



Dezentrale Energiesysteme erfreuen sich durch finanzielle Anreize, mit denen umweltpolitische Ziele unterstützt werden, immer größerer Beliebtheit. Im Fachgebiet „Elektrische Anlagen und Netze“ wurde ein flexibles Simulationswerkzeug entwickelt, das die Eigenschaften der einzelnen installierten Komponenten sowie ihr Zusammenspiel beim Betrieb des Gesamtsystems detailliert simuliert. So wird zum Beispiel eine vergleichende Untersuchung unterschiedlicher Varianten einer Photovoltaik-basierten Elektrizitätsversorgung für ein einzelnes abgelegenes Wohngebäude möglich.

Die Sonne im Haus verwalten

Simulationsstudien einer

Photovoltaik-basierten Hausversorgung

Von Jens Matics und Gerhard Krost

Umweltpolitische Ziele in Verbindung mit finanziellem Anreiz (Investitionszulagen beziehungsweise Einspeisevergütung) führen zu einer zunehmenden Verbreitung von Photovoltaik-(PV-)Anlagen. Bei deren Planung und Auslegung wird üblicherweise von globalen regionsbezogenen Einstrahlungswerten ausgegangen; andererseits erfordert eine optimale Ausnutzung der eingestrahlten Solarenergie sowohl bei netzgekopp-

pelten als auch erst recht bei netzunabhängig betriebenen Anlagen, dass

- die einzelnen Anlagenkomponenten sorgfältig auf die vorhandene Struktur des Versorgungssystems sowie gegebene wirtschaftliche Randbedingungen (Tarife) abgestimmt werden;
- die für den Installationsort spezifische zeitabhängige Einstrahlung wie auch der tageszeitabhängige Elektrizitätsverbrauch sowie – insbesondere im Falle netzunabhängig

betriebener Anlagen mit Energiespeicherung – Verbrauchsspitzen mitbetrachtet werden;

- eine geeignete Regelungsstrategie für das Gesamtsystem zum Einsatz kommt.

Für die optimale Auslegung dezentraler Energiesysteme sowie zur Entwicklung sinnvoller Betriebsstrategien wurde im Fachgebiet “Elektrische Anlagen und Netze” ein flexibles Simulationswerkzeug entwickelt, mit welchem

ENERGIEWANDLER	ELEKTRISCHE MASCHINEN			UMRICHTER		BLINDLEISTUNGS-KOMPENSATION
	Synchron-Maschine	Asynchron-Maschine	Doppeltgespeiste Asynchron-Maschine	IGBT	Thyristor	
Photovoltaik				x		
Spitzenkessel						
Wärmepumpe		x				x
Brennstoffzelle				x		
Windenergie	x			x	(*)	(*)
		x				x
			x	x		
Dieselelektrogenerator	x					
Elektrolyse				x		
Verbraucher						
elektrisch		(+)				(+)
thermisch						
Energiespeicher						
Wasserstoff						
Druckluft						
Akkumulator						
Schwungrad						
Warmwasser						

(1) Modell-Bibliothek für die dezentrale Energieversorgung.

Bei der Windenergie setzen die Hersteller unterschiedliche elektrische Maschinen-Typen als Generatoren ein; davon hängt ab, ob zur Netzkopplung ein Umrichter benötigt wird. Im Falle der zunehmend weniger verwendeten Thyristor-Umrichter (*) ist ebenso wie bei Einsatz der Asynchronmaschine als Generator eine Blindleistungskompensation erforderlich. Letztere wird meist auch bei größeren Asynchronmotoren als elektrische Verbraucher installiert (+).

Konfiguration	PV-Leistung (peak)	Netzanschluss	Diesel-Generator	NiCd-Akkumulator	H ₂ -Tank	Elektrolyseur	Brennstoffzelle	Elektrizitätspreis
1	3,6 kW	x	-	-	-	-	-	0,19 ¹⁾ €/ kWh 0,05 ²⁾ €/ kWh
2	3,6 kW	x	0,95 kW	-	-	-	-	0,28 ¹⁾ €/ kWh
3	5,6 kW	-	0,95 kW	17,0 kWh	-	-	-	0,94 ³⁾ €/ kWh
4	5,2 kW	-	-	19,4 kWh	2580 kWh	11,4 kW	1,3 kW	1,48 €/ kWh
Investition	4200€/ kW	-	250€/ kW	40€/ kWh	24€/ kWh	5000€/ kW	4000€/ kW	-

¹⁾ 0,13 €/ kWh Einspeisevergütung

²⁾ 0,48 €/ kWh Einspeisevergütung entsprechend EEG

³⁾ Diesel 3€/ l (siehe Text)

(2) Untersuchte Systemvarianten der PV-basierten Hausversorgung.

die Eigenschaften der einzelnen installierten Komponenten sowie ihr Zusammenspiel beim Betrieb des Gesamtsystems detailliert und unter hoher Zeitauflösung simuliert werden können. Exemplarisch soll hier die Anwendung dieses Simulationssystems mit der vergleichenden Untersuchung unterschiedlicher Varianten einer Photovoltaik-basierter Elektrizitätsversorgung für ein einzelnes abgelegenes Wohngebäude vorgestellt werden.

