

Abschlußbericht zum Projekt

Brennstoffzellen zur dezentralen Stromversorgung auf dem Rappenecker Hof

Andreas Steinhüser

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

Tel.: 0761/4588-5225, Fax 0761/4588-9225

Andreas.Steinhueser@ise.fraunhofer.de

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 19 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.



Abb. 1: Der Rappenecker Hof unterhalb des Schauinsland-Gipfels.

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 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.

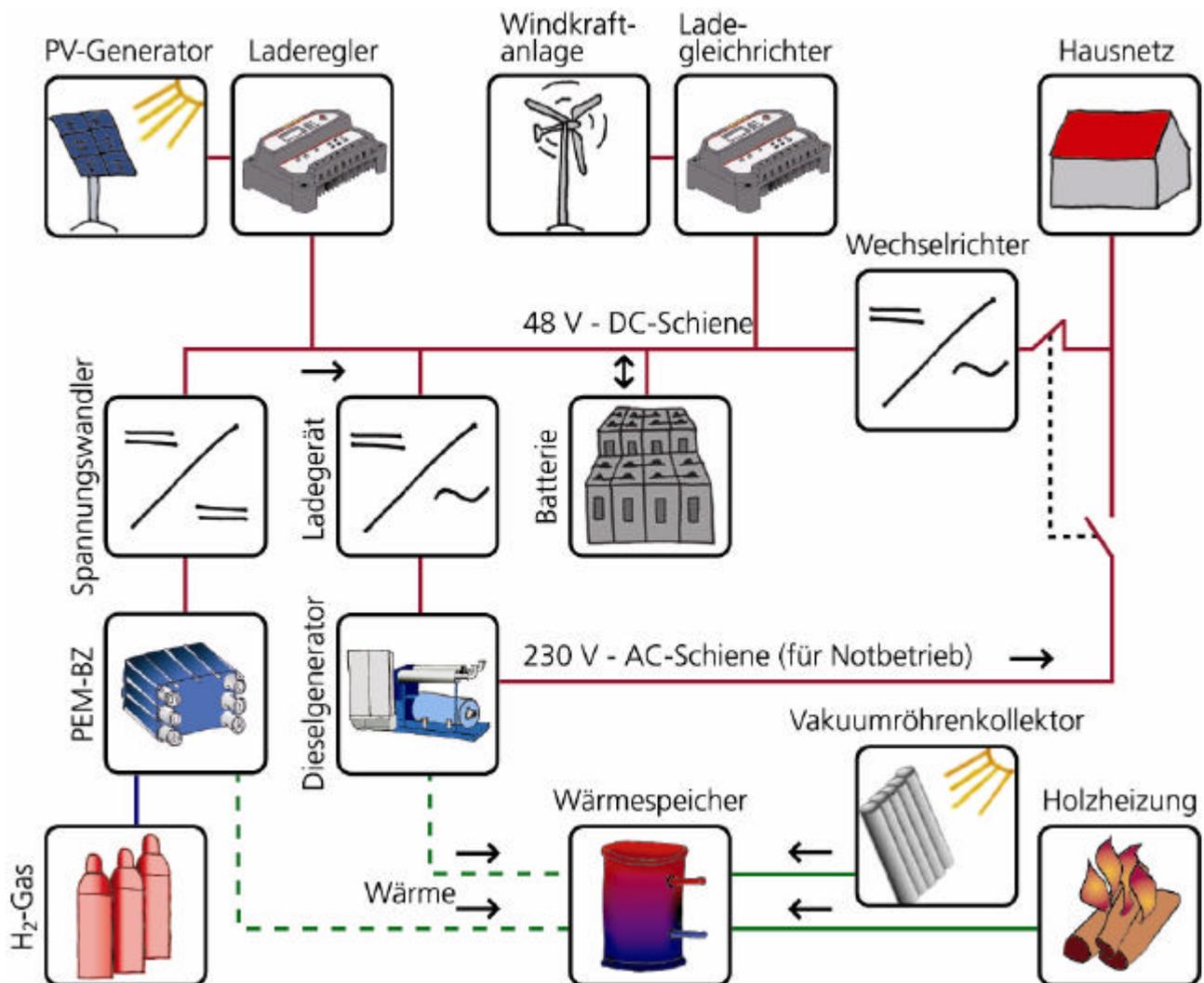


Abb. 2: Blockschaubild des neuen Energieversorgungskonzeptes. Die Nutzung der Abwärme der Brennstoffzelle und des Dieselgenerators ist bereits konzeptionell vorgesehen, aber noch nicht realisiert.

