

## Projektinformation

### PROJEKT Smart Grid Solar

Smart Grids ermöglichen die dynamische Steuerung von Stromerzeugung, Verbrauch und Speicherung. Mit diesem Konzept wurden in Arzberg private Photovoltaik-Anlagen und Speicher sowie ein zentraler LOHC und Redox Flow Speicher und Solarpark zu einem regenerativen Energiesystem integriert. Der EnCN hat nicht nur die Auswirkungen dezentraler Erzeugungsanlagen auf Niederspannungsnetze beleuchtet und entsprechende Betriebsstrategien entwickelt, sondern auch eine Netz- und Marktmodellierung für die Netzplanung vorgenommen. Dabei wurden auch potentielle Investitionsanreize aufgedeckt und evaluiert.

**Projektzeitraum:** 2012 – 2016

#### Zielsetzung:

Ziel des Projektes war es, Methoden und Technologien zu entwickeln, mit denen der erneuerbare Stromanteil (insbesondere der Photovoltaikstrom-Anteil) am bayerischen Erzeugungsmix erhöht und nachhaltig in eine Vollversorgung überführt werden kann. Folgende Themen standen dabei im Vordergrund:

- Steuerung und Regelung des Stromnetzes durch kurzfristige dezentrale und zentrale Zwischenspeicher beziehungsweise durch Nutzung von intelligenten gesteuerten Verbrauchern und Erzeugern im Gesamtsystem.
- Weiterentwicklung und Anpassung von Komponenten zur Unterstützung einer Netzstabilisierung im Nieder- und Mittelspannungsbereich.
- Entwicklung von Simulations- und Optimierungsmodellen zur Begleitung und Vorhersage eines Volllastszenarios „erneuerbare Energieerzeugung 2050“.

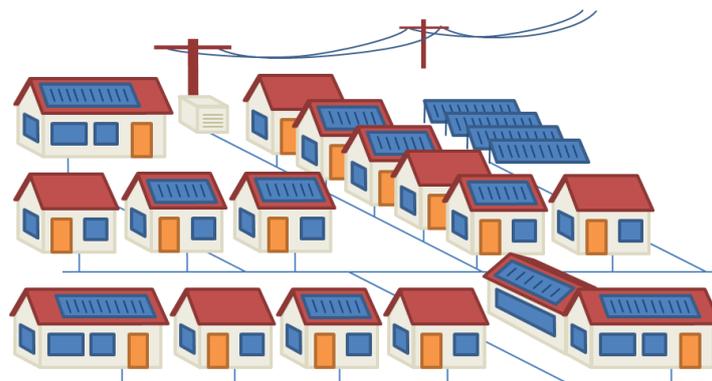


Abbildung: Grafische Darstellung des Smart Grids in Arzberg

### **Forschungsfragen:**

- Welche Optimierungs- und Simulationsmodelle müssen erstellt werden, um Siedlungen mit Photovoltaikanlagen und Batteriespeichern zu bewerten, zu optimieren und später den laufenden Betrieb zu unterstützen?
- Welche Auswirkungen haben dezentrale Erzeugungsanlage (PV-Anlagen) auf Niederspannungsnetze?
- Wie erfolgt das Zusammenspiel von Netzen, Erzeugern, Speichern und Verbrauchern bei der Planung von Smart Grids und welche Marktregeln führen zusammen mit den wirtschafts-politischen Steuerungsmechanismen zu sinnvollen Investitionsanreizen für die einzelnen Akteure am Markt?

### **Beteiligte Wissenschaftler:**

Sechs Lehrstühle der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg arbeiteten im Rahmen des EnCN in diesem Projekt zusammen.

- Lehrstuhl i-MEET - Institute Materials for Electronics and Energy Technology mit Prof. Dr. Christoph Brabec
- Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme mit Prof. Dr. Matthias Luther
- Lehrstuhl für Informatik 7 mit Prof. Dr. Reinhard German
- Lehrstuhl für Angewandte Mathematik mit Prof. Dr. Alexander Martin
- Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre insbesondere Wirtschaftstheorie mit Prof. Dr. Veronika Grimm
- Lehrstuhl für Steuerrecht und Öffentliches Rechts mit Prof. Dr. Roland Ismer

### **Welche Optimierungs- und Simulationsmodelle müssen erstellt werden, um Siedlungen mit Photovoltaikanlagen und Batteriespeichern zu bewerten, zu optimieren und später den laufenden Betrieb zu unterstützen?**