Modellierung der Systemkomponenten

Die Modellierung der für die untersuchten Konfigurationen einer photovoltaik-basierter Hausversorgung relevanten Komponenten auf der Basis von Matlab/Simulink© wird im Folgenden kurz skizziert; eine genauere Beschreibung der insgesamt entwickelten Modelle für die Simulation von dezentralen Energiesystemen entsprechend Tabelle (1)

findet sich bei Matics, Krost und anderen.¹ Die Zeitauflösung der Simulation kann im Sekunden- oder Minutenbereich entsprechend den jeweiligen Anforderungen frei gewählt werden; um die Dateneingabe zu erleichtern, können für bestimmte Parameter voreingestellte Werte verwendet bzw. diese bei Vorliegen genauerer Daten überschrieben werden.

Für die hier vorgestellten Systemstudien standen für die solare

Einstrahlung hochauflösende Messreihen (Zeitabstand: 30 Sekunden) über ein ganzes Jahr zur Verfügung, die auch verwendet wurden. Liegen solche Messungen nicht vor, so muss auch die zeitabhängige Einstrahlung zusammen mit den Solarmodulen simuliert werden; das dafür entwickelte Modell berücksichtigt *ortsspezifische Parameter* wie

- geografische Länge und Breite des Aufstellungsortes,
- UTC-Zeit und Datum der Simulation,
- tägliche minimale/maximale Temperatur im Monat,
- *atmosphärische Effekte* wie
- Absorption und Streuung,
- Bewölkungsgrad,
- Windgeschwindigkeit,
- und *Charakteristika der Solarmodule* wie
- Elevations- und Azimutwinkel,

- Oberfläche,
- Zelltyp und Wirkungsgrad,
- Temperaturkoeffizient des Modul-Wirkungsgrades sowie
- eine eventuell vorhandene Nachführeinrichtung.

Die üblicherweise für die Netzkopplung verwendeten IGBT-Umrichter werden mit ihrem lastabhängigen Wirkungsgrad nachgebildet; gegebenenfalls wird auch der Einfluss der Höhe der Gleichspannung auf den Wirkungsgrad berücksichtigt. Der zulässige Betriebsbereich ergibt sich aus der verwendeten Schaltung des Umrichters und seiner Nennleistung.

- Die des Weiteren für die hier gezeigten Studien verwendeten Modelle für Diesel-Generator, Elektrolyseur und Brennstoffzelle berücksichtigen in erster Linie
- die Nennleistung,

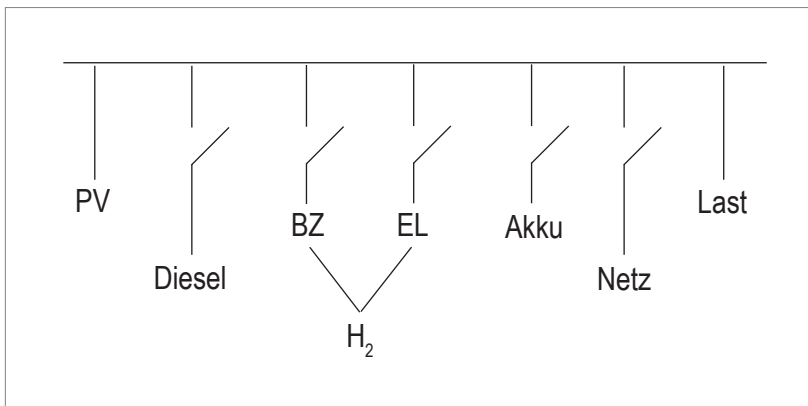
- obere und untere Leistungsgrenzen,
- den Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der elektrischen Leistung und
- Zeitkonstanten bei Laständerungen.

Energiespeicherung ist in dezentralen Energiesystemen wichtig, um Leistungsspitzen abzdämpfen und so die installierte Erzeugerleistung zu reduzieren sowie im vorliegenden Fall natürlich auch um die Nicht-Gleichzeitigkeit von (sonnenstand- und wetterabhängiger) photovoltaischer Erzeugung und Elektrizitätsverbrauch auszugleichen. Wesentliche Parameter bei der Simulation sind

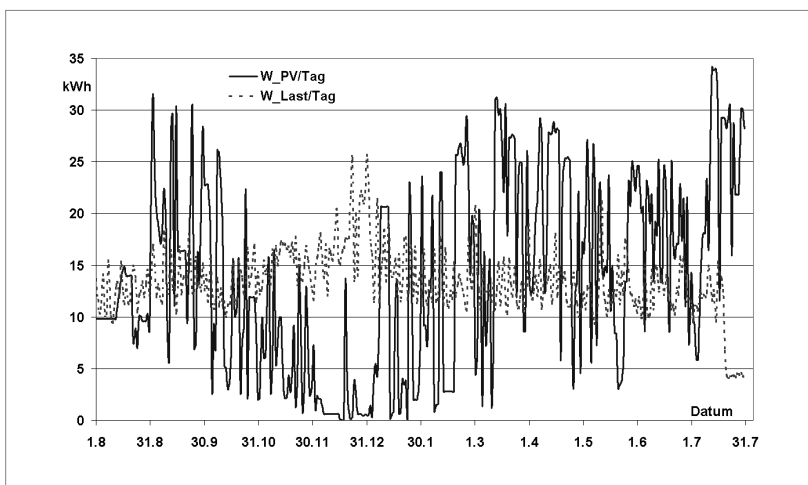
- Speicherkapazität,
- maximale Lade- und Entladeleistung,
- Zeitkonstanten und Wirkungsgrad bei Ladung beziehungsweise Entladung sowie
- Selbstentladung.