In das am Rappenecker Hof realisierte Energieversorgungssystem sind zwei Wechselrichter mit unterschiedlicher Leistung integriert. Ein 7 kW Wechselrichter versorgt das gesamte Hausnetz mit Ausnahme der beiden Geschirrspülmaschinen. Diese werden, da sie nur sporadisch in Betrieb sind, von einem separaten 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 vorgestellten Batteriemangement 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.

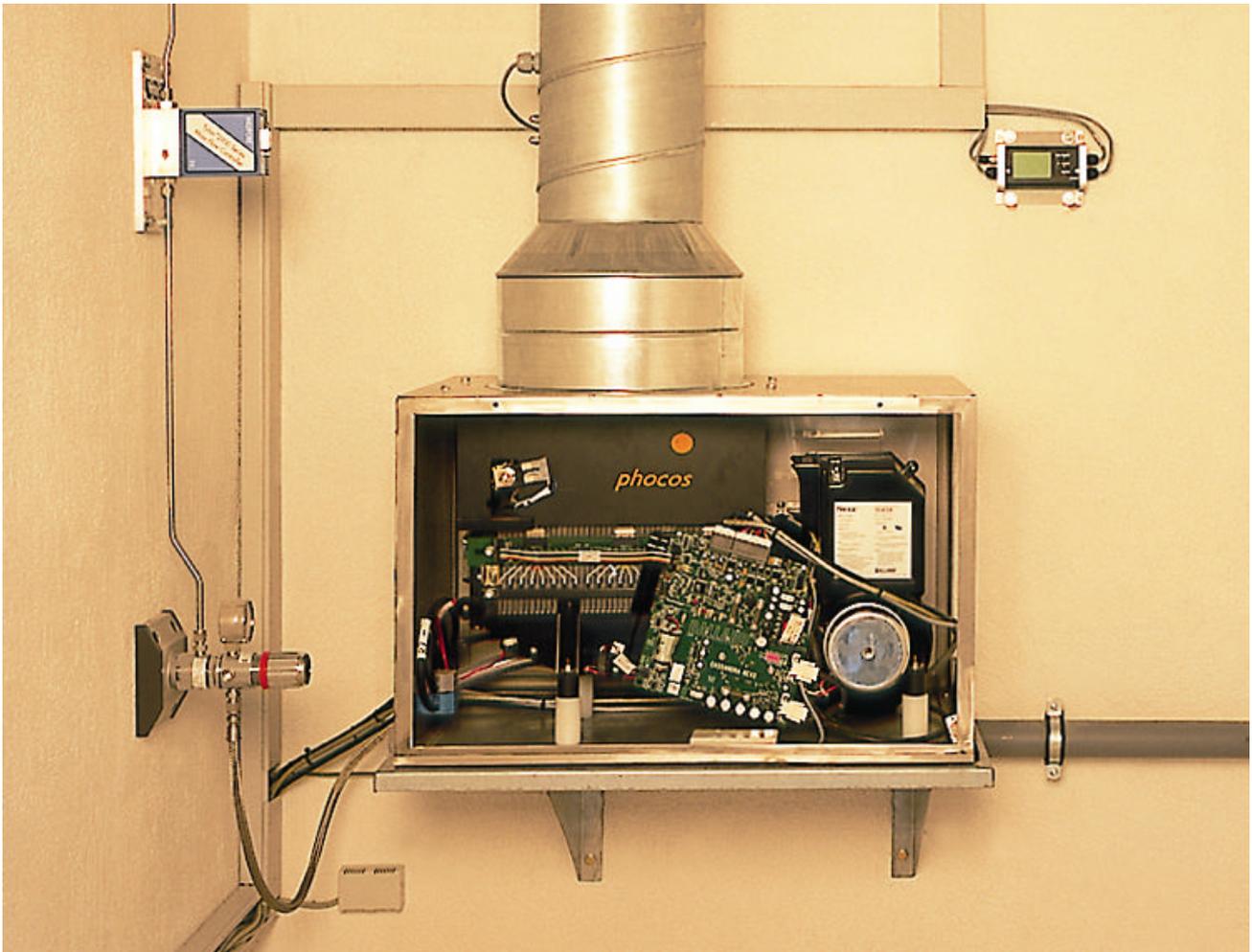


Abb. 3: 1,2 kW PEM-Brennstoffzelle mit Wasserstoff-Durchflussmessgerät und umfangreichen Überwachungseinrichtungen.

Die Ausgangsspannung des Brennstoffzellenmoduls wird über einen 24/48 V DC/DC-Wandler auf die Batteriespannung hoch gesetzt.

