiedenen Arbeitspaketen

- WP1 Demand description and modelling
- **WP2 Grid and market integration**
- WP3 Local Trading Strategies
- WP4/5 Technology R&D and Validation
- WP6/7 Training and Dissemination
- WP8 Construction of the European Competence Group, Business models

untersucht. Aus technischer Sicht sind die Ergebnisse im Arbeitspaket 2 zur Netzintegration dezentraler Erzeugung relevant und werden in diesem Beitrag näher erläutert. Um weitere Einsatzmöglichkeiten für dezentrale Anlagen zu schaffen, werden in anderen Arbeitspaketen systematisch Zielsegmente analysiert. Basierend auf einer umfangreichen Datenbank von Erzeugungs- und Verbrauchsdaten werden Geschäftsmodelle zum Einsatz dezentraler Erzeugung untersucht. Einen weiteren Schwerpunkt des Projektes bilden Untersuchungen, wie die Verbrauchsseite, z.B.

durch verschiedene Methoden zum Lastmanagement, in die Versorgungsaufgabe eingebunden werden kann.

## **EU-DEEP Aktuelle Ergebnisse – Untersuchungsmethodik**

Ziel des Arbeitspakets 2 zur Netz- und Marktintegration ist eine systematische Untersuchung aller Auswirkungen der DEA – gegenwärtig und in Zukunft –, wo eine größere Anzahl dezentraler Anlagen erwartet wird. Auch die Wirtschaftlichkeit und der Einfluss der Regulierung werden dabei berücksichtigt. Um trotz der Vielzahl der am Projekt beteiligten Partner vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, wurden Beispielnetze aus verschiedenen Europäischen Regionen und Simulationsmodelle für DEA festgelegt, mit denen sowohl stationäre als auch dynamische Untersuchungen durchgeführt werden.

Um allgemeingültige Antworten zu finden, wie viel erneuerbare Energien das Netz verträgt, wurde das Konzept der Netzaufnahmekapazität entwickelt. Es ermöglicht, Grenzen einer weiträumigen Integration zu identifizieren, sofern sich durch die Einbindung mehrerer dezentraler Anlagen die Qualität des Systems verschlechtert. Die Methode ist ebenfalls anwendbar, wenn DEA in zunächst begrenzter Anzahl Vorteile für den Netzbetrieb bieten; dies ist z.B. der Fall, wenn DEA durch gleichzeitige verbrauchsnahe Einspeisung eine starke Auslastung in Verteilnetzen reduzieren, bei weiter steigender Einspeisung jedoch durch Rückspeisung in überlagerte Netze unzulässige Spannungsüberhöhungen verursachen.

Der Anteil (Durchdringungsgrad) der Anlagen kann dabei einen Absolutwert (z.B. die Anzahl der installierten Erzeugungseinheiten), die installierte Leistung aller Einheiten oder die erzeugte Energie der Einheiten darstellen. Eine Normierung wird erforderlich, um relative Ergebnisse unabhängig von Art und Größe der untersuchten Systeme vergleichen zu können. Je nach untersuchtem Phänomen bietet es sich dabei an, den absoluten Leistungswert durch einen unterschiedlichen Referenzwert (Nennleistung oder erzeugte Energiemenge der Anlagen, Kurzschlussleistung des Systems, ...) zu dividieren.

Die Aufnahmekapazität des Netzes für dezentrale Anlagen ist erreicht, wenn ein frei wählbarer Index (z.B. Spannungserhöhung, Auslastung der Leitungen, Verluste ...)

einen festgelegten Grenzwert z.B. entsprechend gegebener Anschlussbedingungen überschreitet (Bild 5). Zusätzliche Investitionen in das Netz (z.B. durch Netzverstärkungen oder durch geeignete Spannungsregelung) erhöhen meist den Anteil dezentraler Anlagen, der netzverträglich in bestehende Netze eingebunden werden kann. Mehrere Vergleichskriterien sind erforderlich, um das gesamte System der Übertragungs- und Verteilungsnetze zu beschreiben, wie z.B. Qualitätskriterien (Verfügbarkeit des Netzes, Versorgungssicherheit, Spannungsbänder, Oberschwingungen, ...), Gesamtkosten für den Netzbetrieb pro angeschlossenem Kunden oder Netzananschlussgebühren.