Ein eventuell vorhandener Netzanschluss wirkt sich in erster Linie auf die Kosten der Versorgung aus und wird in der Simulation durch die Begrenzung der Austauschleistung berücksichtigt. Tarife für Netzbezug und Einspeisung sowie die verwendete Primärenergie (Diesel) werden ebenfalls einbezogen.

Die Verbraucherlast wird als Zeitreihe vorgegeben, die entweder synthetisch erzeugt oder – wie bei der hier beschriebenen Studie – in Form von Messwerten übergeben werden kann.



(3) Komponenten der Versorgungsvarianten.

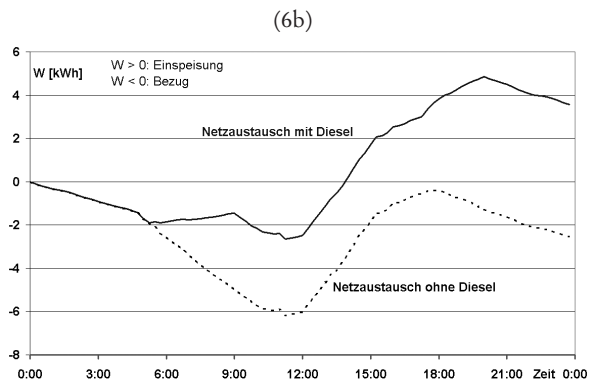
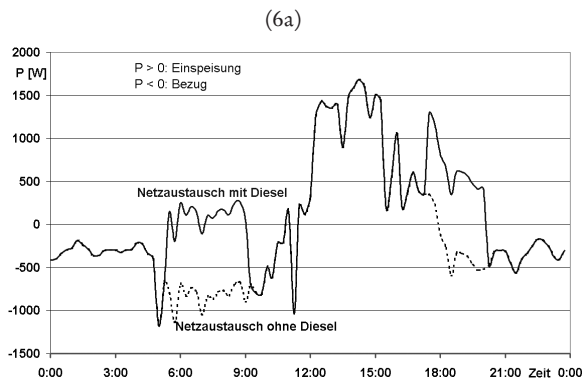


(4) Jahresverläufe.

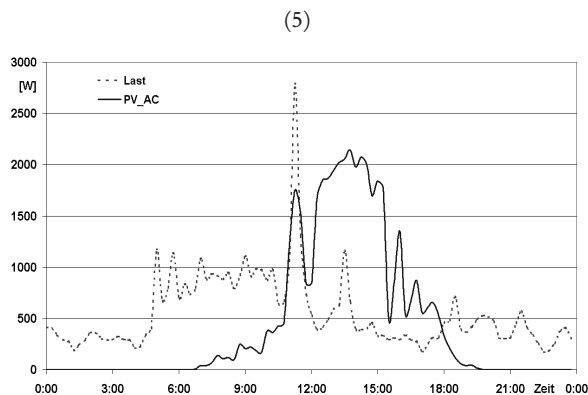
Untersuchung von Varianten einer dezentralen Hausenergieversorgung

Als illustratives Beispiel für die Anwendung des entwickelten Simulationswerkzeuges werden nachfolgend die in Tabelle (2) aufgeführten Varianten einer Photovoltaik-basierten Stromversorgung für ein abgelegenes Einfamilienhaus mit Standort am Niederrhein miteinander verglichen.

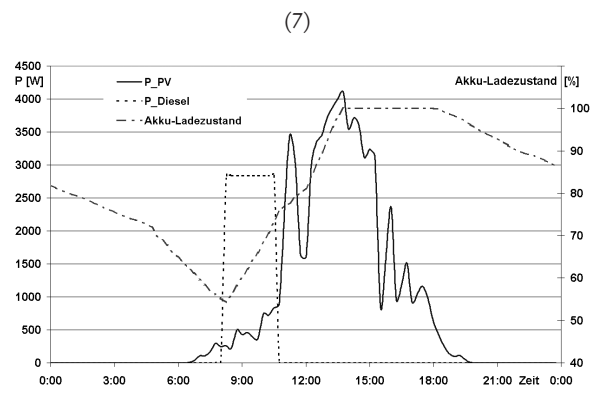
Die einfachste Variante geht vom netzparallelen Betrieb der Photovoltaik-Anlage aus (Konfiguration 1);



(6a/b) Netzaustauschleistung und -energie ohne bzw. mit Dieselgenerator am Beispieltag.



(5) Tagesverlauf Elektrizitätsverbrauch und Photovoltaik-Einspeisung.



(7) Photovoltaik-Einspeisung ($3,6 \text{ kW}_{\text{peak}}$), Dieselgenerator-Betrieb ($0,95 \text{ kW}$) sowie Ladezustand des Akkumulators am Beispieltag.

dies entspricht dem heute üblichen Betrieb von PV-Anlagen. Der Netzaustausch kann deutlich reduziert werden, wenn ein kleiner Dieselgenerator betrieben wird (Konfiguration 2); ein zusätzlich hinzugefügter Akkumulator gleicht den noch verbleibenden Netzaustausch aus, womit völlige Unabhängigkeit vom öffentlichen Elektrizitätsnetz erreicht wird (Konfiguration 3); schließlich kann der Dieselgenerator durch einen Wasserstoff-Pfad (bestehend aus Elektrolyseur, Wasserstoffspeicher und Brennstoffzelle) ersetzt werden, womit eine rein regenerative Versorgung ohne externe Energielieferung erreicht wird (Konfiguration 4).