Bei der Vermessung der Anlage zeigte sich, dass der ursprünglich eingesetzte industriell gefertigte Wandler die Brennstoffzelle nicht im optimalen Arbeitspunkt betreibt und zudem nur einen sehr geringen Wirkungsgrad von etwa 75 % erreicht. Deshalb wurde am Fraunhofer ISE ein speziell für den Einsatz in Brennstoffzellensystemen optimierter Spannungswandler entwickelt. Durch den Einsatz von zwei Hochsetzstellern mit Synchrongleichrichtern konnte der Wirkungsgrad auf ca. 98 % gesteigert werden (Abbildung 4). Außerdem verfügt der Spannungswandler über einen Steuereingang, so dass er direkt von der Brennstoffzelle eingeschaltet werden kann. Deshalb ist zum Durchschalten des Energieflusses von der Brennstoffzelle kein verlustbehaftetes Relais mehr notwendig. Durch die minimalen elektrischen Verluste des Wandlers kann auch bei einer Wandlerleistung von bis zu zwei Kilowatt auf einen Kühlkörper vollständig verzichtet werden. Die Verwendung von SMD-Transistoren ermöglicht einen einfachen und kostengünstigen Aufbau. Alle Bauteile sind direkt auf der Platine platziert, so dass keine externen Bauteile wie z. B. Drosseln mehr verdrahtet werden müssen.

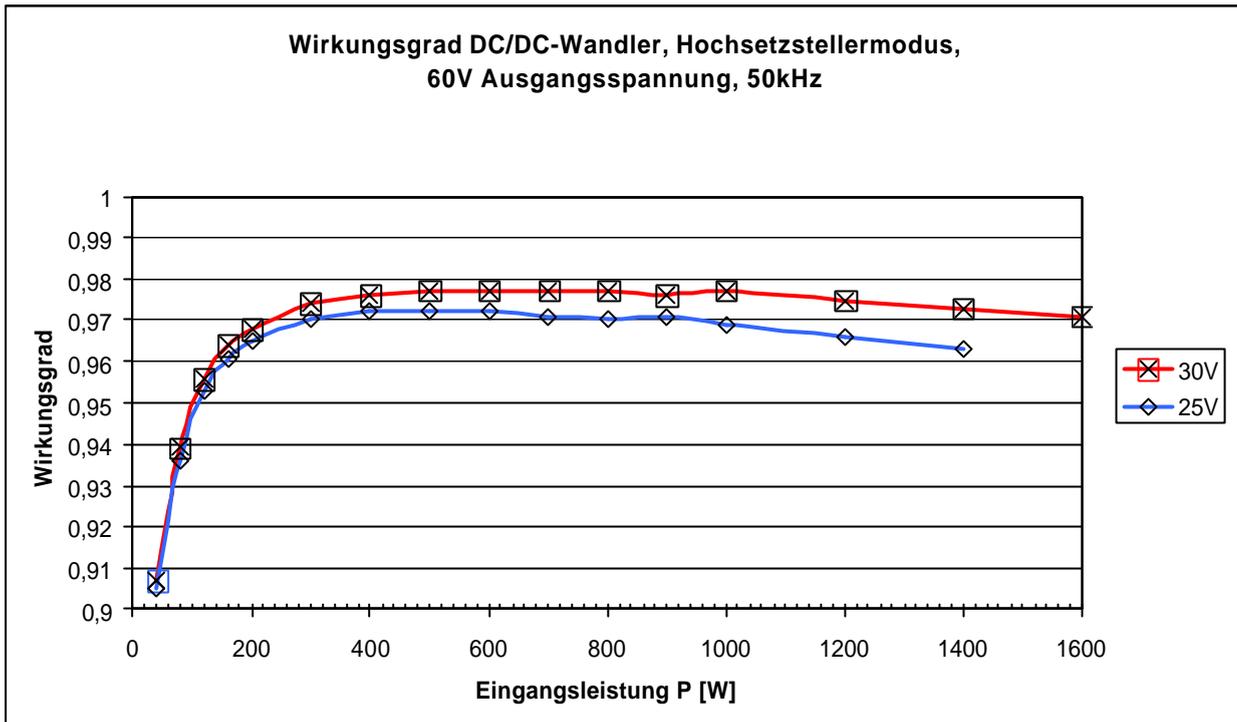


Abb. 4: Wirkungsgradkennlinien des neu entwickelten Spannungswandlers.

Damit die Brennstoffzelle vollautomatisch und unbeaufsichtigt sicher betrieben werden kann, wurden folgende passive n und aktiven 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 Wasserstoffsensoren angebracht. Diese agieren unabhängig von den internen Sicherheitssensoren des Brennstoffzellenmoduls und unterbrechen bei Bedarf über das Hauptventil die Wasserstoffversorgung.
- Ein Schalldruckmanometer 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 (99,999 %) 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.