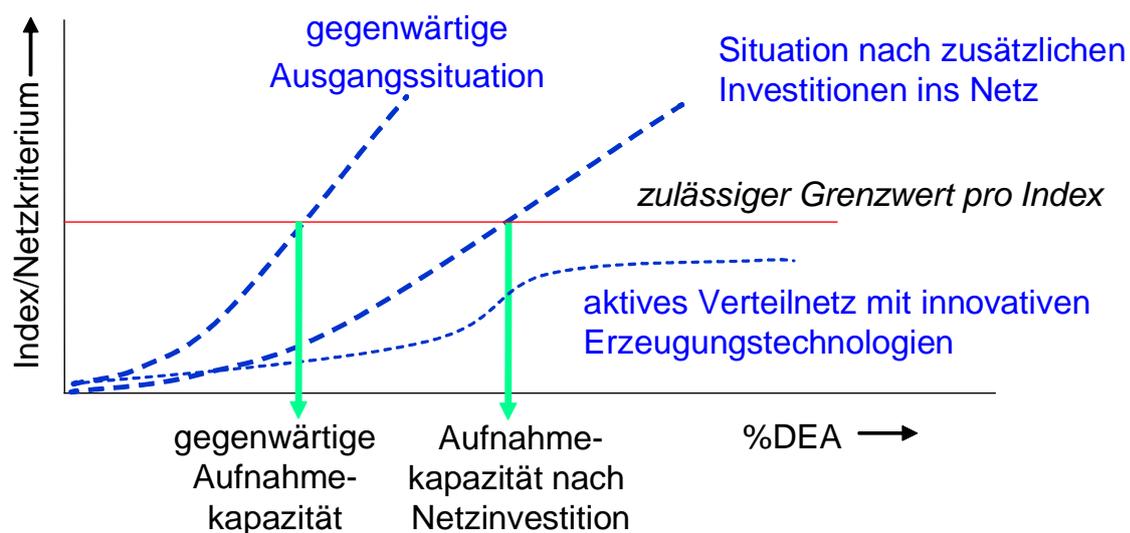


Bild 5 Konzept der Netzaufnahmekapazität für dezentrale Erzeugungsanlagen

## EU-DEEP Auswirkungen dezentraler Erzeugung

Die Auswirkungen dezentraler Erzeugungsanlagen auf das Netz hängen sowohl vom Durchdringungsgrad als auch von der verwendeten Technologie (Wechselrichter, Synchron- oder Asynchrongenerator) ab. Im Gegensatz zur konventionellen Erzeugung mit geplanter Platzierung werden kleinere regenerative Anlagen entsprechend der Verfügbarkeit der Ressourcen bzw. freier Stellflächen errichtet, die geographisch und elektrisch meist weit von bestehenden Lastzentren entfernt liegen.

In nahezu allen europäischen Ländern existieren unterschiedliche Regeln und Richtlinien, die zum Anschluss dezentraler Erzeugungseinheiten erfüllt werden müssen.

Da dies jedoch allgemeine Regelungen sind, wird damit oft unnötig die Aufnahmekapazität der Netze begrenzt. Ganz im Gegenteil ließen sich teilweise durch sorgfältige Dimensionierung und Lokalisierung sowie bei Verwendung qualitativ hochwertiger Anlagen – wie beim SINVERT gegeben - klare Vorteile für Steuerung, Betrieb und Stabilität der Netze erzielen.

PV-Anlagen haben den Nachteil, dass das Erzeugungsprofil wetterabhängig ist und sich nur mit einem zusätzlichen Speicher an den lokalen Lastbedarf anpassen lässt. Lässt sich die Leistungsbilanz nicht lokal ausgleichen, treten Probleme mit der Spannungshaltung ein, z.B. ein unzulässiger Spannungsanstieg bei einem Überschuss an Erzeugungsleistung. Mit einer intelligenten Steuerung der Blindleistungsabgabe durch den Wechselrichter lässt sich die Spannung im vorgegebenen Spannungsband halten.