Abbildung (3) zeigt die Komponenten, aus welchen sich die einzelnen Versorgungsvarianten zusammensetzen. Die angenommene elektrische Verbraucherlast ist die

eines 140 Quadratmeter Niedrigenergie-Hauses für eine vierköpfige Familie mit 4900 kWh Jahres-Elektrizitätsverbrauch; typische Zeitverläufe stehen mit einer Zeitauflösung von einer Viertelstunde für ein komplettes Jahr aus dem NRW-Projekt „Solarsiedlung Gelsenkirchen“ zur Verfügung². Für die auf dem Dach mit Südausrichtung angeordneten Solarmodule wurde eine Neigung von 30° angenommen; die installierte PV-Leistung wurde in den einzelnen betrachteten Varianten jeweils der Gesamtkonfiguration angepasst. Für die solare Einstrahlung wurde auf Messwerte aus einer Studie³ zurückgegriffen, die für ein komplettes Jahr im 30-Sekunden-Raster vorlagen.

Alle elektrischen Verbraucher werden mit 230 V Wechselspannung versorgt. Die für die PV-Einspeisung, gegebenenfalls den Akkumulator sowie bei Konfiguration 4

auch für die Brennstoffzelle und den Elektrolyseur erforderlichen Umrichter sind in Abbildung (3) nicht gezeigt, werden aber in der Simulation berücksichtigt und sind auch in den in Tabelle (2) aufgeführten Kosten enthalten.

Für die Abschreibung der Investitionskosten der Komponenten entsprechend Tabelle (2) wurde in den Berechnungen eine erwartete Betriebsdauer von zwanzig Jahren angenommen. Zinsen wurden hier allerdings nicht berücksichtigt, da in der Praxis vielfältige, regional unterschiedliche Modelle für die Bezuschussung innovativer Energiesysteme existieren; im konkreten Fall könnte dies aber leicht in die Berechnung aufgenommen werden.

Abbildung (4) zeigt die Jahresverläufe von Elektrizitätsverbrauch und PV-Einspeisung (35 m^2 Modulfläche); es ist deutlich ersichtlich,

dass wegen der Nicht-Gleichzeitigkeit von Erzeugung und Verbrauch grundsätzlich ein Ausgleich – entweder durch Netzkopplung oder Langzeit-Speicherung – erforderlich ist. Darüber hinaus ist aus Abbildung (5) ersichtlich, dass für alle netzunabhängigen Varianten auch eine Kurzzeitspeicherung erforderlich ist, da auch im Tagesverlauf Erzeugung und Verbrauch nicht koinzidieren.

Verschiedene technische und wirtschaftliche Randbedingungen für den Betrieb der bei den jeweiligen Varianten beteiligten Komponenten wie beispielsweise

- minimale Laufzeit des Dieseldieselgenerators vor nächster Abschaltung;
- Minimierung der Anzahl von Betriebszyklen für Dieseldieselgenerator, Elektrolyseur und Brennstoffzelle;
- möglichst konstanter Betrieb dieser Einheiten (das heißt Leistungsspitzen müssen vom Akkumulator aufgefangen werden);
- sinnvoller mittlerer Füllstand von Akkumulator und Wasserstoffspeicher

erfordern intelligente Strategien für den Betrieb der Gesamtanlage.

Gleichzeitig gibt es aber eine starke gegenseitige Abhängigkeit zwischen der jeweils angewandten Betriebsstrategie und der Dimensionierung der einzelnen Komponenten sowie der Abstimmung der Komponenten untereinander. Gerade bei den komplexeren Varianten (insbesondere bei Konfiguration 4) ist dieser Abstimmungsprozess so kompliziert, dass Verfahren der „Computational Intelligence“ eingesetzt wurden, um die optimale Dimensionierung der Anlage sowie die Einstellung der Regelungs-Parameter auf Basis der Jahresverläufe von Elektrizitätsverbrauch und Photovoltaik-Einspeisung zu ermitteln.

Die Abbildungen (5) bis (12) geben beispielhaft einige Ergebnisse der Simulationsstudie für die untersuchten Konfigurationen entsprechend Tabelle (2) wieder. Auch wenn hier nur ein charakteristischer Tag gezeigt ist – es handelt sich um einen Werktag im Herbst mit wech-

selnder Bewölkung (5. September 2003) – wurden alle Untersuchungen für das gesamte Jahr durchgeführt, für welches die Einstrahlungs- und Verbrauchsmesswerte vorlagen. Damit ist auch sichergestellt, dass die Dimensionierung der Anlagenkomponenten – und hier insbesondere auch der Energiespeicher – für alle Jahreszeiten bemessen ist.

