

Energiemanagement von vernetzten regenerativen Energieerzeugern für Gebäudesysteme



Prof. Dr. rer. nat. habil. Ekkehard Boggasch, Leiter des Labors für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik im Fachbereich Versorgungstechnik an der Fachhochschule Braunschweig Wolfenbüttel.



M.Sc. Dipl.-Ing. (FH) Lars Baumann, wissenschaftlicher Mitarbeiter im Labor für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik.

Der Einsatz von regenerativen Energiesystemen ist für die Zukunft ein zunehmend

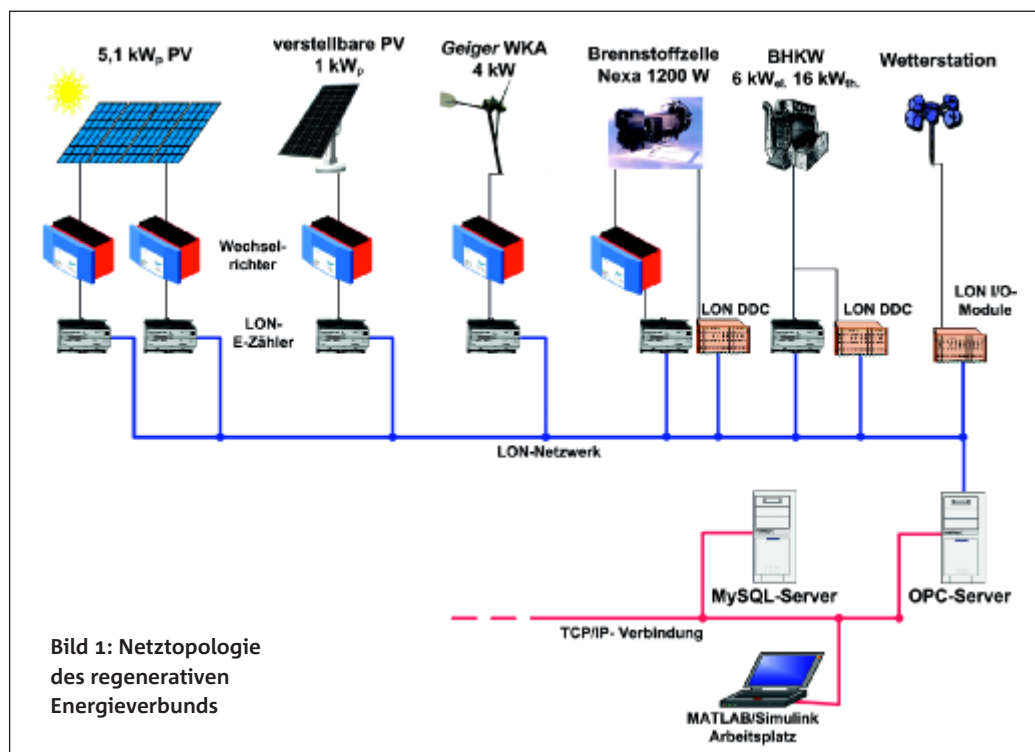
wichtiger Bestandteil eines Lösungsansatzes, mit dem die von der Bundesregierung

bzw. von der EU verabschiedeten Klimaschutzziele erreicht werden können und damit gleichzeitig die Importabhängigkeit der EU-Länder von Energierohstoffen verringert wird. Die Länder der EU haben sich als Ziel gesetzt, ihren CO₂-Ausstoß bis zum Jahr 2020 um 30 % gegenüber 1990 zu senken und den Anteil der erneuerbaren Energien am Energiemix auf 20 % zu erhöhen [1]. Die Förderpolitik der Bundesregierung in den vergangenen Jahren hat insbesondere durch die Einführung des EEG dazu geführt, dass die erneuerbaren Energien enorme Wachstumsraten verzeichnen. Bereits im Jahr 2007 betrug deren Anteil zur Deckung des gesamten Bruttostromverbrauchs rund 15 % [2].

Regenerative Energiequellen unterliegen naturbedingt

Fluktuationen im Energieangebot. Dies ist insbesondere bei der Umwandlung in elektrische Energie zu berücksichtigen, da sich diese Energieform im Verteilnetz nur begrenzt speichern lässt. Zu jedem Zeitpunkt muss ein Gleichgewicht zwischen Erzeugung und Verbrauch bestehen. Ein Ungleichgewicht wirkt sich negativ auf die Netzqualität aus, die sich in messbaren Schwankungen der Netzspannung und Netzfrequenz widerspiegelt. Fluktuierende regenerative Erzeuger wirken sich also direkt auf das elektrische Versorgungsnetz aus. In strukturschwachen Regionen führen schon heute die dort vorhandene installierte Windkraftleistung bei hohem Windangebot zu Problemen in der Netzführung; die erzeugte Leistung kann nicht in ausreichendem Maß abgeführt werden [3]. Das Energieversorgungsunternehmen greift im Rahmen eines Erzeugungsmanagements (ErzMan) in den Betrieb der Windparks ein, wodurch es zu einer Abregelung der Leistung bei einem Überangebot an regenerativer Leistung kommen kann.

