Brennstoffzellen zur dezentralen Stromversorgung auf dem Rappenecker Hof

Rudi Kaiser, Nils Reich, Werner Roth, Andreas Steinhüser
Matthias Schneider[1], Volker Höcker[1]
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg
Tel.: 0761/4588-5225, Fax 0761/4588-9225, Andreas.Steinhueser@ise.fraunhofer.de
[1]Phocos AG Deutschland, Bergstrasse 2, 89171 Illerkirchberg, Tel.: 07346/9223-64

1. Einleitung

Der Rappenecker Hof (Gemarkung Oberried am Schauinsland / Freiburg) ist die erste solarversorgte Gaststätte Europas. Seit 1987 wird der Hof von einem Photovoltaik/Wind/Diesel-Hybridsystem versorgt. Zudem gibt es einen thermischen Kollektor für die Warmwasseraufbereitung. Bisher basierte das Systemkonzept auf einer Batterie mit einer Nennspannung von 162 Volt. Solargenerator, Windgenerator und die Ladegleichrichter des Dieselgenerators speisten direkt auf die DC-Schiene ein. Das Grundkonzept des Energieversorgungssystems ist rund 15 Jahre alt.
Um die Systemtechnik an den Stand der Technik anzupassen und wegen des gestiegenen Energiebedarfs aufgrund des geänderten Bewirtschaftungskonzeptes wurde eine Modernisierung des Systems notwendig.

2. Aufbau des Energieversorgungssystems

Ausgangspunkt für die Planung des neuen Energieversorgungskonzeptes war die Überlegung, dass beim Systemumbau der Charakter des Rappenecker Hofs als Pionieranlage für autonome Stromversorgungen weitergeführt und gestärkt werden sollte. Deshalb wurde auf dem Rappenecker Hof die Zusatzstromversorgung durch eine Brennstoffzelle realisiert. Solargenerator und Windgenerator werden auch weiterhin rund 70% der Jahresenergie liefern. Eine 48 Volt Batterie stellt den Ausgleich zwischen Nachfrage- und Angebotsschwankungen sicher. Die Brennstoffzelle wird in Zeiten zu geringen Angebotes seitens der regenerativen Stromerzeuger die Versorgung sicherstellen. Um die Versorgungssicherheit der Anlage zu jedem Zeitpunkt insbesondere auch in der

Abb. 1: Der Solargenerator mit Gasbereitstellungsraum.

Erprobungsphase zu gewährleisten, wurde der vorhandene Motorgenerator in das Energieversorgungskonzept integriert. Bei unzureichender Leistung der verschiedenen Stromerzeuger oder einem Ausfall der Brennstoffzelle übernimmt der Motorgenerator die Nachladung der Batterie.

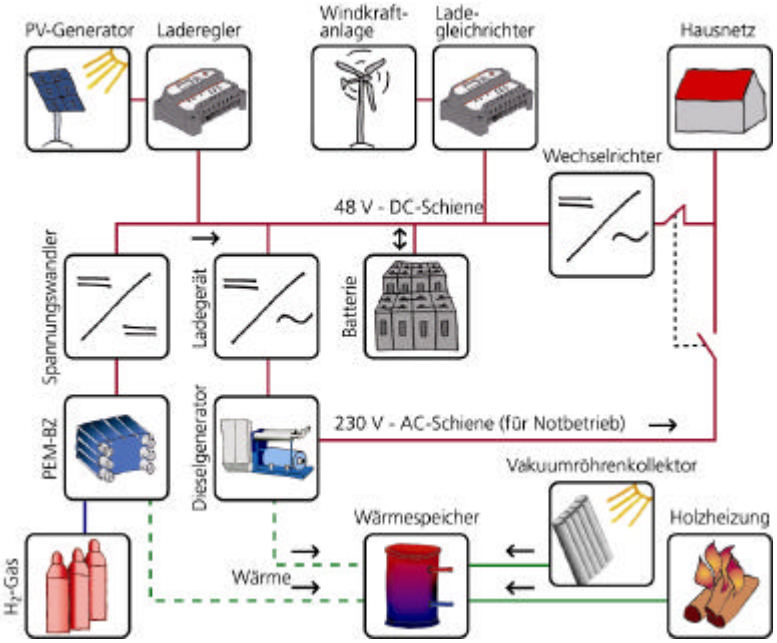


Abb. 2: Blockschaltbild des neuen Energieversorgungskonzeptes. Die Nutzung der Abwärme der Brennstoffzelle und des Dieselgenerators ist bereits konzeptionell vorgesehen, aber noch nicht realisiert.