Weitere Probleme stellen kurzzeitige Überlastungen der Leitungen auf Grund der Leistungsschwankungen der regenerativen Erzeugung dar. Um die Netze wirtschaftlich optimal zu planen und eine maximale Anzahl dezentraler Anlagen möglichst sinnvoll einzubinden, reichen einfache Netzberechnungen, die nur worst case Situationen (maximale Last bei minimaler Erzeugung und umgekehrt) untersuchen, nicht mehr aus. Stochastische Netzberechnungen mit Erzeugungs- und Lastprofilen werden erforderlich, die bei der Auswahl möglicher Lösungen unterstützen.

Verteilnetze sind aus historischen Gründen nach gegebenen technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgelegt. Höhere Durchdringungsgrade mit DEA oder manche Einspeisetechnologien wie z. B. Wechselrichter können dadurch Probleme verursachen. Ein neues Design der Netze auch auf Basis der stochastischen Netzberechnungen, aktivere Komponenten sowie eine weitergehende Steuerung und Überwachung der Verteilnetze mit intelligenter und v.a. preiswerter kommunikativer Anbindung wird erforderlich; Beispiele für solche aktiven Elemente können Erzeugungseinheiten mit beliebig steuerbarer Blindleistungsabgabe sein. Probleme mit der Spannungshaltung lassen sich hierbei größtenteils lösen. Um auch noch kurzzeitige Überlastungen des Netzes zu vermeiden, bieten sich auf der Verbraucherseite geeignete Lastmanagementmaßnahmen an. Kunden dafür lassen sich bei gegebener Wirtschaftlichkeit finden.

Aktive Verteilnetze werden sicher einen Beitrag zu einem effizienteren, intelligenteren und zuverlässigeren Netzbetrieb liefern. Anlagen mit intelligenten Wechselrichtern - wie der beim Solarpark Leipziger Land eingesetzte SINVERT - sind dazu in höherem Maße erforderlich.

## **Technologie und Netzbetrieb**

Das PV-Kraftwerk wurde mit zwölf Wechselrichtern SINVERT solar 400 im Master-Slave-... Betrieb ausgerüstet, die direkt auf zwei 20/0,4 kV-GEAFOL Transformatoren (2 MVA) speisen. Mit Hilfe der intelligenten Wechselrichter-Regelung und der übergeordneten SIMATIC-Steuerung wird eine netzverträgliche Einspeisung der PV-Leistung sichergestellt (Bild 6):

- Phasensymmetrie-Regelung sorgt für die symmetrische Einspeisung in das Netz; Vermeidung von Gegen- und Nullsystemen.
- $\cos \varphi$ -Regelung erhöht die Spannungsqualität vor Ort und stellt bei Bedarf kapazitive oder induktive Blindleistung zur Verfügung.
- Die Blindleistungsregelung greift aktiv in die Spannungshaltung des Netzes ein und kann die Spannung an einem ausgesuchten Netzknoten regeln.
- Die aktive Oberschwingungstrom-Steuerung reduziert die Oberschwingungsbelastung am Anschlusspunkt und ermöglicht auch in vorbelasteten Netzen ein PV-Einspeisung.
- Automatische Nachtabschaltung über die SIMATIC/SIPROTEC-Steuerung reduziert die Verluste und erhöht den Gesamtwirkungsgrad (Performance Ratio PR) der Anlage.
- Inselbetrieb beim Anfahren und synchrones Zuschalten der Transformatoren vermeidet Spannungseinbrüche und ermöglicht den Betrieb auch an schwachen Netzausläufern.
- Begrenzung der Einspeiseleistung bei Erreichen der Maximalspannung, z.B. bei Schwachlast am Wochenende und hoher PV-Leistung, reduziert die Abschalthäufigkeit, erhöht den Gesamtwirkungsgrad und vermeidet Leistungssprünge im Netz.

- Das zentrale Bedien- und Beobachtungssystem (B&B) (PV-WinCC) mit der SIMATIC-Steuerung sind kommunikationsfähig und ermöglichen bereits heute eine bidirektionale, redundante Verbindung (via Internet, ISDN und GSM) zu einer übergeordneten Netzautomatisierung in der Zukunft.