Neben dem Aufbau von großen Windparks ist auch eine Erhöhung des Anteils regenerativer Energiesysteme für Wohngebäudesysteme zu beobachten, was die oben angesprochenen Probleme bezüglich des teilweise stark schwankenden Angebotes dieser Energieformen verschärfen könnte. Zukunftsszenarien wie eine energieautarke Siedlung, basierend auf dem Einsatz regenerativer Energien, sind heute schon denkbar, wie u. a. die Freibur-



ger Solarsiedlung zeigt. Ein wichtiger Aspekt bei solchen Betrachtungen ist die oben bereits angesprochene stochastische Verfügbarkeit des Energieangebots. Eine Möglichkeit die Schwankungen zu minimieren, ist die Nutzung unterschiedlicher Energiequellen und die Einbeziehung von elektrischen Speichern in Form von hybriden Energiesystemen. Dieser Verbundbetrieb setzt allerdings eine informationstechnische Vernetzung der Anlagen und eine ganzheitliche Betrachtung von Gebäudesystemen voraus.

Hybridenergiesystem an der FH Wolfenbüttel:

Am Labor für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik des Fachbereichs Versorgungstechnik der Fachhochschule Braunschweig/Wolfenbüttel wurde in den vergangenen vier Jahren ein hybrider Energieverbund errichtet. Ermöglicht wurde der Aufbau durch Fördermittel des Landes Niedersachsen [4] und der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG). Es handelt sich dabei um ein System, bestehend aus drei Fotovoltaikanlagen (Σ 6 kWp), einer Kleinwindkraftanlage (4 kW), einem Mini-BHKW (6 kW elektr., 16 kW thermisch) und einer Brennstoffzelle (1,2 kW elektr., 1,3 kW thermisch). Bei den Anlagen wurden bewusst Mikro-Energieerzeuger im Bereich einiger Kilowatt ausgewählt, wie sie im Wohngebäudebereich oder in kleineren Gewerbegebäuden eingesetzt werden. Ein Elektrolyseur zur Wasserstoffgenerierung und ein Batteriespeichersystem werden Anfang 2009 in die Anlage integriert. Überschüssige regenerative Energie kann so kurzfristig in der Batterie oder längerfristig in Form elektrolytisch erzeugten Wasserstoffes gespeichert werden. Eine Rückverstromung des Wasserstoffs erfolgt bei Bedarf geregelt über die Brennstoffzelle.