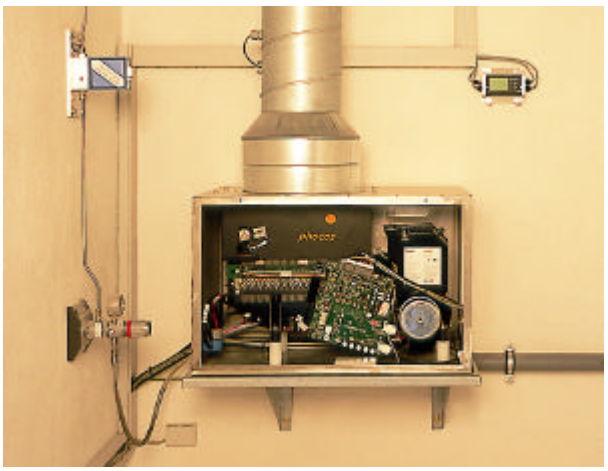
In das am Rappenecker Hof realisierte Energieversorgungssystem sind zwei Wechselrichter mit unterschiedlicher Leistung integriert. Ein 5 kW Wechselrichter versorgt das gesamte Hausnetz mit Ausnahme der beiden Geschirrspülmaschinen. Diese werden, da sie nur sporadisch in Betrieb sind, von einem separaten 3,5 kW Wechselrichter versorgt. Dieser Wechselrichter befindet sich in der Regel im energiesparenden stand-by-Modus. Durch das Vorhandensein von zwei Wechselrichtern ergibt sich zudem eine hohe Redundanz bei Ausfall eines Wechselrichters. In diesem Fall kann der jeweils andere Netzstrang mit geringen Einschränkungen versorgt werden. Aus Gründen der Übersichtlichkeit ist in dem in Abbildung 2 gezeigten Blockschaltbild nur ein Wechselrichter eingezeichnet.

Die Betriebsführung des Gesamtsystems wird vom Laderegler mit übernommen. In Abhängigkeit vom aktuellen Batterieladezustand werden die Brennstoffzelle und der Dieselgenerator automatisch aktiviert und nach Erreichen eines vorgegebenen Ladezustandes wieder abgeschaltet. Selbstverständlich kann der Betreiber bei speziellen Erfordernissen die einzelnen Stromerzeuger auch manuell einschalten. Für den Fall, dass wegen Wartungsarbeiten oder einem Systemausfall das System nicht zur Verfügung steht, kann der Betreiber der Anlage den Dieselgenerator von Hand starten

und ihn, wie im Blockschaltbild gezeigt, direkt auf das Hausnetz schalten. Der für die Betriebsführung notwendige Ladezustand wird vom dem in Kapitel 4 vorgestelltem Batteriemanagement ermittelt und dem Laderegler zur Verfügung gestellt.
Aufgrund des relativ klein dimensionierten Wechselrichters musste bei dem alten Energieversorgungssystem bei sehr hohem Energiebedarf z. B. beim Betrieb der Spülmaschinen der Dieselgenerator manuell zugeschaltet und das Hausnetz direkt auf den Dieselgenerator aufgeschaltet werden. Jetzt kann der gesamte Energiebedarf über die Wechselrichter und die Batterie sichergestellt werden. Damit ist eine optimale Nutzung der regenerativen Energiequellen Sonne und Wind möglich.

3. Die systemtechnische Integration der Brennstoffzelle

Zum Einsatz kam eine wasserstoffbetriebene Polymer-Elektrolyt-Membran (PEM) Brennstoffzelle mit einer Leistung von 1,2 kW. Das Brennstoffzellensystem wurde vom Projektpartner Phocos geliefert und basiert auf einer Ballard-Brennstoffzelle. Das PEM-Brennstoffzellenaggregat benötigt zum Betrieb reinen Wasserstoff und Luftsauerstoff. Am Rappenecker Hof wurde zunächst eine Versorgung aus kommerziellen Gasflaschen realisiert. Das flexible Anlagenkonzept soll aber die Nachrüstung eines Reformers ermöglichen, der Wasserstoff aus kohlenstoffhaltigen Energieträgern (Erdgas, Methan, Biogas, Ethanol, etc.) erzeugt.