Abb. 5: Der Rappenecker Hof mit dem Solargenerator. Links daneben der Gasbereitstellungsraum für die Energieversorgung der Brennstoffzelle.

4. Das Batteriemanagementsystem

Die Batterie ist in der Regel für 20 bis 40 % der Lebensdauerkosten in PV-Hybridssystemen 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 Hof 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 derselben 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.

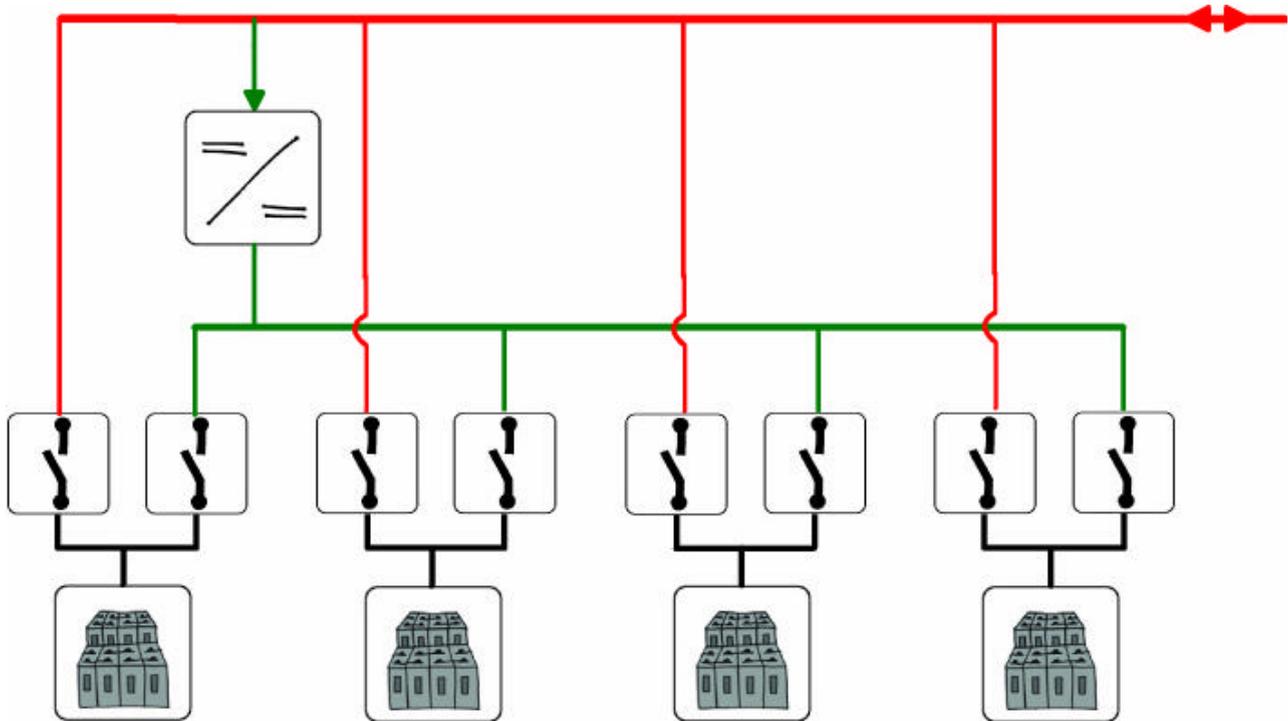


Abb. 6: Konzept des Batteriemanagementsystems.

Das Blockschaftbild 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 entwickelten 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 Batteriemangement 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. Betriebserfahrungen mit dem PV-Hybridssystem

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 gewonnenen Messdaten erlauben eine detaillierte Untersuchung sämtlicher Anlagenfunktionen und geben wichtige Hinweise zur weiteren Optimierung des Gesamtsystems.

Abbildung 7 verdeutlicht wie die prinzipielle Betriebsführung der Energieversorgung des Rappenecker Hofs funktioniert. Bei günstigen Witterungsverhältnissen kann die Photovoltaik – in Kombination mit der Windenergieanlage und der Brennstoffzelle - den Energiebedarf des Rappenecker Hofs vollständig abdecken. Im Tagesverlauf übernimmt zunehmend die PV-Anlage die Stromversorgung (gelb). Gegen Abend steigt dann wiederum die Stromproduktion aus der Windenergieanlage an (blau). Während der Vormittags- und Nachmittagsstunden hingegen reichen die Sonnenenergie und die Windkraft nicht aus, um den Energiebedarf der Gaststätte voll zu decken. Zu diesen Zeiten wird automatisch die Brennstoffzelle zugeschaltet (grün).