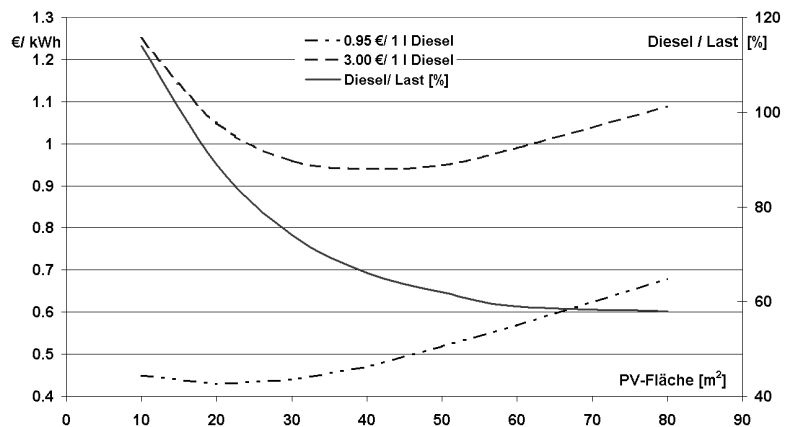
Photovoltaikanlage im Netzparallelbetrieb

Abbildung (5) zeigt die elektrische Verbraucherlast (durchgezogene Linie) und die PV-Einspeisung (gestrichelte Linie) am Beispieltag. Die installierte PV-Leistung beträgt $3,6 \text{ kW}_{\text{peak}}$ für die hier zu Grunde liegende Konfiguration 1; es ist klar, dass in diesem Falle das öffentliche Netz die Diskrepanz zwischen Verbrauch und PV-Einspeisung abpuffern muss und dass

installiert wird, beispielsweise um an einem sehr schwachen Netzanschlusspunkt die maximale Bezugsleistung zu reduzieren (Konfiguration 2); dabei wurde für die Simulation angenommen, dass der Dieseldieselgenerator an Werktagen von 6 bis 10 Uhr sowie von 18 bis 21 Uhr mit seiner Nennleistung ($0,95 \text{ kW}_{\text{el}}$) betrieben wird. Der Netzaustausch wird dadurch deutlich geglättet, und außerdem wird der Tages-Energiebedarf zusammen mit der PV-Einspeisung nun vollständig gedeckt (durchgezogene Linien Abb. 6a/b): das Netz dient hier lediglich noch als Energiepuffer.

Netzunabhängigkeit durch Akkumulator

Die Simulationsrechnungen zeigen, dass eine erhöhte PV-Leistung von $5,6 \text{ kW}_{\text{peak}}$ sowie ein zusätzlicher NiCd-Akkumulator⁴



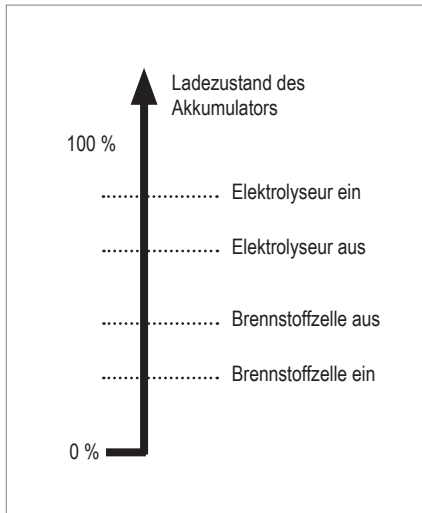
(8) Optimale Photovoltaikfläche in Abhängigkeit vom Dieselpreis.

darüber hinaus der Ertrag der Photovoltaik-Anlage den Tages-Energiebedarf nicht decken kann, so dass in nennenswertem Umfang Elektrizität aus dem Netz bezogen werden muss (Abb. 6a/b, gestrichelte Linien).

Begrenzung der Bezugsleistung durch Dieseldieselgenerator

Die Situation wird verbessert, wenn ein kleiner Dieseldieselgenerator

mit 17 kWh Speicherkapazität erforderlich sind, um völlige Unabhängigkeit vom öffentlichen Elektrizitätsnetz zu erreichen, wobei der Akkumulator dann die Pufferung an Stelle des Netzes übernimmt (Konfiguration 3); Abbildung (7) zeigt die photovoltaisch generierte Leistung (durchgezogene Linie) für den Beispiel-Tag. Die maximale Lade-/Entladeleistung des Akkumulators wurde mit jeweils 5 kW



(9) Schwellenwerte für den Betrieb von Brennstoffzelle und Elektrolyseur; konkrete Werte wurden durch Optimierungsrechnung bestimmt.

angenommen, und für den Dieselgenerator wurde hier eine Zweipunktregelung vorgesehen:

- Dieselgenerator *ein* mit Nennleistung (0,95 kW), wenn Akkumulator-Ladung kleiner als 55 Prozent;
- Dieselgenerator *aus*, wenn Akkumulator-Ladung größer als 75 Prozent.

Durch diese Hysterese wird die Anzahl der Betriebszyklen des Dieselgenerators begrenzt (Abb. 7, gestrichelte Linie), und gleichzeitig wird der Akkumulator nicht extrem entladen (Abb. 7, strichpunktierte Linie).