#### **Forschungsgegenstand:**

Der vom Lehrstuhl für Informatik 7 entwickelte Simulationsbaukasten i7-AnyEnergy, der das Zusammenspiel von verschiedenen Erzeugern, Verbrauchern und Speichern durch Informations- und Kommunikationstechnik in Verteil- und Übertragungsnetzen abbildet, wurde um wichtige Komponenten erweitert. Dazu zählt ein kinetisches Batteriemodell, das nicht-lineare Effekte wie Rate Capacity und Recovery berücksichtigt. Auch ein ortsabhängiges Sonneneinstrahlungsmodell wurde integriert, dazu ein vom Einstrahlungswinkel abhängiges Photovoltaikmodell mit Berücksichtigung der diffusen Einstrahlung und ein Wolkenmodell. Damit ist eine zeitlich hochaufgelöste Simulation von Smart Grids möglich z.B. zur Beurteilung von Eigenverbrauch, Autarkie und Netzdienlichkeit. Mithilfe von Messwerten konnte die Simulation validiert und kalibriert werden. Im weiteren Verlauf wurden Steueralgorithmen in der Simulation und im Feldversuch überprüft.

#### **Ergebnis:**

- Ein Speicher kann neben der Maximierung von Eigenverbrauch oder Autarkie für unterschiedliche weitere Ziele eingesetzt werden. Beispielsweise kann er verwendet werden, um die notwendige Anschlussleistung (maximal auftretende betragsmäßige Residual-Last) zu minimieren oder die Residual-Last besser planbar zu machen, indem kurzfristige, starke Schwankungen (z.B. durch Bewölkung) geglättet werden. Ersteres spielt insbesondere für die Netzstabilität bzw. die Belastung der Betriebsmittel (Kabel, Wechselrichter, Transformatoren, etc.) eine wichtige Rolle und letzteres kann helfen, um die Kapazitäten der Betriebsmittel

gezielter auszuschöpfen. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Steuerungen gefunden werden können, die sowohl die benötigte Anschlussleistung minimieren als auch den Eigenverbrauch maximieren.

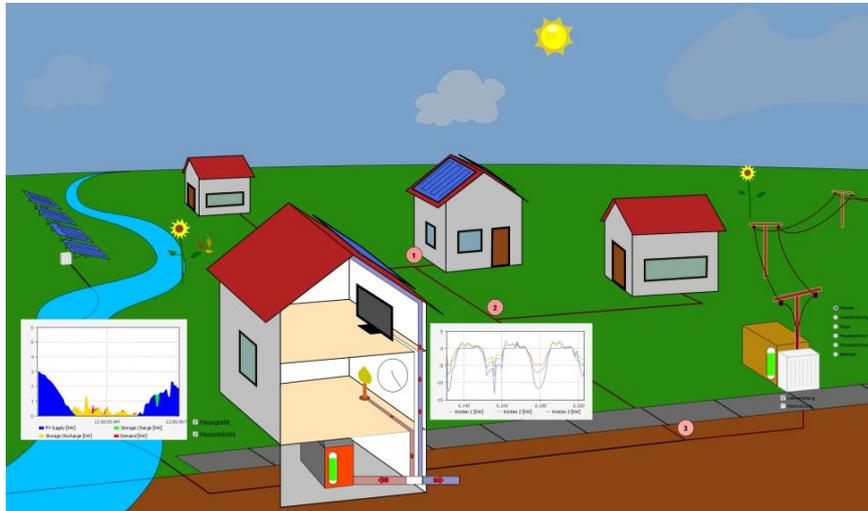


Abbildung: Screenshot des im Rahmen vom Smart Grid Solar entwickelten Simulationsmodells einer Siedlung

#### **Ansprechpartner:**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
**Lehrstuhl für Informatik 7 | Rechnernetze und Kommunikationssysteme**  
**Prof. Dr. Reinhard German**  
 Martensstr. 3  
 91058 Erlangen  
 Tel: +49 9131 85-27916  
 Email: Reinhard.German@fau.de

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
**Lehrstuhl für Angewandte Mathematik**  
**Prof. Dr. Alexander Martin**  
 Cauerstraße 11  
 91058 Erlangen  
 Tel: +49 9131 85-67163  
 Email: alexander.martin@fau.de

#### **Welche Auswirkungen haben dezentrale Erzeugungsanlage (PV-Anlagen) auf Niederspannungsnetze?**

Die hohe Anzahl und Leistung dezentraler Erzeugungsanlagen kann vor allem in der Niederspannung zu Spannungserhöhungen sowie zu erhöhten Strombelastungen der Betriebsmittel führen. Um diese Auswirkungen zu reduzieren, wird seitens der Netzbetreiber in erster Linie auf konventionellen Netzausbau gesetzt. Allerdings wird in der Netzplanung auch zunehmend die Möglichkeit des Einsatzes steuerbarer Komponenten wie regelbare Ortsnetztransformatoren, Netzregler, PV-Wechselrichter oder auch Speicher in Betracht gezogen.