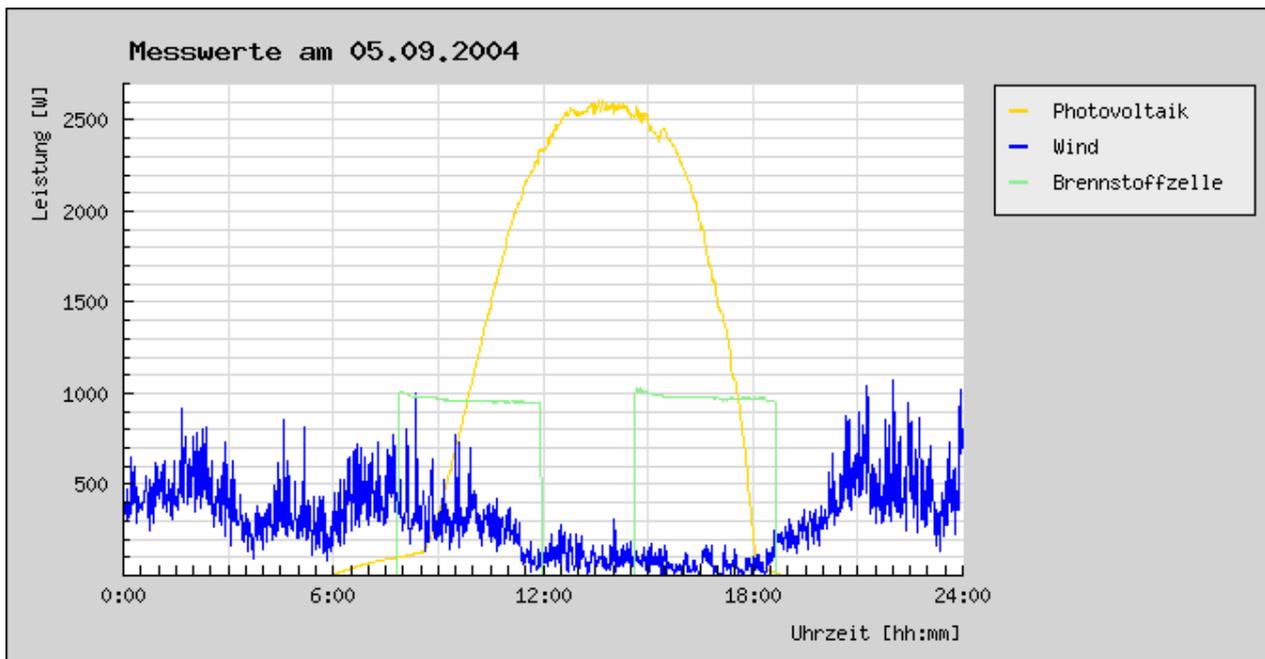


Abb. 7: Verlauf der Energiebeiträge von Photovoltaik, Windkraft und Brennstoffzelle.

Die wichtigsten Messgrößen werden zusätzlich auch auf zwei Informationstafeln den Besuchern der Anlage vor Ort präsentiert.

Eine Informationstafel im Eingangsbereich des Rappenecker Hofs beschreibt den Aufbau des Energieversorgungssystems und zeigt auf vier Anzeigen den momentanen Energieverbrauch sowie die derzeitige Energieerzeugung der Photovoltaik, der Windkraft und der Brennstoffzelle an. Eine grafische Visualisierungstafel bei den Technikräumen zeigt anschaulich die momentanen Energieflüsse im gesamten System und gibt zusätzliche Informationen über die einzelnen Systemkomponenten.

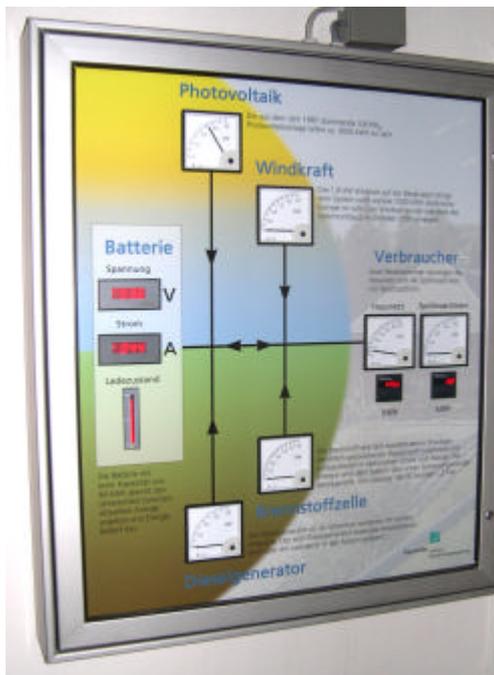


Abb. 8: Visualisierungstafel an den Technikräumen (links) und Informationstafel im Eingangsbereich (rechts).