Außerdem wurde für diese Konfiguration 3 beispielhaft einmal der Einfluss des Dieselpreises auf die optimale Dimensionierung der installierten PV-Leistung anhand der insgesamt resultierenden Arbeitskosten pro verbrauchter kWh untersucht: Wie erwartet führen höhere Dieselpreise (als Extremfall wurde hier einmal mit drei Euro pro Liter gerechnet) zu höherer zu installierender PV-Leistung (5,6 kW_{peak} beziehungsweise 40 Quadratmeter PV-Fläche in Abbildung (8), gestrichelte Linie, im Vergleich zu 3,6 kW_{peak} beziehungsweise 25 Quadratmeter PV-Fläche bei gegenwärtigen Dieselpreisen von etwa einem Euro pro Liter, strichpunktierte Linie in

Abb. 8). Erfahrungswerte aus der Literatur bewegen sich in ähnlicher Größenordnung⁵. Wie bereits gesagt entstammen alle diese Ergebnisse der Simulation jeweils über ein ganzes Jahr. Die durchgezogene Linie in Abbildung (8) zeigt den Anteil des Dieselgenerators an der Gesamtjahres-Elektrizitätserzeugung in Abhängigkeit von der installierten PV-Fläche; dabei kann dieser Anteil auch Werte größer als 100 Prozent annehmen, was an der Berücksichtigung des Akkumulator-Wirkungsgrades liegt, der gerade bei geringer installierter PV-Leistung stark in die Berechnung eingeht.

Innovative Lösung mit Brennstoffzelle

In der letzten untersuchten Variante (Konfiguration 4) wird der Dieselgenerator durch einen Langzeit-Speicherpfad auf Wasserstoffbasis, bestehend aus Hochdruck-Elektrolyseur, H₂-Tank und Brennstoffzelle ersetzt. Dies führt zu einem rein regenerativen Energiesystem, welches zudem völlig autark ist. Um bei gegebener Komplexität dieses Systems ein technisch sinnvolles und wirtschaftlich optimales Betriebsverhalten zu erreichen, welches auch die Limitierung der Betriebszyklen der Komponenten sowie die Einhaltung von Füllstands-Grenzen und -Reserven der Speicher einschließt, musste eine Reihe komplizierterer Regeln in die Simulation der Anlage eingebunden werden:

So wurde zum Beispiel die Freigabe des Betriebes von Elektrolyseur beziehungsweise Brennstoffzelle („Langzeitspeicher“) über eine Zweipunktregelung mit dem Ladezustand des Akkumulators („Kurzzeitspeicher“) verknüpft (Abb. 9); die dabei konkret verwendeten Schwellenwerte ergaben sich aus der Optimierungsrechnung. Die Hochlaufzeiten für den Elektrolyseur und die Brennstoffzelle wurden mit 70 Minuten beziehungsweise 20 Minuten angesetzt; um die Beanspruchung dieser Komponenten zu reduzieren,

wurde jeweils nur ein Betrieb mit Nennleistung zugelassen⁶. Darüber hinaus wurde die mögliche Betriebszeit des Elektrolyseurs auf 9 bis 20 Uhr begrenzt, also auf die Tageszeit, in welcher überhaupt nur eine nennenswerte PV-Einspeiseleistung möglich ist, und ein Anlauf ist auch nur dann freigegeben, wenn der aktuelle PV-Ertrag am betreffenden Tag morgens um 9 Uhr schon mindestens eine kWh beträgt (was einen frühzeitigen Hinweis auf einen zu erwartenden „Schönwettertag“ mit hohem PV-Ertrag bedeutet). Lade- und Entladeleistung des Akkumulators wurden mit jeweils maximal fünf kW entsprechend der Nennleistung des Umrichters angesetzt.

Unter Berücksichtigung dieser

Betriebsregeln mussten zahlreiche Auslegungs-Parameter ermittelt und optimal aufeinander abgestimmt werden wie beispielsweise

- PV-Fläche beziehungsweise PV-Peak-Leistung;
- Nennleistung des Hochdruck-Elektrolyseurs;
- Nennleistung der Brennstoffzelle;
- Speicherinhalt des Wasserstoff-Tanks;
- Kapazität des Akkumulators.

Wie bereits erwähnt, wurden die optimalen Auslegungs- und Betriebsparameter unter Berücksichtigung der jeweils gültigen Bedingungen und Restriktionen mit Methoden der „Computational Intelligence“ (konkret: mit einem genetischen Optimierungs-Algorithmus) auf der Basis der als Messreihen vorliegenden Jahresverläufe von Elektrizitätsverbrauch und Solar-Einstrahlung identifiziert.

Die Dimensionierung der einzelnen Komponenten als Resultat dieser Optimierung kann der Tabelle (2) entnommen werden. Dabei ist natürlich zu berücksichtigen, dass Komponenten wie die Brennstoffzelle sich derzeit noch in einem prototypischen Stadium befinden, so dass sowohl die angesetzten Investitionskosten wie auch die geschätzte Lebensdauer

(Abschreibungszeit) optimistische Entwicklungsziele der jeweiligen Hersteller sind; bei Vorliegen genauerer Werte können selbstverständlich diese in die Optimierungsrechnung eingesetzt werden. Die Tabelle (2) enthält ferner die resultierenden Energiekosten pro an die Verbraucher abgegebene Kilowatt-

stunde; hier ist ersichtlich, dass bei der Konfiguration 4 die energetische Autarkie und die optimale Umweltverträglichkeit mit einem noch einmal um den Faktor 1,5 höheren Elektrizitätspreis erkaufte werden im Vergleich zur Konfiguration 3, welche eine heute durchaus übliche Lösung zur Versorgung zum Bei-

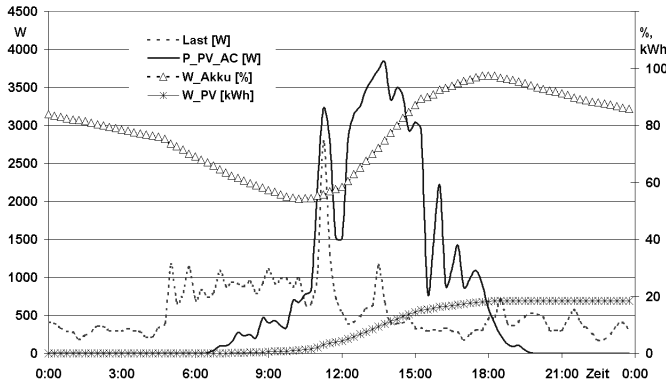
spiel von Alpenhütten darstellt (für diesen Fall ist der in der Simulation mit drei Euro pro Liter angesetzte Diesel-Preis, der den aufwändigen Transport zur Hütte mit einschließt, durchaus realistisch).