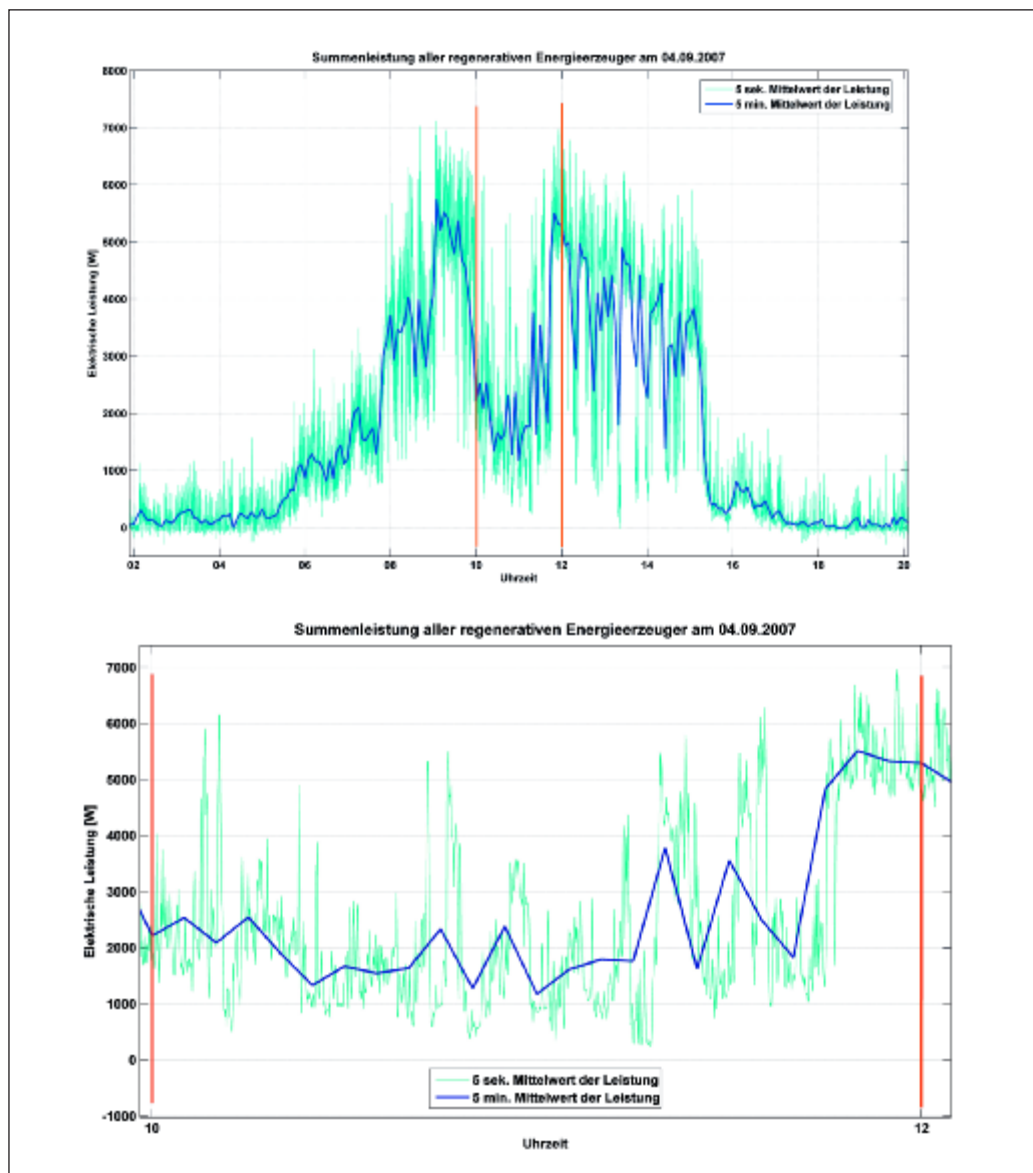


Bild 2: Fluktuation der täglichen Summenleistung aller regenerativen Energieerzeuger: Das obere Diagramm zeigt den 24 h Verlauf der Leistung mit einer 5 Sek.- und 5 Min.-Mittelung. In dem unteren Diagramm ist ein kleinerer Zeitabschnitt von 2 Stunden herausgezoomt.

Zur Umsetzung eines Managements der Anlagen ist eine kommunikationstechnische Vernetzung notwendig. Es wurde besonderer Wert auf die Integrationsfähigkeit in die klassische Anlagentechnik von Gebäuden gelegt. Als geeignetes Medium erschien hier der Einsatz der LON-Bus-technologie. Dieses Bussystem zeichnet sich durch eine hohe Zuverlässigkeit, eine ausreichende Datenbandbreite und eine bedienfreundliche Systemkonfiguration aus. In Bild 1 ist die momentane

Kommunikationstopologie dargestellt.

Jede Anlage ist über einen LON-Elektrizitätszähler an das Netzwerk angeschlossen. Bei der Brennstoffzelle und dem BHKW ist zusätzlich ein DDC-System integriert, dass eine gezielte Ansteuerung der jeweiligen Anlage ermöglicht. Alle Daten werden über eine LON/OPC-Schnittstelle in eine MySQL-Datenbank mit einer minimalen Auflösung von einer Sekunde gespeichert. Eine Auswertung der Messwerte

erfolgt mit Standard Software wie beispielsweise MATLAB®.

Dynamische Daten:

Die hohe Auflösung der Messdatenerfassung erlaubt eine sehr detaillierte Betrachtung der Leistungsflüsse eines solchen hybriden Energiesystems. In Bild 2 ist beispielhaft der Verlauf der regenerativ erzeugten Leistung der Versuchsanlage für einen Tag mit einer fünf sekundlichen und einer fünf minütigen Mittelung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Verlauf

bei einem längeren Mittelwertintervall sehr viel glatter verläuft als bei Mittelung über ein kürzeres Zeitintervall. Das untere Diagramm zeigt einen kleineren Zeitausschnitt und macht deutlich, dass die kurzen aber relativ großen Leistungssprünge in der fünf Minutenmittelung kaum Einfluss auf den mittleren Verlauf nehmen. Aber gerade in Hinblick auf ein Energiemanagement und die Integration derartig stark fluktuierender Leistungserzeuger in die öffentliche Versorgungsstruktur sollten diese hohen Gradienten mit berücksichtigt werden.

Für die Visualisierung von größeren Datenmengen haben sich so genannte Rasterdiagramme bewährt. Diese ermöglichen einen schnellen visuellen Überblick auf eine große Datenmenge. Mit dieser Darstellung können wiederkehrende Muster oder auch prinzipielle Anlagenfehler relativ leicht identifiziert werden.