Bei der Auswertung der Messergebnisse zeigte sich, dass die angestrebte Minimierung der Laufzeit des Dieselgenerators nicht erreicht wurde. Abbildung 9 zeigt den Verlauf der monatlichen Energieflüsse im Jahr 2004.

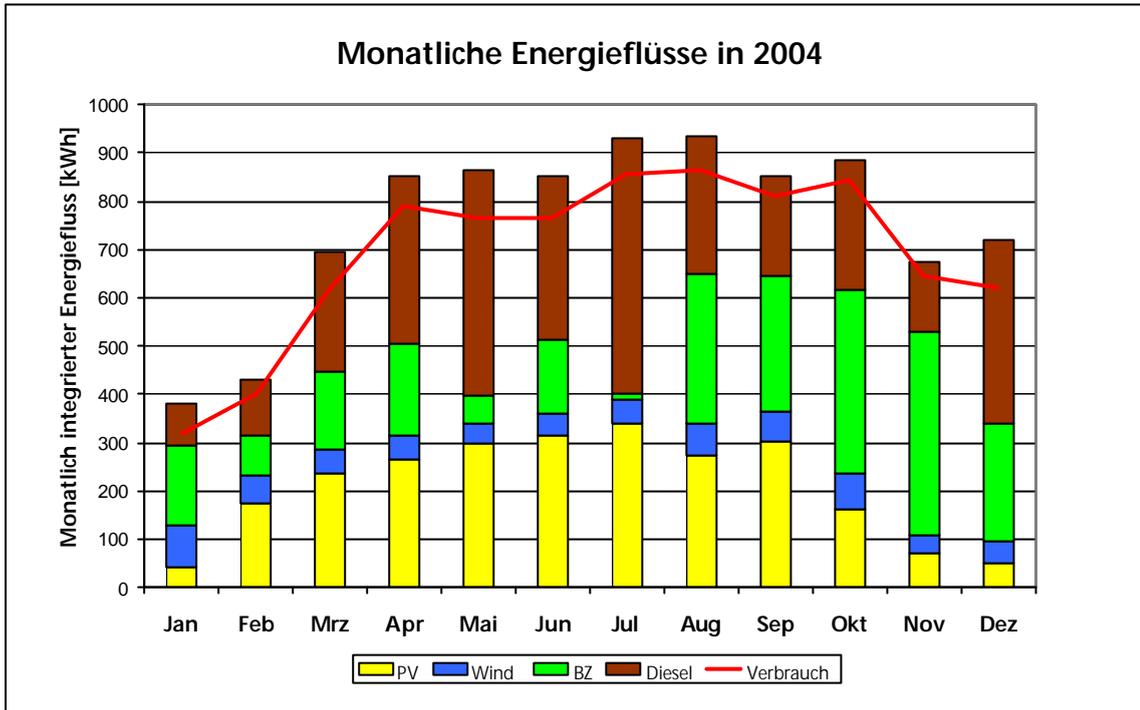


Abb. 9: Verlauf der monatlichen Energieflüsse im Jahr 2004.

Verantwortlich für die hohen Laufzeiten des Dieselgenerators war hauptsächlich der gegenüber der Energieverbrauchsprognose deutlich erhöhte Energiebedarf. Abbildung 10 zeigt, dass der Gesamtverbrauch im ersten Jahr nach dem Umbau der Energieversorgung fast 8300 kWh betragen hat. Bei der Planung der Energieversorgung im Frühjahr 2003 wurde ein zukünftiger Energieverbrauch von 7200 kWh angenommen. Die starke Erhöhung des Energieverbrauchs ist durch die energieintensive Betriebsweise der Gaststätte durch den Pächter zu erklären. Beispiele hierfür sind die sehr niedrigen Temperaturen mit denen die Kühleinrichtungen betrieben wurden, sowie der intensive Einsatz von zwei Industriespülmaschinen. Eine weitere Ursache für den hohen Anteil des Dieselgenerators an der Stromerzeugung ist der Ausfall der Brennstoffzelle in den Monaten Mai und Juli. Nachdem die Probleme mit der Brennstoffzelle (Ausfall der internen Sensorik und des Kompressors) behoben wurden, arbeitete die Brennstoffzelle wieder störungsfrei. Vom Hersteller wird die Lebensdauer der Brennstoffzelle mit ca. 1500 Stunden angegeben. Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt drei Brennstoffzellen eingesetzt. Die Laufzeiten lagen hierbei zwischen 1800 und 2000 Stunden.