Das implementierte Betriebskonzept für die Konfiguration 4 greift auf eine überschaubare Anzahl an Systemgrößen zurück, anhand derer der gesamte Systemzustand überwacht werden kann, so dass eine sichere und für die jeweils gewählte Konfiguration kostenoptimale Versorgung gewährleistet ist. Trotz der stochastischen Fluktuation von Elektrizitätsverbrauch und solarer Einstrahlung müssen die Betriebsparameter nur einmal vor Betriebsbeginn ermittelt werden und sind dann ganzjährig gültig.

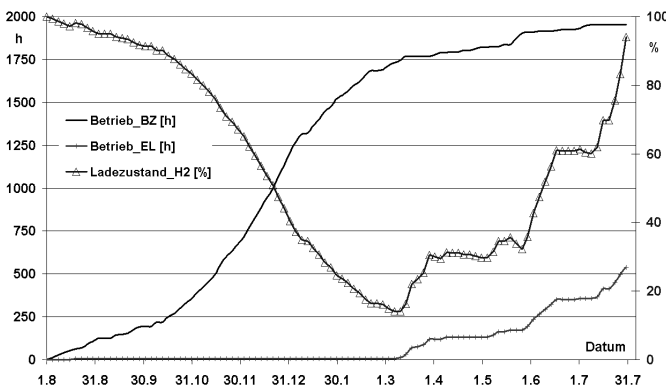
In Abbildung (10) ist das Betriebsverhalten der Konfiguration 4 für den Beispieltag (5.9.2003) aufgezeigt: Der Elektrolyseur wurde blockiert, da die „PV-Ertrag vor 9 Uhr“-Bedingung (siehe oben) an diesem Tag nicht erfüllt war; ebenso wurde die Brennstoffzelle an diesem Tag nicht betrieben, da der Akkumulator als Kurzzeitspeicher die Divergenz zwischen PV-Einspeisung und Verbraucherlast ausgleichen konnte; dabei erlangte er am Ende des Tages wieder einen Ladezustand von gut 80 Prozent, was in etwa auch dem Tages-Anfangswert entspricht.

Abbildung (11) gibt Aufschluss über den Einsatz von Brennstoffzelle und Elektrolyseur im Jahresverlauf: Während der Elektrolyseur überwiegend im Sommer bei hohen PV-Erträgen betrieben wird, kompensiert die Brennstoffzelle die geringe PV-Einspeisung im Winter, so dass der Wasserstoff-Pfad insgesamt einen Jahresspeicher darstellt.

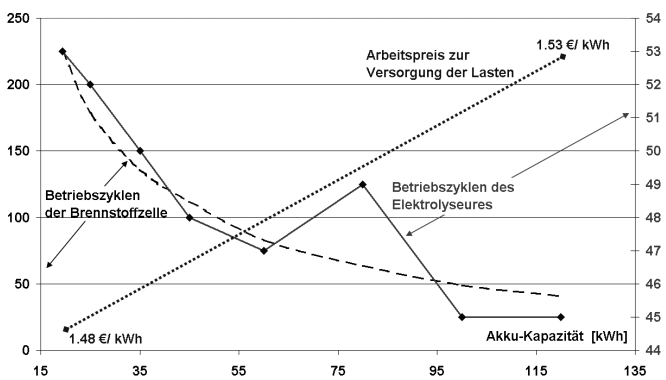
Die im Optimierungsprozess erreichte sinnvolle Auslegung der einzelnen Anlagen-Komponenten (Tab. 2) führt auch zu einer relativ geringen Anzahl von Betriebszyklen und vermeidet somit unnötigen Verschleiß; außerdem wird der Wasserstoff-Speichervorrat auf einem sicheren Niveau gehalten, so dass



(10) Betriebsverhalten der Hausenergieversorgung mit Wasserstoff-Speicherpfad am Beispiel-Tag.



(11) Wasserstoff-Speicherpfad im Jahresverlauf.



(12) Betriebszyklen abhängig von der Akku-Kapazität.



selbst am Ende der Winter-Periode noch eine Reserve zur Verfügung steht und während der Sommermonate eine vollständige Wiederbefüllung erreicht wird.

