

Wasserstofftechnik in stationären autonomen Stromversorgungssystemen

Fraunhofer ISE

Dr. Tim Meyer

tim.meyer@
ise.fraunhofer.de

Andreas Steinhüser

andreas.steinhueser@
ise.fraunhofer.de

Felix Holz

felix.holz@ise.fraunhofer.de
Puls@ise.fraunhofer.de

Georg Bopp

georg.bopp@
ise.fraunhofer.de

Dr. Bruno Burger

bruno.burger@
ise.fraunhofer.de

Einleitung

Stationäre autonome Stromversorgungssysteme zählen zu den möglichen Vorreitermärkten für Brennstoffzellen. Insbesondere in Photovoltaik- oder Photovoltaik-Wind-Hybridsystemen könnten Brennstoffzellen die Rolle des Zusatzstromerzeugers übernehmen. Bei nicht ausreichenden Sonnenscheinintensitäten und Windgeschwindigkeiten können sie die Versorgungslücke schließen. Im Leistungsbereich von einigen 10 Watt bis zu wenigen kW sind hier für heute keine befriedigenden konventionellen technologischen Lösungen für autonome Stromversorgungssysteme am Markt verfügbar. Im Folgenden wird dieser Anwendungsbereich anhand der Erfahrungen aus Planung und Feldbetrieb einer 1 kW-Brennstoffzelle am Rappenecker Hof sowie einem vollständig autarken System mit einem Wasserstoffsystem als Saisonspeicher dargestellt.

Einsatzgebiete für Brennstoffzellen in stationären autonomen Systemen

Technische Stromversorgungen wie z. B. Messstationen, Telekommunikations- oder Telematikanlagen werden häufig in sehr abgelegenen Gegenden betrieben und müssen kostengünstig und zuverlässig mit Strom versorgt werden. Dies erfolgt heute meist mit Hybridsystemen in denen Solarzellen, Wind- oder Wasserkraft sowie ein Batteriespeicher und möglicherweise ein Diesel-Generator als Zusatzstromerzeuger zusammenwirken. Auch Wohnhäuser, ländliche Gewerbebetriebe, Tourismusanlagen und Gaststätten sind Anwendungen für ähnlich aufgebaute Hybridsysteme.

Brennstoffzellen könnten in solchen Hybridsystemen die Zusatzstromerzeugung übernehmen.

Die Kapazität der Wasserstoffsysteme reicht dabei von einigen Wochen bis zu einigen Monaten zur Aufrechterhaltung des Betriebes. Damit treten sie in Konkurrenz zu herkömmlichen Dieselgeneratoren. Ebenso können Brennstoffzellen Batterien ersetzen. In diesem Fall sind Wasserstoffsysteme auch als Saisonspeicher denkbar, in denen die elektrische Überschussenergie aus den Solarzellen im Sommer durch Elektrolyse in Wasserstoff gewandelt, gespeichert und im Winter in einer Brennstoffzelle wieder in Strom gewandelt wird (Abb. 1).

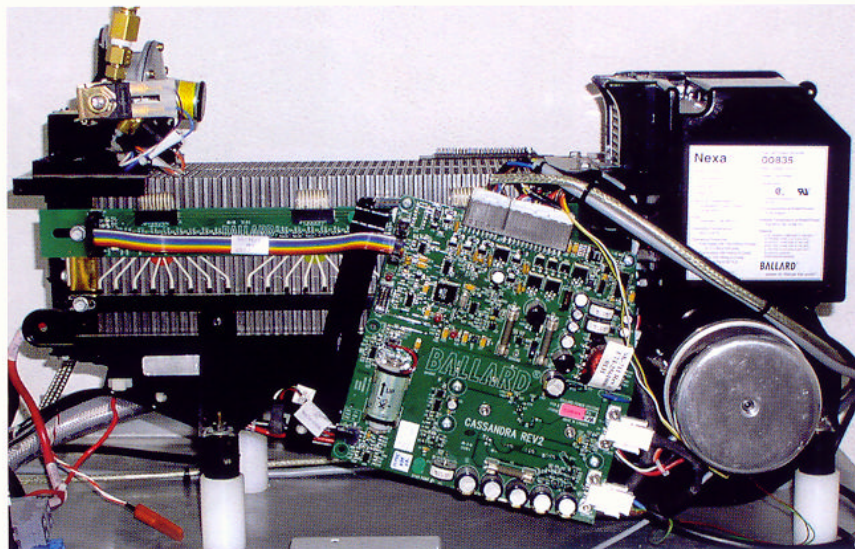
Brennstoffzellen haben gegenüber Dieselgeneratoren prinzipielle Vorteile, die allerdings in heutigen Komponenten technologisch noch nicht immer umgesetzt werden konnten:

- höherer Wirkungsgrad, gerade im Teillastbetrieb
- geringere Emissionen von Lärm und Schadstoffen
- kleinerer Wartungsbedarf

Diese prinzipiellen Vorteile können der Brennstoffzellentechnologie auch bei höheren Kosten Wettbewerbsvorteile gegenüber anderen Zusatzstromerzeugern sichern. An den Nachteilen wie der teuren Sicherheitstechnik sowie der aufwändigeren Brennstoffversorgung von PEM-Brennstoffzellen mit Wasserstoff oder durch Reformierung aus Kohlenwasserstoffen muss aber noch gearbeitet werden.