Neben den Problemen mit der Brennstoffzelle gab es im ersten Betriebsjahr auch einige Ausfälle des neuen Windrades. Durch eine Änderung der Windradsteuerung und durch eine Verstärkung des Windradgehäuses sowie durch eine Kapselung der Schleifringe zur Energieübertragung konnte das Windrad deutlich verbessert werden. Sämtliche Änderungen an dem Windrad wurden von der Herstellerfirma im Rahmen der Garantie durchgeführt. Seit Anfang 2005 arbeiten sowohl die Brennstoffzelle als auch das Windrad stö-

rungsfrei. Aufgrund der böigen Windverhältnisse am Standort und wegen der einfachen Windnachführung des Windrades bleiben die Erträge des Windrades weiterhin etwas hinter den Erwartungen zurück.

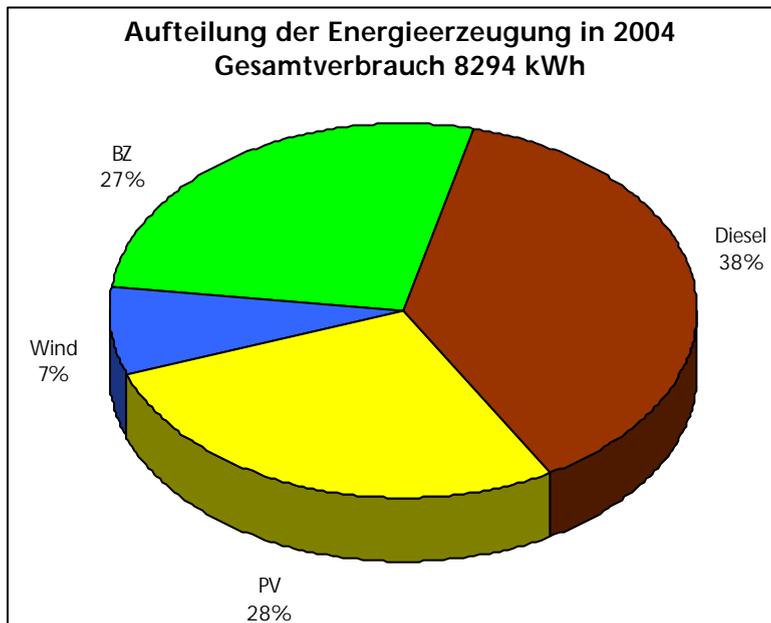


Abb. 10: Aufteilung der Energieerzeugung im Jahr 2004.

Wie in Abbildung 11 zu sehen, kann ab Juni 2005 trotz der relativ geringen Erträge durch das Windrad die Energieversorgung des Rappenecker Hofes fast vollständig ohne den Einsatz des Dieselgenerators bereitgestellt werden.