Das Bild 3 zeigt beispielhaft den Verlauf der PV-Leistung der 1 kWp Anlage für das Jahr 2007. Für die Darstellung wurden 15 min. Mittelwerte verwendet.

In Bild 3 sind deutlich die saisonalen Schwankungen der Sonneneinstrahlung zu erkennen. Es können auch schnell ertragsstarke Phasen (hoher breiter Rotanteil) erkannt werden; so waren die Monate April und Mai im Vergleich zum restlichen Jahr sehr ergiebig. Die längeren Zeitabschnitte mit keinem Ertrag (Anfang des Jahres und etwa Ende Juni) sind auf Wartungsarbeiten an

der Messwerterfassungssoftware zurückzuführen.

Simulationsmodell:

Neben den Untersuchungen an der realen Hybridanlage werden auch Simulationen mit MATLAB/Simulink® am Labor für Elektrotechnik und regenerative Energietechnik durchgeführt. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsvorhabens „IGES Intelligente-Gebäude-Energie-Systeme“⁽¹⁾

wird u. a. ein Simulationsmodell zum Verhalten der Gesamtanlage entwickelt. Die Zielsetzung des Forschungsvorhabens ist die Steigerung der Effizienz des Verbundbetriebes von regenerativen Mikro-Energieerzeugern für den Gebäudebereich. Die Nutzung einer Simulationssoftware ermöglicht es die Leistungsflüsse eines solchen Verbundes, die Entwicklung eines geeigneten Energiemanagements

und die Betrachtung verschiedener Speichertechnologien gezielt zu untersuchen. Dabei werden auch die oben dargestellten dynamischen Aspekte mitberücksichtigt. In vielen anderen Arbeiten [5-9] werden dagegen meist nur Messwerte im Bereich von 5 bis 15 Minuten verwendet. Ein vereinfachtes Schema des aktuellen Modells zeigt Bild 4.

Das bisher generierte Gesamtsystem besteht aus ein-

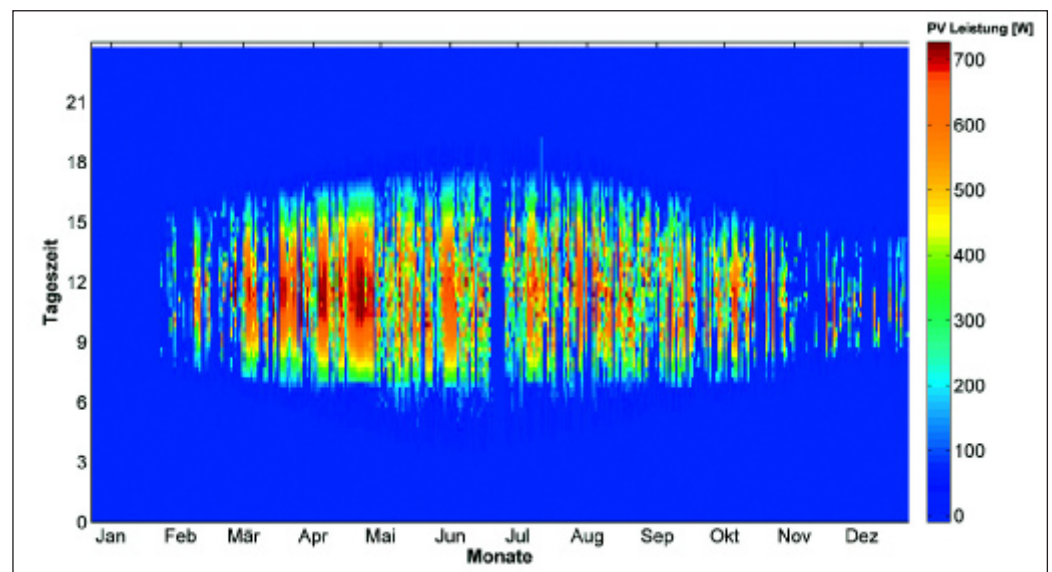


Bild 3: Rasterdiagramm der PV-Leistung für das Jahr 2007.