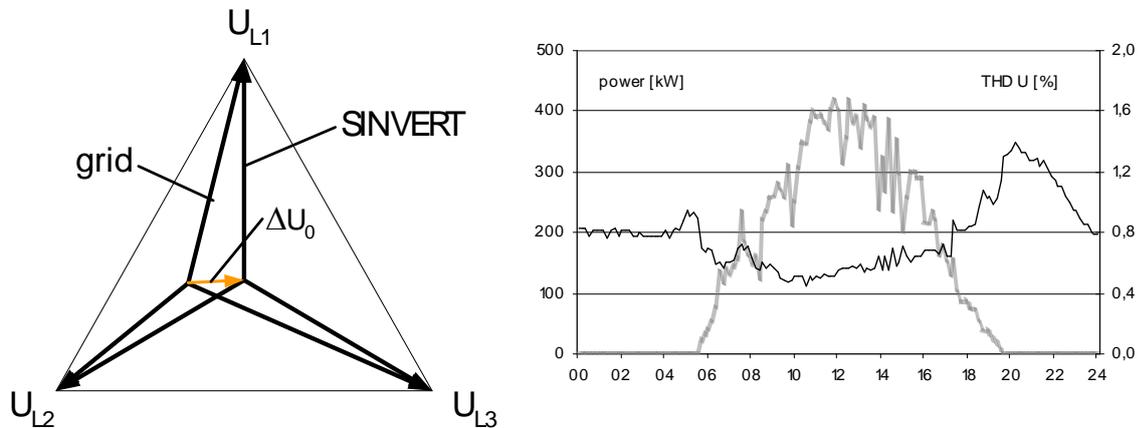


Bild 6 Symmetrieregulierung und THD-Verbesserung am Netzanschlusspunkt

## Ausblick

Die Abstimmung aller Komponenten des PV-Kraftwerks unter Einbeziehung intelligenter Automatisierungstechnik und die Abstimmung der Betriebsmittel auf der Basis einer lokalen Netzanalyse ermöglichen den technisch sicheren und wirtschaftlichen Betrieb mit hohem Gesamtwirkungsgrad über die Lebensdauer der Anlage und sorgen für eine hohe Netzverträglichkeit.

Gegenwärtig sind noch weitere Features im 10 MWp-PV-Kraftwerk Pocking realisiert wie z.B. Blindleistungsregelung oder synchrones Anfahren.

Um eine erhöhte netzverträgliche Einbindung mit dezentralen Erzeugungsanlagen zu ermöglichen, ist es ein Ziel, das Verhalten der statischen Wechselrichter dem einer Synchronmaschine anzunähern (Leistungseinspeisung nicht über Spannungserhöhung, sondern durch virtuelle Veränderung des Polradwinkels).