Praxiserfahrungen aus Projekten in Deutschland und Spanien

Das Fraunhofer ISE hat Technologien für Brennstoffzellen, Leistungselektronik und Regelungstechnik entwickelt sowie mehrere Projekte durchgeführt, die intensive Praxistests auch



bereits auf dem Markt erhältlicher Technologien beinhalten. Solche Tests mit Dauerbetrieb von Komponenten und Anlagen sind wesentlich für die Identifikation des weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarfes und des Marktpotenziales neuer Technologien. Im Folgenden werden die Erkenntnisse aus den Projekten „Rappenecker Hof“ und „FIRST“ zusammen gefasst.

Rappenecker Hof: Hybridsystem mit Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger

Das Hybridsystem am Rappenecker Hof ist seit 1987 in Betrieb und wurde im Jahr 2003 für die gestiegenen Lastanforderungen und mit einer 1,2 kW-Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger ertüchtigt. Solar- und Windgenerator liefern ca. 40% der Jahresenergie der saisonal betriebenen Gaststätte. Der vorhandene Motorgenerator blieb in das Energieversorgungssystem eingebunden, um die Verfügbarkeit in der Erprobungsphase und nach Projektende (d. h. ohne Brennstoffzelle) sicherzustellen. Ein innovatives Batteriemanagementsystem des Fraunhofer ISE soll die Lebensdauer der in der Zwischenzeit unterschiedlich stark gealterten Komponenten maximieren. Eine ausführliche Dokumentation des Projektes kann in [1] nachgelesen werden.

Das Wasserstoffsystem besteht aus einem 1,2 kW-Brennstoffzellen-Stapel der Firma Ballard (inkl. allen Hilfsaggregaten), einem Gleichstromwandler zur Anpassung der Ausgangsspannung auf das Batterieniveau, einer Laderegulierung sowie

einem Wasserstoffspeicher mit Druckgasflaschen (Reichweite ca. 400 Betriebsstunden) und der notwendigen Sicherheitstechnik. Der Sauerstoff für die Brennstoffzelle wird der Luft entnommen, was in der Höhenlage von 1000 Metern zu einer Reduktion der Brennstoffzellen-Leistung auf 1,1 kW führt.

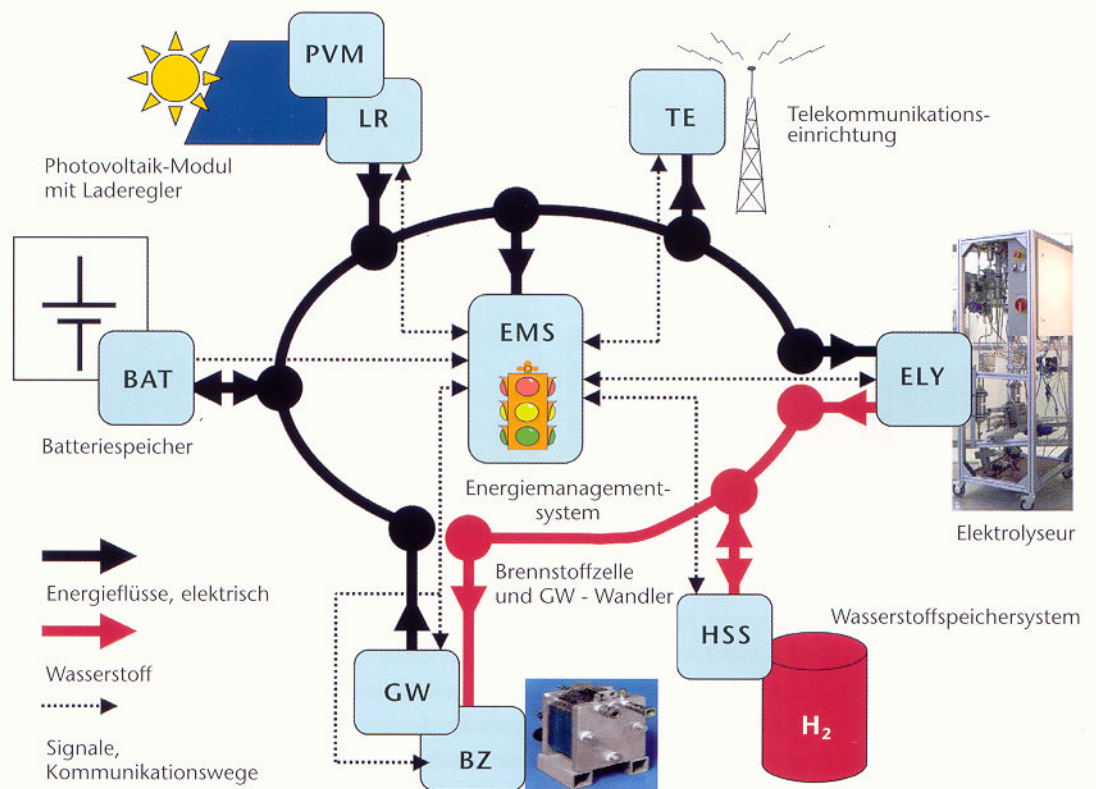
Seit September 2003 ist das Wasserstoffsystem mit insgesamt 3500 Betriebsstunden in Betrieb. Nach 2020 Stunden musste der erste Brennstoffzellenstapel wegen Ausfalls einer Zelle ausgetauscht werden. *Abb. 2* zeigt die typische Betriebsführung der Brennstoffzelle an einem Tag mit guter Sonneneinstrahlung und Erträgen aus dem Windrad.