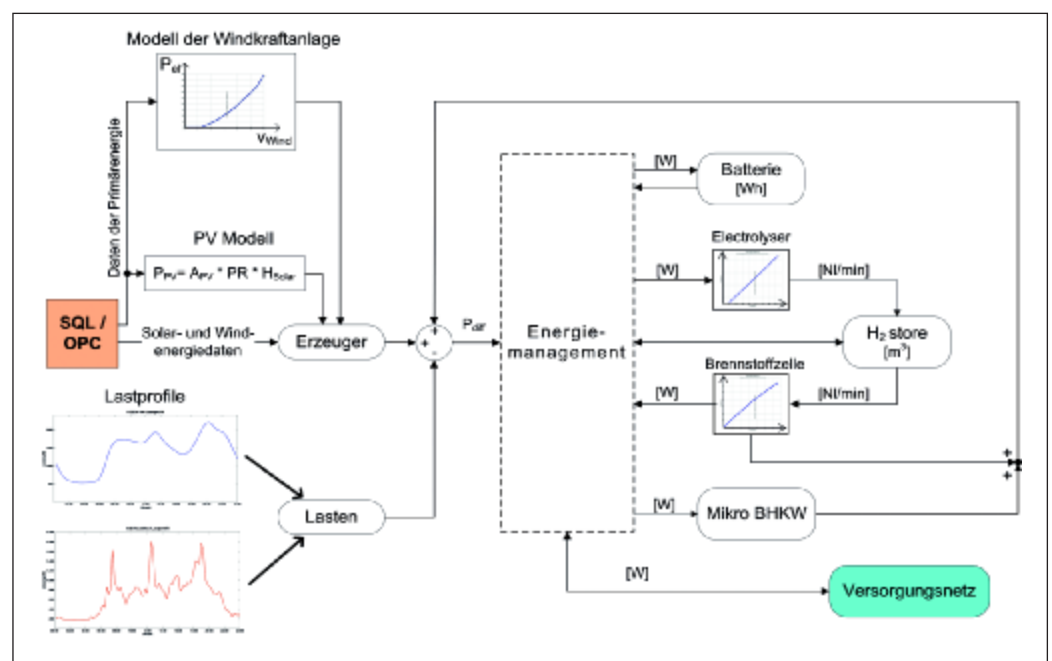


Bild 4: Vereinfachtes Schema des Simulationsmodells.

⁽¹⁾ Projektlaufzeit von November 2008 bis Oktober 2010. Gefördert durch den Europäischen Strukturfonds für regionale Entwicklung und dem Land Niedersachsen unter Fördernummer W2-63600.

fachen Teilmodellen der bislang existierenden Anlagen. Die zur Zeit real noch nicht vorhandenen Anlagen, wie ein Batteriespeicher oder ein Elektrolyseur mit Wasserstofftank, werden als Modell beschrieben. Die elektrischen Verbraucher sind in Form von Lastprofilen, die sich an dem VDEW-H0 Standard für Wohngebäude orientieren, modelliert. Die einzelnen Anlagen können zum einen simuliert werden aber es besteht darüber hinaus die Möglichkeit, Messwerte der realen Anlagen aus der MySQL Datenbank in die Simulationsumgebung einzulesen. Des Weiteren kann über die OPC-Technologie auch eine direkte zeitgleiche Online-Kopplung zwischen dem Modell und den realen Anlagen erreicht werden.

Wie bereits erwähnt, ist das Gleichgewicht zwischen Energieerzeugung und -bedarf ein wichtiger Punkt des Anlagenverbundes. Ein erstes Energiemanagement wurde in dem Model mit Stateflow® umgesetzt. Es besteht im Wesentlichen aus drei sog. „Zustandsautomaten“, welche die Regelung des Batteriesystems, des Wasserstoffsystems (Brennstoffzelle und Elektrolyseur) und des BHKW übernehmen. Bild 5 zeigt beispielhaft den Zustandsautomaten für die Batterieregelung.

Das Energiemanagement ist dabei so ausgelegt, dass mit höchster Priorität die momentan verfügbare regenerative Energie in dem System genutzt wird. Erst wenn der Bedarf aus diesen Quellen nicht mehr gedeckt werden kann, wird auf die Speicher zurückgegriffen. Zuerst wird das Batteriesystem be- oder entladen, bevor der Wasserstoffzweig mit einbezogen wird. Ein Austausch mit dem öffentlichen Versorgungsnetz erfolgt wiederum erst dann, wenn zum einen der Bedarf im Gebäude nicht mehr aus den Speichern gedeckt wer-



Bild 5: Zustandsautomat für die Batterieregelung

den kann – elektrische Leistung wird importiert – oder wenn die Speicher vollständig beladen sind – elektrische Leistung wird exportiert.

Beispiel einer Simulation

Das folgende Beispiel illustriert eine Simulation des Modells mit den realen Daten des 2. März 2006. Die erfassten Messwerte für die PV-Anlagen, der Windkraftanlage und der Wetterdaten wurden aus der Datenbank eingelesen. Die Verbraucher, die Brennstoffzelle, der Elek-

trolyseur, die Batterie und das BHKW wurden simuliert. Dabei wurde eine Simulationsschrittweite von einer Sekunde gewählt.