Das eingesetzte PEM – Brennstoffzellenmodul ist ein voll integriertes System, das neben dem Brennstoffzellenstack alle wesentlichen Hilfsaggregate und Sicherheitsfunktionen für den Betrieb enthält. Dies beinhaltet die komplette Steuer- und Regelelektronik, die Wasserstoff-/ Sauerstoffversorgung sowie die Kühlung des Stacks. Das Modul ist ausgelegt auf eine maximale Ausgangsleistung von 1,2 kW bei 24 V.

Abb. 3: 1,2 kW PEM-Brennstoffzelle mit Wasserstoff-Durchflussmessgerät und umfangreichen Überwachungseinrichtungen.

Die Ausgangsspannung des Brennstoffzellenmoduls wird über einen 24/48 V DC/DC-Wandler auf bis zu 55,2 V Batteriespannung hochgesetzt. Der Wandler ist I/U-geregelt mit Potentialtrennung und wird durch die Betriebsführung aktiviert.

Damit die Brennstoffzelle vollautomatisch und unbeaufsichtigt sicher betrieben werden kann, wurden folgende passive und aktive Sicherheitsmaßnahmen in die Systemsteuerung integriert:

- Das Brennstoffzellenmodul ist räumlich getrennt vom elektrischen Betriebsraum, vom Batterieraum und von der Wasserstoffbereitstellung untergebracht. Zur Realisierung einer guten Konvektion sind Öffnungen in Tür und Wand vorhanden.
- Im Abluftkanal ist ein Strömungswächter und ein weiterer Wasserstoffsensor angebracht. Diese agieren unabhängig von den internen Sicherungssensoren des Brennstoffzellenmoduls und unterbrechen bei Bedarf über das Hauptventil die Wasserstoffversorgung.
- Ein Schaltdruckmanometer detektiert den Wasserstoffdruck und unterbricht bei Überschreitung des Maximaldrucks ebenfalls die Wasserstoffversorgung zum Brennstoffzellenmodul.
- Das Brennstoffzellenmodul ist von einem geschlossenen, transparenten Gehäuse das eine definierte Luftzufuhr gewährleistet, umgeben. Somit wird eine Wasserstoffleckage unmittelbar am Modul frühzeitig detektierbar.

3.1 Die Wasserstoffbereitstellung

Die Brennstoffzelle wird mit Wasserstoff der Güte 5.0 (99,9990 %) betrieben. Bevorratet wird der Wasserstoff in Druckgasflaschen außerhalb des Gebäudes in einem einseitig zum Freien hin offenen Raum. Der Raum ist so bemessen, dass bis zu 4 Flaschenbündel mit jeweils 12 Druckgasflaschen Platz finden. Der Inhalt eines Flaschenbündels beträgt 106,80 m³ bei einem Druck von 200 bar. An der Rückwand des Bereitstellungsraumes ist die Entnahmeeinrichtung angebracht, an der die Flaschenbündel angeschlossen werden. Mit dem Energieinhalt eines Flaschenbündels kann das Brennstoffzellenmodul bei Nennleistung für ca. 100 Stunden betrieben werden. Während der Projektdauer wird der zum Betrieb der Brennstoffzelle notwendige Wasserstoff von der Firma basi Schöberl GmbH und Co, Rastatt kostenlos zur Verfügung gestellt.

4. Das Batteriemanagementsystem

Die Batterie ist in der Regel für 20 bis 40 % der Lebensdauerkosten in PV-Hybridsystemen verantwortlich und stellt damit die größte Einzelposition dar. Eine Reduktion der Kosten kann nur erreicht werden, wenn durch intelligente Betriebsführung die Lebensdauer deutlich verlängert wird. Dafür wurde für den Rappenecker Hof ein Batteriekonzept entwickelt, welches den unabhängigen Betrieb mehrerer paralleler Batteriestränge erlaubt. Es ist dadurch möglich, einzelne Stränge von der Last abzuschalten. So können sie die für die Lebensdauer so entscheidende Vollladung erfahren, während die anderen Stränge weiterhin die Last versorgen. Über einen DC/DC-Wandler werden Energiemengen zwischen den Batteriesträngen so verteilt, wie es für die Lebensdauer des Gesamtsystems am günstigsten ist.