### Forschungsgegenstand:

Ziel des Projektes war die Modellierung und Analyse der Netze sowie die Untersuchung der Netzvorgänge anhand erfasster Messdaten. Dafür wurden zunächst 2 Netzgebiete ausgewählt, in denen ein Messdatenerfassungssystem aufgebaut wurde, der Ort Epplas (Hof) und der eher urbane Gegensatz Schlottenhof (Arzberg). Dazu gehörte die Analyse der PV-Einspeiseleistungen wie auch die Betrachtung deren Auswirkungen auf die Netze in Form der resultierenden Spannungen und Strombelastungen. Basierend auf diesen Untersuchungen sollen Leitlinien bzw. Empfehlungen zu Assetplanung und zu optimiertem Betrieb des Gesamtsystems abgeleitet werden. Neben dem klassischen Netzausbau stand hier vor allem der mögliche Einsatz intelligenter Betriebsmittel im Vordergrund.

Um Netze automatisch analysieren und konkrete Maßnahmen vorschlagen zu können, wurde eine Software realisiert. Mithilfe der Software kann eine vorausschauende und genaue Dimensionierung und Bewertung des Netzes erfolgen. Dadurch kann eine kostenoptimierte Planung notwendiger Investitionen gewährleistet werden.

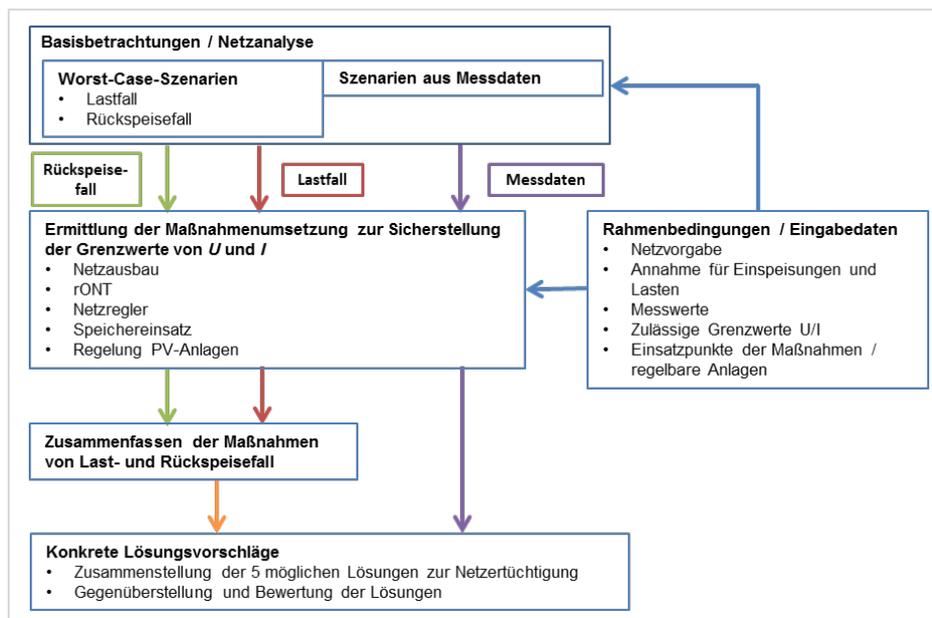


Abbildung: Flussdiagramm Software Netzintegration

### Ergebnisse:

- Auf Basis der in den beiden Netzgebieten gewonnenen Messdaten konnten Erkenntnisse zum Einspeiseverhalten von PV-Anlagen gewonnen werden, außerdem zur Höhe und dem Verlauf von Haushaltslasten sowie zu den Auswirkungen der Spannungen auf das Netz.
- Mit der Untersuchung kritischer Betriebspunkte im Netz konnten Maßnahmen zur Minderung der Auswirkungen hoher Lasten oder speziell hoher PV-Rückspeisungen (regelbarer Ortsnetztransformator, Netzregler, Netzausbau, Speichereinsatz, Abregelung PV-Anlagen) entwickelt werden.
- Leitlinien zur Integration Erneuerbarer Energien oder zur Ertüchtigung der Verteilnetze wurden aufgestellt.