Für die Batterie wurde eine Kapazität von 6000 Wh angenommen, der Wasserstofftank umfasst dabei ein Volumen von 12,5 m³, das entspricht einer elektrischen Energiebeladung von ca. 12,5 kWh bei Verwendung der Nexa Brennstoffzelle. Die elektrischen Verbraucher in dem Gebäude nahmen dabei eine Energie von 16,35 kWh unter Verwendung eines individuellen Lastprofils auf. Die PV-Anlagen lieferten in Summe 21,67 kWh und die Windkraftanlage 13,13 kWh an elektrischer Energie.

Für das Energiemanagement ist die Differenzleistung, also die regenerative Erzeugerleistung minus der Verbraucherleistung, entscheidend, vgl. Bild 4. Der Verlauf der Differenzleistung, des Batterieladezustands und des Speicherfüllstands des Was-

serstoffspeichers sind in Bild 6 illustriert. In dem Zeitabschnitt 1 von 00:00 Uhr bis ca. 05:30 Uhr reicht die doch stark fluktuierende Windleistung aus, um zunächst die Batterie zu beladen und die Grundlast in dem Gebäude zu decken. Im Zeitabschnitt 2 zwischen 05:30 Uhr und 07:45 Uhr steigt der Bedarf an elektrischer Energie im Gebäude an. Die von der Windkraftanlage bereitgestellte Leistung reicht nicht mehr aus um den Bedarf zu decken. Die Differenz daraus wird aus der Batterie entnommen.

Nach dem Sonnenaufgang um ca. 08:00 Uhr, vgl. Zeitabschnitt 3 in Bild 6, dominiert die Summenausgangsleistung der PV-Anlagen. Die überschüssige Energie wird zunächst zum Laden der Batterie verwendet, bevor der Wasserstofftank befüllt wird. In dem letzten Zeitabschnitt ab ca. 16:00 Uhr reichen die regenerativen Ressourcen nicht

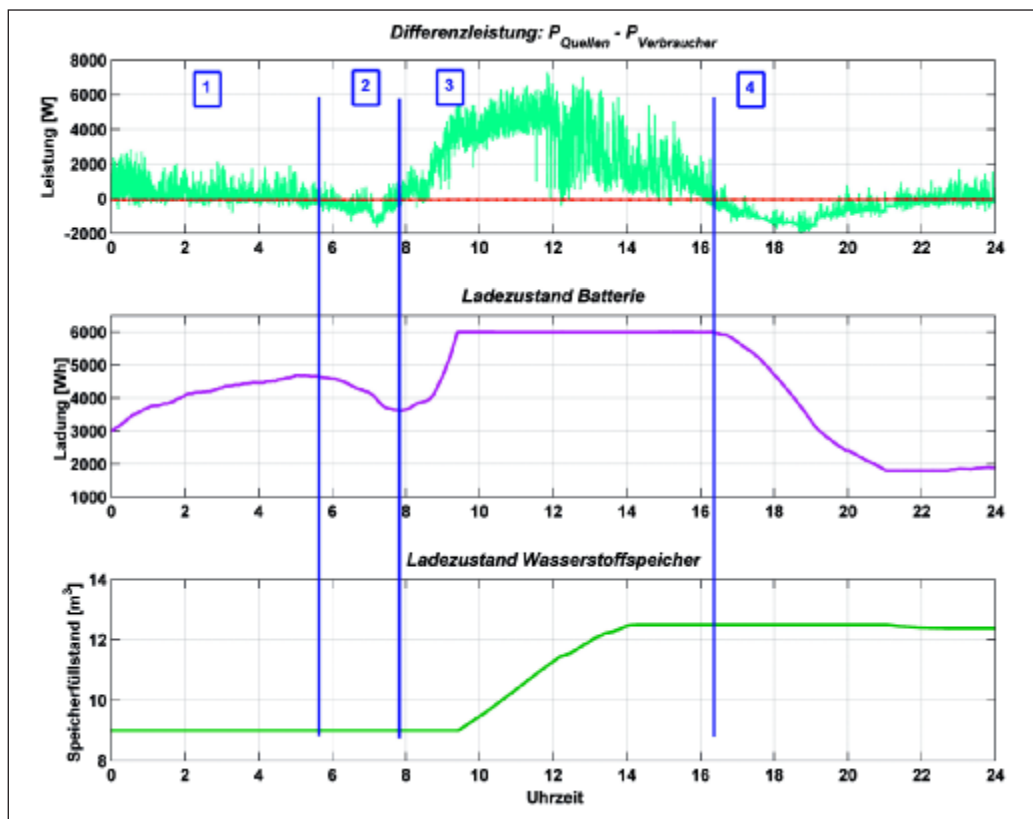


Bild 6: Leistungsfluss und Speicherinhalte für das simulierte Gebäude.