Das ehemalige 162 V System wurde im Zuge der Neukonzeption der PV-Hybridanlage Rappenecker Hof in drei parallele 48 V Stränge mit je 24 Zellen umgebaut. Jeder dieser Stränge hat eine Kapazität von 200 Ah. Der Verbrauch des Gastgewerbebetriebes des Rappenecker Hofs ist in den letzten Jahren angestiegen und die Batterie ist nun unterdimensioniert. Dieses ungleichmäßige Verhältnis zwischen Energieverbrauch und Speicher führte zu einem Vollzyklus pro Tag und damit zu einer fortgeschrittenen Alterung der Batterie. Die drei 200 Ah Stränge wurden um einen zusätzlichen Strang in der selben OPzS-Technologie mit einer Kapazität von 420 Ah ergänzt. Diese vier Stränge können mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Batteriemanagementsystem (BMS) problemlos mit unterschiedlichen Alterungszuständen parallel betrieben werden.

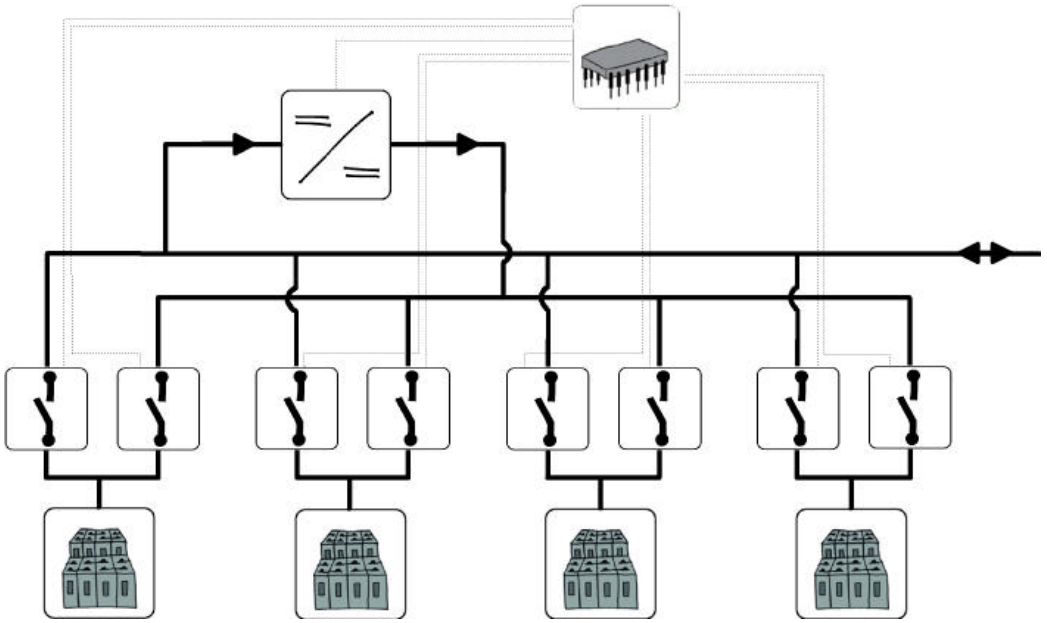


Abb. 4: Konzept des Batteriemanagementsystems.

Das Blockschaltbild zeigt das Konzept des Batteriemanagementsystems. Jede Batterie wird getrennt mit dem BMS verbunden. Dabei werden für jeden Strang die Messwerte Strom, Spannung und Temperatur erfasst. Ebenso werden der gesamte Batteriestrom, der in das Batteriesystem hinein oder heraus fließt, sowie die Spannung auf der gemeinsamen DC-Schiene gemessen. Diese Daten werden von einem Mikrocontroller ausgewertet. Ein Algorithmus auf diesem Mikrocontroller entscheidet auf der Grundlage dieser Daten und der intern durchgeführten Lade- und Alterungszustandsbestimmung, welche Batterie auf die DC-Schiene des PV-Hybridsystems geschaltet werden soll. Lange Zeiten ohne Vollladungen der Batterie, die für PV-Systeme typisch sind, werden durch einen Gleichspannungswandler verkürzt. Dieser erlaubt es, Ladung zwischen den Batterien auszutauschen und so eine Batterie durch eine andere in die Vollladung zu bringen. Bei dieser „Pflegeladung“ werden nur geringe Energiemengen zwischen den Batterien transportiert. Gleichzeitig können