**Ansprechpartner:**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**Lehrstuhl für Elektrische Energiesysteme**

**Prof. Dr.-Ing. Matthias Luther**

Cauerstr. 4 | Haus 1

91058 Erlangen

Tel: +49 9131 85-67540

Email: Matthias.Luther@fau.de

**Wie erfolgt das Zusammenspiel von Netzen, Erzeugern, Speichern und Verbrauchern bei der Planung von Smart Grids und welche Marktregeln führen zu sinnvollen Investitionsanreizen für die einzelnen Akteure am Markt?**

Als Kernstück der ökonomischen Analyse im Projekt „Smart Grid Solar“ soll eine quantitative Analyse der Anreize zur Umsetzung eines Smart Grid Systems durch die relevanten Marktteilnehmer unter verschiedenen politischen Rahmenbedingungen durchgeführt werden.

**Forschungsgegenstand:**

Hierbei erfolgte in den Modellen die Berücksichtigung der durch den Regulierungsrahmen für Verteilernetzbetreiber festgesetzten Anreize für den Netzbetrieb und Netzausbau. Die Ansätze dienten der Analyse der Auswirkungen des aktuellen Regulierungsrahmens (Status Quo) und lieferten eine Methode zur quantitativen Analyse möglicher Änderungen dieses Rahmens.

Neben den aktuell geltenden gesetzlichen Rahmenbedingungen und dem Systemoptimum wurden Szenarien, wie das Einspeisemanagement von regelbaren PV-Anlagen, alternative Netzentgeltmechanismen und die Subvention von Speicherinvestitionen, untersucht.

**Ergebnisse:**

- Unter den gegebenen Marktregeln gibt es so gut wie keine Investitionsanreize für ein netzdienliches Verhalten und netzentlastende Systeme, wie Speicher, auf Seiten der privaten Akteure.
- Bei den bisher untersuchten alternativen Rahmenbedingungen liefert ein leistungsorientiertes Netzentgelt, das auch für die Einspeisung von PV-Strom erhoben wird (sogenannte G-Komponente), die größten privatwirtschaftlichen Anreize in Speicher zu investieren und damit Netzentgelte zu sparen.
- Für die Reduzierung des Netzausbaus stellt sich auch im Verteilnetz das Einspeisemanagement als gut geeignete Option heraus.
- Im Austausch mit dem Lehrstuhl für Steuerrecht und Öffentliches Recht (Prof. Dr. Roland Ismer) wurden mögliche Gesetzesänderungen vorgeschlagen.

**Ansprechpartner:**

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**Lehrstuhl für Volkswirtschaftslehre, insbes. Wirtschaftstheorie**

**Prof. Dr. Veronika Grimm**

Lange Gasse 20

90403 Nürnberg

Tel: +49 911 5302-224

Email: [Veronika.Grimm@fau.de](mailto:Veronika.Grimm@fau.de)

Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

**Lehrstuhl für Steuerrecht und öffentliches Recht**

**Prof. Dr. Roland Ismer**

Lange Gasse 20

90403 Nürnberg

Tel: +49 911 5302-496

Email: [Roland.Ismer@fau.de](mailto:Roland.Ismer@fau.de)