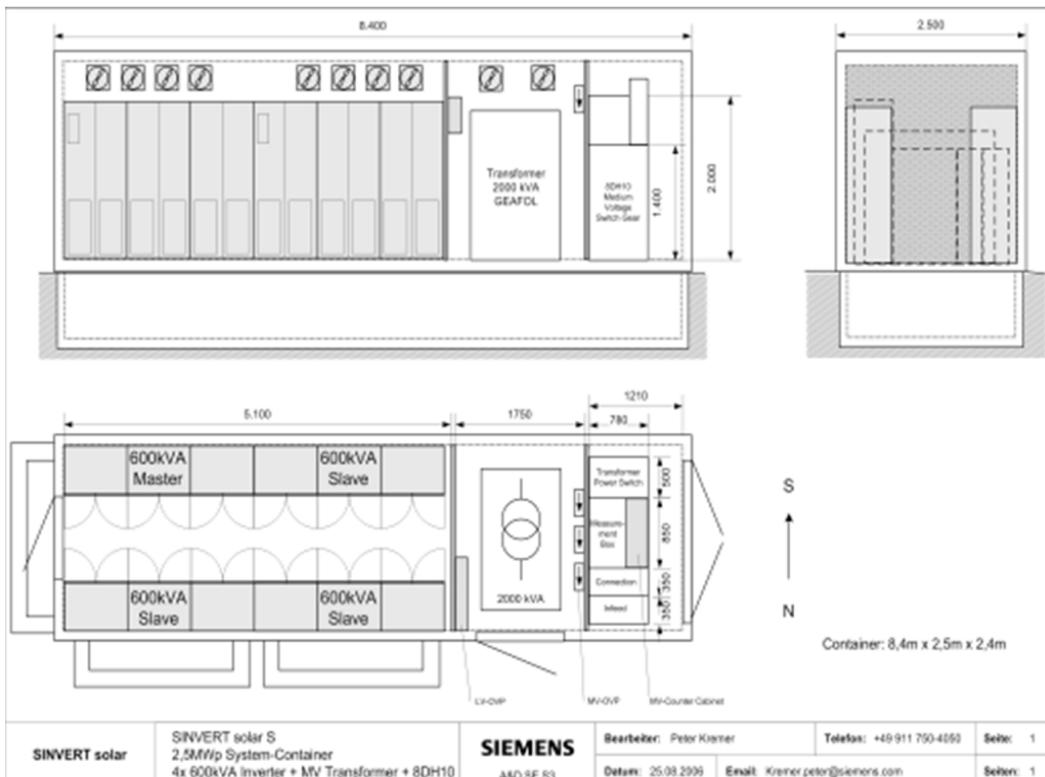
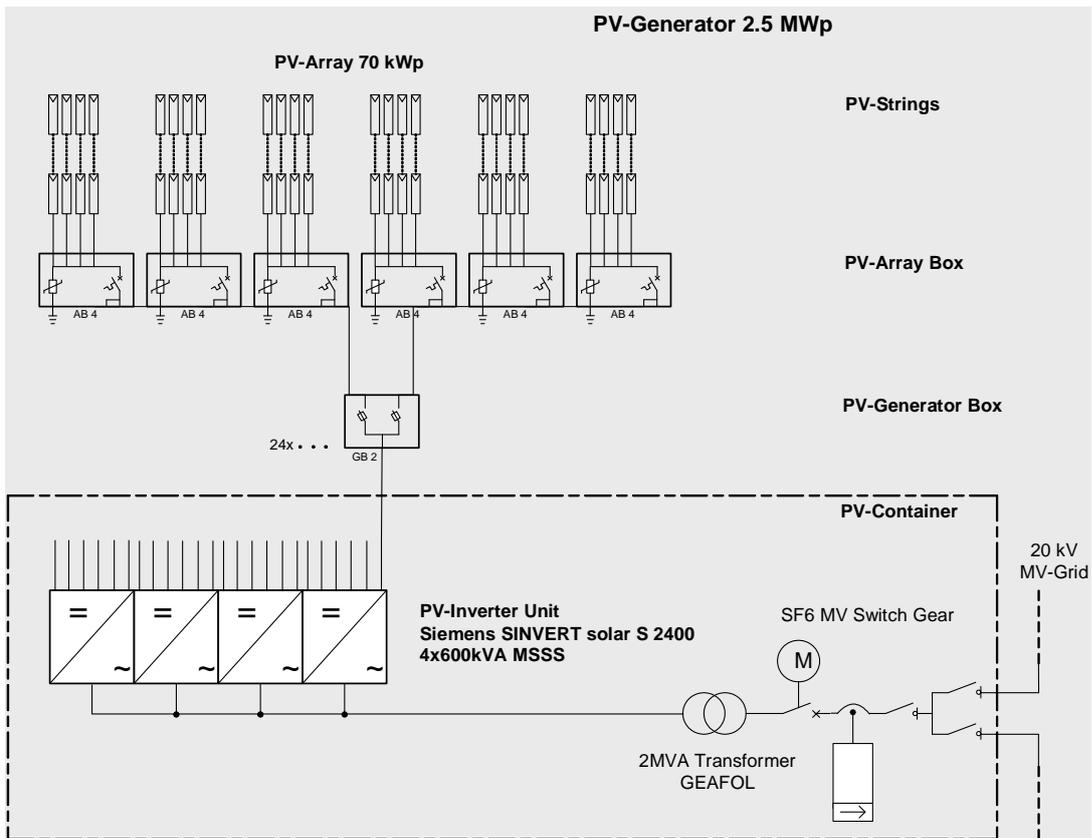


Bild 7 Containerbauweise mit optimaler Komponentenabstimmung