die verbleibenden Speicher den zugeführten Energieertrag speichern oder die Last versorgen. Der Parallelbetrieb ermöglicht damit eine effiziente Energienutzung bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensdauer und Zuverlässigkeit der Batterien. Weiterhin enthält das BMS Ladestrategien, die es ermöglichen aufgrund von Mangelladungen gealterten Batterien wieder ihre Nennkapazität verfügbar zu machen indem Pflegeladungen durchgeführt werden. Das BMS sorgt durch entsprechende Betriebsführung dafür, dass in den jeweiligen Verschaltungen der Batterien keine großen Ausgleichsströme fließen.
Die Leistungsschalter, die die Batterien auf die gemeinsame DC-Schiene schalten, wurden auf MOS-FET-Basis aufgebaut. Dabei wurden 5 Transistoren parallel verschaltet, um die geforderte Strombelastbarkeit von 150 A je Strang zu erreichen. Über eine Ansteuerplatine können die Batterien von dem Mikrocontroller zu oder von der gemeinsamen Schiene geschaltet werden. Die Ansteuerplatine verhindert über Hardwarelogikgatter, dass eine Batterie gleichzeitig auf die DC-Schiene und auf den Ausgang des DC/DC-Wandlers geschaltet wird und so den Wandler kurzschließt.
Der verwendete Algorithmus zur SOC-Bilanzierung wurde am Fraunhofer ISE für den Einsatz auf Mikrocontrollern entwickelt und enthält Korrekturalgorithmen auf der Basis von Expertenwissen. Es wird so eine Genauigkeit der Ladezustandserfassung von 10% erreicht, ohne dass eine Rekalibrierung durch eine Vollladung erfolgen muss.
Die Alterungsbestimmung findet über einen am ISE entwickeltem Algorithmus statt, der die Kapazität einer Batterie im laufenden Betrieb bestimmt. Dafür wird ein Batteriestrang über die Verbraucher im System entladen, während die Speicherung in Zeiten von Stromüberschuss von den restlichen Strängen übernommen wird. Dieser Algorithmus erreicht bei einer Entladung von nur 80 % der Batteriekapazität eine Genauigkeit von ca.10 %.
Das Batteriesystem inklusive Batteriemanagement stellt nach außen einen Zweipol dar und kann wie eine konventionelle Batterie an das System angeschlossen werden. Zusätzlich stellt es nach außen den Lade- und Alterungszustand des Speichersystems zur Verfügung.

5. Erste Messergebnisse

Der Bau der Anlage wurde im ersten Halbjahr 2003 geplant und durchgeführt. Die Anlage ist seit September 2003 in Betrieb. Im Herbst 2003 wurde eine umfangreiche Messtechnik mit automatischer täglicher Datenübertragung an das Fraunhofer ISE installiert. Die wichtigsten Messgrößen werden parallel auch auf einer grafischen Visualisierungstafel den Besuchern der Anlage präsentiert. Die komplette Messdatenerfassung wurde am 1. Dezember in Betrieb genommen. Deshalb können hier bei Redaktionsschluss dieses Beitrags (Mitte Dezember 2003) nur erste Ergebnisse kurz vorgestellt werden.

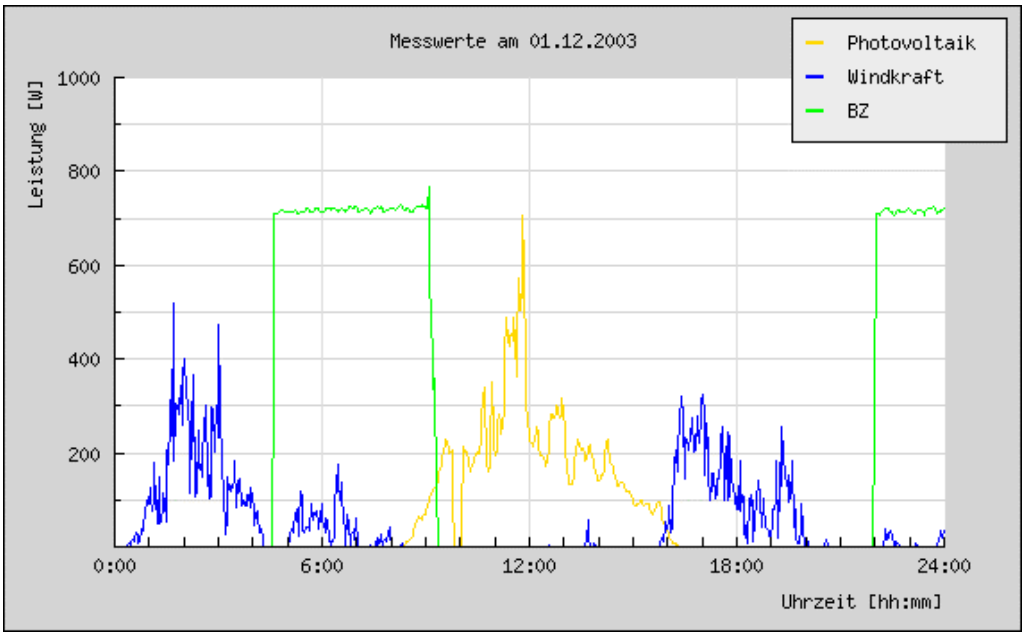


Abb. 5: Verlauf der Energiebeiträge von Photovoltaik, Windkraft und Brennstoffzelle.