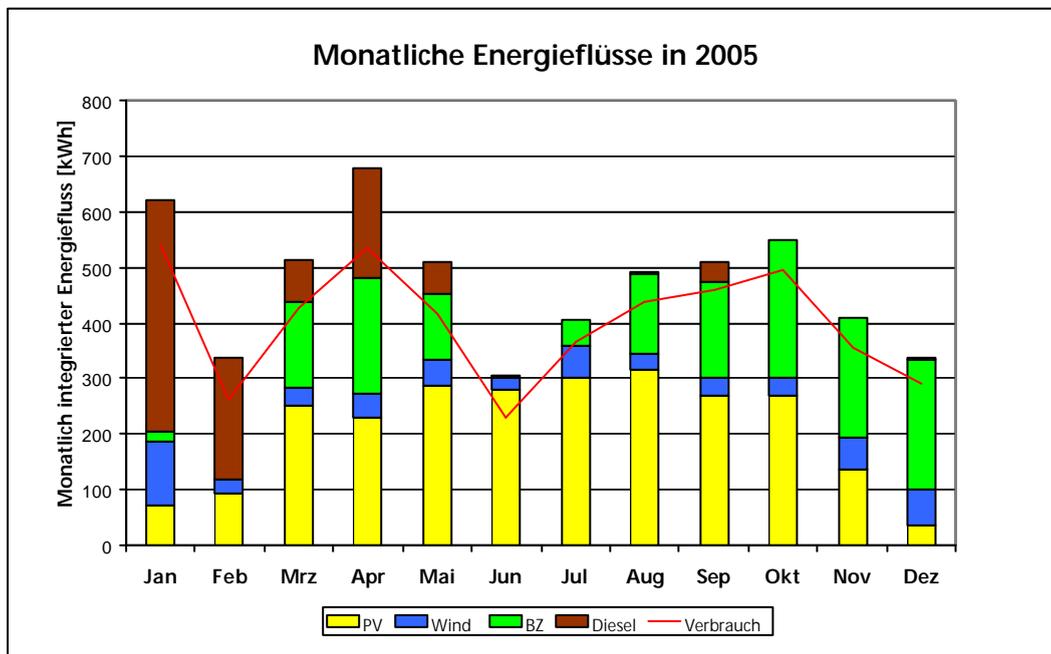


Abb. 11: Verlauf der monatlichen Energieflüsse im Jahr 2005.

Im Juni 2005 fand am Rappeneck Hof ein Pächterwechsel statt. Mit diesem Wechsel einher ging auch eine Änderung im Bewirtschaftungskonzept der Gaststätte. Neben einer Änderung des Speisenangebots, wodurch der Kühlaufwand deutlich verringert werden konnte, wurde auch das Getränkeangebot der besonderen Energiesituation am

Rappenecker Hof angepasst. Deshalb wurden die großen Kühleinrichtungen für Fasswein und für gezapftes Bier abgeschafft. Das Bier wird jetzt wieder aus Flaschen ausgeschenkt. Durch diese und weitere Maßnahmen zur Energieverbrauchsreduzierung wurde es möglich den Hof, so wie ursprünglich geplant, fast ausschließlich mit regenerativen Energien und mit Unterstützung der Brennstoffzelle energetisch zu versorgen.

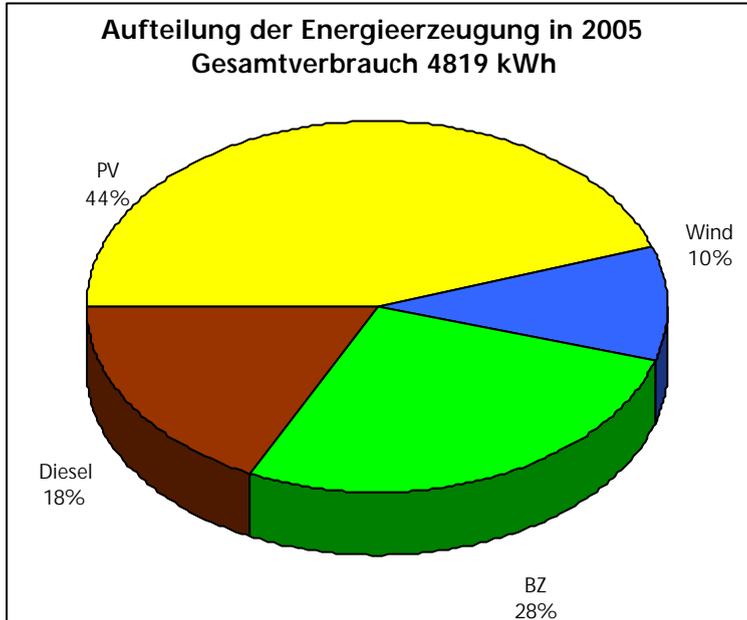


Abb. 12: Aufteilung der Energieerzeugung im Jahr 2005.

Die Aufteilung der Energieerzeugung für das Jahr 2005 (Abbildung 12) zeigt, dass lediglich noch 18 % der benötigten Energie durch den Dieselmotor erzeugt werden mussten. Hierbei ist zu beachten, dass dieser Anteil des Dieselmotors fast ausschließlich in den Monaten Januar bis Mai, also noch vor dem Pächterwechsel benötigt wurde.

6. Zusammenfassung

Neben der Modernisierung der Energieversorgung des Rappenecker Hofes war es Ziel dieses Projektes, Brennstoffzellen zur Versorgung netzferner Anlagen einzusetzen und zu demonstrieren. Zudem sollte die Technologie einer breiten Öffentlichkeit in der Anlage demonstriert werden. Nach Abschluss des Projektes kann festgestellt werden, dass es gelungen ist eine zuverlässige Energieversorgung mit den regenerativen Energien Sonne und Wind in Kombination mit einer Brennstoffzelle zu realisieren. Das Ziel des Projektes die Laufzeiten des Dieselmotors so weit wie möglich zu reduzieren wurde durch die optimale Abstimmung aller Systemkomponenten und die durchgeführten Maßnahmen zur Energieeinsparung vollständig erreicht.

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, Ulm sowie das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg beteiligten sich ebenfalls mit beträchtlichen Eigenmitteln an der Finanzierung dieses Projektes.