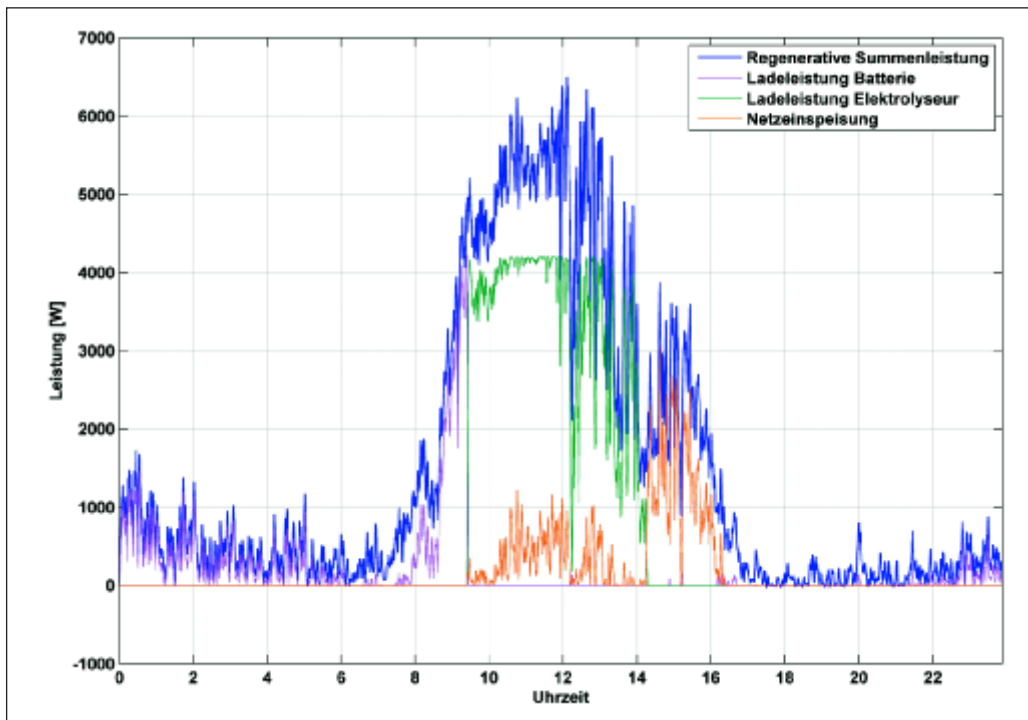


Bild 7: Regenerative Summenleistung und überschüssige Einspeiseleistungen.

mehr aus, um den Bedarf zu decken. Die Differenzleistung wird in erster Linie von der Batterie bereitgestellt, bis die untere Entladungsgrenze (1800 Wh) erreicht ist. Ab diesen Zeitpunkt wird über die Brennstoffzelle der gespeicherte Wasserstoff wieder verstromt.

Bild 7 verdeutlicht noch einmal wie die überschüssige Leistung im Gebäude eingesetzt wird. Die Abbildung zeigt in zwei Minuten Mittelwerten die Zeitverläufe der regenerativen elektrischen Summenleistung (blaue Linie) die der Batterie zur Verfügung stehende Ladeleistung (violett), sowie der dem Elektrolyseur (grün) gelieferten Leistung zur elektrolytischen Spaltung von Wasser. In rot wird der an das Versorgungsnetz abgeführte elektrische Leistungsverlauf dargestellt. Wie bereits erläutert, wird zunächst die Batterie geladen. Die geringen negativen Spitzen der regenera-

tiven Leistung in Bild 7 lassen sich durch den Eigenbedarf der Wechselrichter erklären. Es ist auch zu erkennen, dass die Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs mit 4,2 kW begrenzt wurde, was einem erzeugten Normvolumenstrom von 1 m³/h an Wasserstoff entspricht. Die Differenz zwischen der regenerativen Summenleistung und der Leistungsaufnahme des Elektrolyseurs wird zwischen 9:00 und 14:00 Uhr in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist.

Zusammenfassung und Ausblick:

Der vorgestellte regenerative Energieverbund arbeitet in einem Leistungsbereich, der ihn für lokale Anwendungen im Bereich von mittleren Einzelgebäuden oder kleineren Gebäudeeinheiten als innovatives Energieversorgungskonzept interessant macht. Aus diesem Grund wurde beim Aufbau, etwa für die Kommunikation, auf bekannte Techniken aus dem Bereich der Gebäudeautomation zurückgegriffen, wie sie mit der ver-

wendeten LON-Bustechnologie für den Datenaustausch Ausdruck findet.