Der Einfluss einer Erhöhung der Akkumulator-Kapazität auf den Betrieb von Brennstoffzelle und Elektrolyseur bei sonst unveränderten Anlagen-Daten der Konfiguration 4 ist abschließend in Abbildung (12) gezeigt. Die Anzahl der Betriebszyklen reduziert sich weiter mit zunehmender Akkumulator-Kapazität, während die Erzeugungskosten pro Kilowattstunde leicht zunehmen als Folge der mitberücksichtigten Akkumulator-Investitionskosten. Die nicht-stetige Kurve für die Betriebszyklen des Elektrolyseurs resultiert aus der Tatsache, dass bei dieser Überlegung alle übrigen Anlagen-Parameter unverändert entsprechend Tabelle (2) beibehalten worden sind; natürlich könnte die Minimierung der Betriebszyklen des Elektrolyseurs auch hier wieder als Nebenbedingung in eine Optimierungsrechnung einbezogen werden.

Fazit und Ausblick

Das am Fachgebiet "Elektrische Anlagen und Netze" entwickelte flexible Simulationswerkzeug mit hoher zeitlicher Auflösung erlaubt sowohl die Charakterisierung einzelner Komponenten dezentraler Energiesysteme wie insbesondere auch die Untersuchung und Optimierung von deren Zusammenspiel im systemtechnischen Gesamtverhalten beliebig konfigurierter Anlagen. Die beispielhafte Anwendung dieses Simulationswerkzeugs zur Untersuchung verschiedener Konfigurations-Varianten einer photovoltaik-basierten Hausenergieversorgung zeigt seine Vielseitigkeit im praktischen Gebrauch. Auch wenn es sich bei der hier gezeigten Studie ausschließlich um die Elektrizitätsversorgung handelt, können mit dem Werkzeug selbstverständlich auch kraft-wärmegekoppelte Systeme untersucht werden, wobei die Kom-

plexität in der Auslegung sowie bei den Betriebsregeln natürlich noch wesentlich größer als bei den hier gezeigten Beispielen ist.

Summary

A comprehensive simulation tool with high temporal resolution was developed, allowing to overcome the current practice of having the design and dimensioning of energy systems with dispersed generation rely only on global energy harvest considerations. The simulation system allows to investigate the characteristics of dispersed generation components to be installed, as well as their control and interaction within a complete supply system, under high temporal resolution and simulation fidelity, thus providing a reasonable basis for efficient plant design. Device rating and control parameters of design variants can be optimized suitably by use of a superimposed genetic algorithm based optimization approach. Example application for the sound investigation of various configurations of PV based home electricity supply proves the versatile usability of the tool. Even if in the study presented here the focus was purely on electrical supply, the simulation tool is also capable of modeling combined heat and power systems; of course, the interdependences in dimensioning and control are then much more complicated than in the cases shown here.

Anmerkungen

- 1) Matics, Jens; Krost, Gerhard; Roggatz, Carsten; Spanel, Udo: Dispersed Generation Modeling in SCADA Time Scale, in Proceedings of IEEE PowerTech Conference 2005, St. Petersburg 2005.
- 2) Vaassen, Willi: Evaluation of the Solar Housing Estate in Gelsenkirchen – one of the 50 Solar Housing Estates in North Rhine

- Westfalia, Gemany, in Proceedings of World Renewable Energy Congress VII, Köln 2002.
- 3) Swemers, Peter; Matics, Jens; Gutschek, Andreas; Krost, Gerhard: Nachgeführte PV-Anlage mit einfacher Konstruktion, im Konferenzband zum 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein 2004.
 - 4) Press release Saft-Batteries: New design of specialized rechargeable nickel-cadmium battery, <http://www.saftbatteries.com>
 - 5) Lewald, Norbert: Solare Netze, im Konferenzband zum 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Bad Staffelstein 2004.
 - 6) Glöckner, Ronny: Hydrogen Stand-Alone Power System, a Techno-economic Approach to Assessing the Market Potential of HSAPS, in Proceedings of Fuel Cells for Stationary Applications, London 2003.

Die Autoren

Gerhard Krost, Jahrgang 1953, studierte von 1973 bis 1978 Elektrotechnik mit der Fachrichtung Energietechnik an der Technischen Hochschule in Darmstadt. 1983 promovierte er an der Universität Erlangen über frequenzabhängige Impedanzen von Verbrauchern, Nieder- und Mittelspannungsnetzen. Seine Habilitation folgte 1992 an der Universität Duisburg über Expertensysteme im Bereich elektrischer Energieversorgungsnetze. Krost war von 1978 bis 1985 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität in Erlangen, bevor er zur Universität Duisburg wechselte. Dort war er zunächst Akademischer Rat, bevor er 1992 Privatdozent und 1998 außerplanmäßiger Professor wurde. Er ist Mitglied in verschiedenen Organisationen und arbeitet unter anderem seit 1998 am „Kompetenznetzwerk Brennstoffzelle NRW“ mit.

Jens Matics, Jahrgang 1972, absolvierte sein Studium der Ingenieurwissenschaften 2001. Er hat seine Doktorarbeit im Bereich dezentrale Energiesysteme im Juni 2007 abgeschlossen. Jens Matics ist Mitglied im VDE und VDI.

DuEPublico

Duisburg-Essen Publications online

UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Offen im Denken

ub | universitäts-
bibliothek

Dieser Text wird über DuEPublico, dem Dokumenten- und Publikationsserver der Universität Duisburg-Essen, zur Verfügung gestellt. Die hier veröffentlichte Version der E-Publikation kann von einer eventuell ebenfalls veröffentlichten Verlagsversion abweichen.

DOI: 10.17185/duepublico/73776

URN: urn:nbn:de:hbz:464-20210201-141458-2

Alle Rechte vorbehalten.