## Publikationen:

- M. Ambrosius, V. Grimm, C. Sölch, and G. Zöttl, 2018. Investment incentives for flexible demand options under different market designs. *Energy Policy* 118, 372–389. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.059>
- M. Ambrosius, V. Grimm, C. Solch, and G. Zottl, 2016. Investment incentives for flexible energy consumption in the industry, in: 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM). Presented at the 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), IEEE, Porto, Portugal, pp. 1–5. <https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521234>
- Josef Bogenrieder, C. Camus, M. Hüttner, P. Offermann, J. Hauch, and C. J. Brabec, 2018. Technology-dependent analysis of the snow melting and sliding behavior on photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10, 021005. <https://doi.org/10.1063/1.5001556>
- J. Bogenrieder, O. Glass, P. Luchscheider, C. Stegner, and J. Weller, 2017. Technical comparison of measures for voltage regulation in low-voltage grids. *CIREN - Open Access Proceedings Journal* 2017, 2556–2559. <https://doi.org/10.1049/oap-cired.2017.1093>
- J. Bogenrieder, P. Hosch, C. Solch, and C. J. Brabec, 2016. Impact of a large-scale market integration on the orientation of photovoltaic modules, in: 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM). Presented at the 2016 13th International Conference on the European Energy Market (EEM), IEEE, Porto, Portugal, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1109/EEM.2016.7521343>
- J. Bogenrieder, M. Hüttner, P. Luchscheider, J. Hauch, C. Camus, and C. J. Brabec, 2018. Technology-specific yield analysis of various photovoltaic module technologies under specific real weather conditions. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 26, 74–85. <https://doi.org/10.1002/pip.2921>
- C. Brabec et al., 2016. Non-Uniformity Measurements of a Steady State Solar Simulator Using the Hishikawa-Hashimoto Method and Subsequent Improvement. 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2173–2176. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20162016-5BV.4.1>
- C. Camus, A. Adegbenro, J. Ermer, V. Suryaprakash, J. Hauch, and C. J. Brabec, 2018. Influence of pre-existing damages on the degradation behavior of crystalline silicon photovoltaic modules. *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 10, 021004. <https://doi.org/10.1063/1.5000294>
- M. Dalsass et al., 2018. Utilization of Inverter Operating Point Shifts as a Quality Assessment Tool for Photovoltaic Systems. *IEEE Journal of Photovoltaics* 8, 315–321. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2775443>
- M. Dalsass, S. Deitsch, P. Luchscheider, F. Gallwitz, and C. J. Brabec, 2016a. Performance of a Module and Defect Detection Algorithm for Aerial Infrared Images as a Function of the Flying Altitude. 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 2036-2040. <https://doi.org/10.4229/eupvsec20162016-5bv.2.60>
- M. Dalsass, H. Scheuerpflug, F. W. Fecher, C. Buerhop-Lutz, C. Camus, and C. J. Brabec, 2016b. Correlation between the generated string powers of a photovoltaic: Power plant and module defects detected by aerial thermography, in: 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC). Presented at the 2016 IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), pp. 3113–3118. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2016.7750239>
- M. Dalsass, H. Scheuerpflug, M. Maier, and C. J. Brabec, 2015. Correlation between the Monitoring Data of a Photovoltaic Power Plant and Module Defects Detected by Drone-

- Mounted Thermography. 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1793-1798. <https://doi.org/10.4229/eupvsec20152015-5co.15.4>
- S. Dotenco et al., 2016. Automatic detection and analysis of photovoltaic modules in aerial infrared imagery, in: 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV). Presented at the 2016 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV), pp. 1–9. <https://doi.org/10.1109/WACV.2016.7477658>
  - V. Grimm, A. Martin, M. Schmidt, M. Weibelzahl, and G. Zöttl, 2016a. Transmission and generation investment in electricity markets: The effects of market splitting and network fee regimes. *European Journal of Operational Research* 254, 493–509. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.03.044>
  - V. Grimm, B. Rückel, C. Sölch, and G. Zöttl, 2016b. Zur Reduktion des Netzausbaubedarfs durch Redispatch und effizientes Einspeisemanagement: Eine modellbasierte Abschätzung. *List Forum* 41, 465–498. <https://doi.org/10.1007/s41025-016-0027-5>
  - V. Grimm, G. Zöttl, B. Rückel, and C. Sölch, 2015. Regionale Preiskomponenten im Strommarkt. Gutachten im Auftrag der Monopolkommission, Nürnberg. [http://www.wirtschaftstheorie.wiso.uni-erlangen.de/wp-content/uploads/2016/02/gutachten\\_regionale-preiskomponenten07.10.15.pdf](http://www.wirtschaftstheorie.wiso.uni-erlangen.de/wp-content/uploads/2016/02/gutachten_regionale-preiskomponenten07.10.15.pdf)
  - Schmutzer, J. Bogenrieder, G. Jung, P. Luchscheider, S. Müller, R. Schmidt, C. Stegner, S. Trampler, 2015. Integrated Approach for Smart Grid Data Acquisition, Transmission and Evaluation, in: U. Betancourt, T. Ackermann (Eds.), 5th Solar Integration Workshop: International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems: 19-20 October 2015, Brussels, Belgium: Proceedings, Energynautics GmbH, Darmstadt, pp. 80–88. [http://solarintegrationworkshop.org/old\\_proceedings/](http://solarintegrationworkshop.org/old_proceedings/)
  - Stegner, A. Blockinger, J. Bogenrieder, and P. Luchscheider, 2016a. Solving the Community Storage Dilemma – Higher Utilization by Multiple Usage, in: Betancourt, U., Ackermann, T. (Eds.), 6th Solar Integration Workshop: International Workshop on Integration of Solar Power into Power Systems: 15-16 November 2016, Vienna, Austria: Proceedings. Presented at the 6th Solar Integration Workshop, Energynautics GmbH, Darmstadt. [http://solarintegrationworkshop.org/old\\_proceedings/](http://solarintegrationworkshop.org/old_proceedings/)
  - Stegner, J. Bogenrieder, S. Auer, P. Luchscheider, R. German, and C. J. Brabec, 2015a. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Haushaltsspeichern und realdatengestützte Untersuchung des elektrischen Eigenverbrauchs von PV-Strom, in: Schulz, D. (Ed.), Nachhaltige Energieversorgung Und Integration von Speichern Tagungsband Zur NEIS 2015. Presented at the NEIS 2015, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 34–41. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-658-10958-5>
  - Stegner, J. Bogenrieder, P. Luchscheider, and C. J. Brabec, 2016b. First Year of Smart Metering with a High Time Resolution—Realistic Self-Sufficiency Rates for Households with Solar Batteries. *Energy Procedia* 99, 360–369. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.10.126>
  - C. Stegner, J. Bogenrieder, P. Luchscheider, and A. Schmutzer, 2014. Einsatz dezentraler Speicher in der Niederspannung, in: Schulz, D. (Ed.), Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern NEIS 2014 (Konferenzband). Presented at the NEIS 2014, Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg, pp. 96–102. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2511.1205>
  - C. Stegner, M. Dalsass, P. Luchscheider, and C. J. Brabec, 2018. Monitoring and assessment of PV generation based on a combination of smart metering and thermographic measurement. *Solar Energy* 163, 16–24. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.070>
  - C. Stegner, P. Luchscheider, J. Bogenrieder, R. German, and C. J. Brabec, 2015b. Profitability and LCOE of Small Solar Battery Systems—the German Case. (Smart Grid Solar – A Bavarian Smart Energy Project), in: Rinck, S., Taylor, N., Helm, P. (Eds.), 31st European Photovoltaic