Das gesamte System ist modular strukturiert und kann dadurch jederzeit um weitere Komponenten erweitert werden. Bislang lag der Hauptaugenmerk der Betrachtungen auf der effizienten Nutzung der regenerativ bereitgestellten elektrischen Leistung und deren intelligenten Management, um zu einer möglichst vollständigen Deckung eines vorgegebenen elektrischen Verbrauchsprofils zu gelangen. Die Erzielung einer möglichst großen finanziellen Vergütung basierend auf den derzeit laut EEG in Deutschland noch gültigen Einspeisevergütungssätzen für regenerative Energieerzeuger blieb bei der Betrachtung der Managementstrategien bewusst unberücksichtigt.

In einem nächsten Schritt soll in einem neuen Projekt auch die bei der Energiewandlung anfallende thermische

Energie mit in das Managementkonzept einbezogen werden. Bei den bislang vorhandenen Systemen würde das auf die Brennstoffzelle, und das BHKW zutreffen, die im Bemessungsbetrieb etwa 1,3 kW bzw. 16 kW thermische Leistung liefern. Im Gegensatz zur elektrischen kann die thermische Energie dabei relativ einfach in bekannten Speichersystemen zwischengespeichert und bei Bedarf jederzeit daraus abgerufen werden.

Eine weitere ergänzende Systemkomponente wird mit dem zukünftigen Einsatz einer Wärmepumpe erwogen, die in Kombination mit einem Wärmespeicher, einen weiteren Freiheitsgrad bei der Nutzung und dem Management von der im System regenerativ bereitgestellten elektrischen und thermischen Energie liefern könnte.

Als zusätzlicher regenerativer Wärmelieferant soll dabei auch noch geothermische Energie in Betracht gezogen werden, die in Tiefen bis etwa 100 m in Kombination mit Wärmepumpen eine relativ oberflächennahe und damit noch wirtschaftliche Nutzung des geothermischen Wärmeangebotes zu Heizzwecken ermöglicht, bzw. auch die Möglichkeit eröffnet Überschusswärme, die in den Sommermonaten anfällt, für längere Zeit in tieferen Erdschichten zwischen zu speichern. Dazu sind umfangreiche Untersuchungen in Planung.

Der Systemaufbau ermöglicht jederzeit flexible Erweiterungen des regenerativen Energieverbundes und steht für die Einbindung von weiteren Komponenten bereit. Längerfristig ist daran gedacht die gewonnenen Managementstrategien an realen Gebäuden oder in kleineren Siedlungseinheiten auch konkret zu verifizieren, sofern geeignete Objekte dazu bereit stehen. ◀

Literatur

- [1] Eine Energiepolitik für Europa; Europäische Kommission, Brüssel 10.01.2007 www.eur-lex.europa.eu
- [2] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Erneuerbare Energien in Zahlen, Juni 2008, www.erneuerbare-energien.de
- [3] EON-AvaconNetzGmbH, <http://www.eon-avacon.com/cms/Default.aspx?id=6051&ch=9>
- [4] Boggasch, E., Heiser, M.: „Busgestütztes Energiemanagement eines Verbundes regenerativer Energieanlagen“, Abschlussbericht AGIP-Forschungsvorhaben FA.-Nr. 2003.525 der FH-Wolfenbüttel, März 2006
- [5] Maclay J.D., Brouwer J. and Samuelsen G.S. Dynamic modelling of hybrid energy storage systems coupled to photovoltaic generation in residential applications. *Journal of Power Sources*, 163 (2007), 916-925
- [6] Dufo-López, R., Bernal-Agustín, J.L. and Contreras, J. Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage. *Renewable Energy*, 32 (2007), 1102-1126
- [7] Xiangjun Li, et al. Frequency control in micro-grid power system combined with electrolyzer system and fuzzy PI controller. *Journal of Power Sources*, 180 (2008), 468-475
- [8] Bilodeau A., Agbossou K. Control analysis of renewable energy system with hydrogen storage for residential applications. *Journal of Power Sources*, 162 (2006), 757-764
- [9] Jenkins D. P., et al. Model for evaluating impact of battery storage on microgeneration systems in dwellings. *Energy Conversion and Management*, 49 (2008), 2413-2424

Ich liebe sie.

Die Nr. 1
in Preis/Leistung



Bereits ab
€ 890,00
zzgl. MwSt.



Made in
Germany

WÖHLER

Technik nach Maß

Wöhler A 400

PATENT ANGEMELDET

Rauchgasanalyse & Heizungs-Check aus einer Hand

Ob mit rechts oder links – die Einhandbedienung macht es Ihnen leicht. Ob Rauchgasanalyse, Heizungs-Check, 4 Pa-Test oder Einstellarbeiten – mit dem neuen Wöhler A 400 ist es genial einfach.

<http://mgkg.woehler.de> · Tel.: 0 29 53/73-211



BHKS-Almanach 2009