In Abbildung 5 ist zu erkennen, wie die Brennstoffzelle gut die Lücken in der Energieversorgung bei schwachem Wind und bei fehlender solarer Einstrahlung schließen kann. Wind und Sonne ergänzen sich an diesem Tag sehr gut.

6. Ausblick

Neben der Modernisierung der Energieversorgung des Rappenecker Hofes ist es Ziel dieses Projektes, Brennstoffzellen zur Versorgung netzferner Anlagen einzusetzen und zu demonstrieren. Wichtig ist, dass Brennstoffzellen zu diesem Zeitpunkt in realen Anlagen unter Feldtestbedingungen eingesetzt werden und somit wichtige Anstöße für die Weiterentwicklung gegeben werden können. Zudem soll die Technologie einer breiten Öffentlichkeit in der Anlage demonstriert werden. Ein innovatives Batteriesystem stellt ein weiteres technologisches Highlight der neuen Energieversorgung dar.

Die Realisierung der Anlage wurde durchweg mit kommerziellen Komponenten durchgeführt, auch um festzustellen, inwieweit der Markt bereits die notwendige Technik bereit stellt. Schwerpunkt der 2-jährigen Erprobungsphase ist die systemtechnische Optimierung der einzelnen Systemkomponenten. Dank der umfangreichen Messtechnik können auch spezielle Fragestellungen gezielt untersucht werden.

Die Modernisierung der Stromversorgung auf dem Rappenecker Hof wurde möglich dank der Förderung durch den Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG, Freiburg. Die beteiligten Projektpartner Familie Riesterer, Oberried; Phocos AG – Deutschland, Illerkirchberg sowie das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg beteiligten sich ebenfalls mit beträchtlichen Eigenmitteln an der Finanzierung dieses Projektes.

Fuel Cells for a decentralised power supply at the "Rappenecker Hof"

The "Rappenecker Hof", a hikers' inn on the Schauinsland mountain near Freiburg, Germany, is the first solar-powered inn in Europe. A hybrid system consisting of photovoltaics, a wind turbine and a diesel generator has supplied electricity since 1987. In addition, thermal solar collectors provide domestic hot water. Up to now, the system concept has been based on a battery with a rated voltage of 162 V. The solar generator, wind turbine and the rectifier from the diesel generator fed electricity directly to the DC circuit. The fundamental power supply concept is about 15 years old. Technical progress in systems technology and an increased energy consumption resulting from changes in the inn's catering concept have enforced to modernise the system.

The starting point in planning of the new power supply concept was the decision to continue and reinforce the "Rappenecker Hof's" character as a pioneering system for stand-alone power supplies. For this reason, a fuel cell was chosen as the auxiliary power supply for the "Rappenecker Hof". The photovoltaic generator and the wind turbine will continue to supply around 70 % of the annual energy consumption, a 48 V battery will compensate for fluctuations in supply and demand, and the fuel cell will guarantee a reliable power supply during times when the contribution from the renewable energy sources is too low. To ensure that the system can supply electricity reliably at all times, the existing diesel generator will be integrated into the power supply concept as a backup system. If insufficient power is available or the fuel cell should break down, the diesel generator will ensure that the battery can be recharged.

A hydrogen-driven polymer-electrolyte-membrane (PEM) fuel cell, with a power rating of 1.2 kW, is used. The fuel cell system was supplied by a project partner, Phocos AG - Germany, and is based on a Ballard fuel cell. PEM fuel cells require pure hydrogen and oxygen from ambient air. Initially, the gas for the "Rappenecker Hof" is being supplied from gas cylinders. However, the flexible system concept allows for later inclusion of a reformer, which produces hydrogen from fuels containing carbon compounds (natural gas, methane, biogas, ethanol, etc.).

Besides modernising the power supply for the "Rappenecker Hof", another goal of this project is to use and demonstrate fuel cells in off-grid systems. Since fuel cells have to be applied in real systems under field test conditions, in order to provide valuable information for further development experiences gained are vital for the future. In addition, it is intended to demonstrate the technology in the system to the general public.