Solar Energy Conference and Exhibition. Presented at the EUPVSEC 2015, Hamburg, pp. 2604–2613. <https://doi.org/10.4229/EUPVSEC20152015-6DP.2.1>

- Peter Bazan, Philipp Luchscheider und Reinhard German, „Rapid Modeling and Simulation of Hybrid Energy Networks,“ *Proceedings of the 2015 SmartER Europe Conference*, Essen, Germany, Februar 2015
- Christoph Stegner, Philipp Luchscheider, Josef Bogenrieder, Reinhard German und Christoph J. Brabec, „Profitability and LCOE of Small Solar Battery Systems – the German Case. (Smart Grid Solar - A Bavarian Smart Energy Project),“ *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference (EU PVSEC 2015)*, Hamburg, Germany, pp. 2612-2621,
- Christoph Stegner, Josef Bogenrieder, Sebastian Auer, Philipp Luchscheider, Reinhard German und Christoph J. Brabec, „Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Haushaltsspeichern und realdatengestützte Untersuchung des elektrischen Eigenverbrauchs von PV-strom,“ *Nachhaltige Energieversorgung und Integration von Speichern: Tagungsband zur NEIS 2015*, Hamburg, Germany, pp. 34-41, September 2015
- Philipp Luchscheider, Peter Bazan und Reinhard German, „Zeitlich hochaufgelöste Simulation von Solarstrahlung zur Bewertung von Smart Grids,“ 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie (PVSE 2014), Bad Staffelstein, Germany, März 2014
- R. Schmidt, I. Mladenovic. Smart Grid Solar – Ein intelligentes Netz im Demonstrationsversuch. Bayern Innovativ Cluster-Forum Intelligente Verteilnetze, 2013
- R. Schmidt. State Estimation in Verteilnetzen. Modellprojekt Smart Grid Solar. Wegweiser für nachhaltig dezentrale Energiekonzepte, 2015
- R. Schmidt; M. Luther; I. Mladenovic; C. Weindl. Analysis of low voltage networks with high Distributed Power Generation. 23rd INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION (CIRED 2015), 2015
- A. Schmutzer; J. Bogenrieder; G. Jung; P. Luchscheider; S. Müller; R. Schmidt; C. Stegner; S. Trampler. Integrated Approach for Smart Grid Data Acquisition, Transmission and Evaluation. 5th International Workshop on Integration of Solar into Power Systems, 2015

### Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt:



[Smart Grid Solar Broschüre](#)

Weitere Informationen finden Sie unter: [www.encn.de/](http://www.encn.de/)