Nach nunmehr über einem Jahr Betrieb der Anlage können folgende Erfahrungen aus der Planungsphase und dem Betrieb festgehalten werden:

- Der Zusatzaufwand für die Sicherheitstechnik ist erheblich. Am Markt verfügbare Wasserstoff-Sensoren, die den Betrieb in der Praxis absichern, sind teuer und müssen regelmäßig erneuert werden. Bereits über die Projektlaufzeit von 3 Jahren liegen die Aufwendungen bei mehreren tausend Euro. Auch der Aufwand für Lüftungstechniken muss noch reduziert werden.

*Abbildung 1
Brennstoffzellenstapel
und Wasserstofflager*

Abbildung 2
Typische Betriebsführung der Brennstoffzelle an einem Tag im September 2004. Am Vormittag und am Nachmittag (wenn Solarertrag und Windkraft nicht zur Deckung der Last ausreichen) wird die Brennstoffzelle zugeschaltet.



- Zum Zeitpunkt des Projektbeginns waren kaum Gleichspannungs-Wandler GW verkäuflich, die die Ausgangsspannung des Brennstoffzellen-Stapels von 24 V bis 36 V auf die Batteriespannung von 48 V heraufsetzen. Das Fraunhofer ISE entwickelte daher selbst einen Wandler mit einem optimalen Wirkungsgrad (97%). Dabei kann demonstriert werden, dass ein Wandler auch ohne Kühlkörper auskommt und so besonders leicht in Brennstoffzellen-Packages integriert werden kann. Generell müssen Brennstoffzelle und Leistungselektronik eng aufeinander abgestimmt werden.
- Hersteller verlangen heute einen Betrieb der Brennstoffzelle mit Wasserstoff der Güte 5.0 (99,9990%). Die Kosten dieses Brennstoffs liegen nach Abzug der Umwandlungsverluste in der Brennstoffzelle mit ca. 2,80 €/kWh elektrischer Energie sehr hoch. Um autonome Stromversorgungen als Markt erschließen zu können, müssen die Anforderungen an die Brennstoffqualität und damit die Kosten deutlich gesenkt werden.
- Die Lebensdauer der Brennstoffzelle hat zwar die Garantie des Herstellers überschritten, ist mit ca. 2000 Stunden aber für die Erschließung von Märkten noch deutlich zu klein.
- Insgesamt läuft der Betrieb des Wasserstoffsystems annähernd störungsfrei. Die Zuverlässigkeit der Komponenten ist gut.

FIRST:

Wasserstoffsystem als Saisonspeicher in einer technischen Stromversorgung

Zur autonomen Versorgung einer Telekommunikationseinrichtung mit durchschnittlich 150 W Dauerlast wurde im EU-Projekt „FIRST“ ein System mit geschlossenem Wasserstoffkreis als Saisonspeicher aufgebaut. Standort ist Madrid. Ein 1 kW-Elektrolyseur wandelt Überschussenergie aus dem 1,5 kW-Solarzellen-Generator im Sommer in Wasserstoff. Dieser wird in einem Metallhydridspeicher (äquivalent 100 kWh elektrischer Leistung) gelagert und im Winter über eine 300 W-Brennstoffzelle wieder in Strom gewandelt. Ca. 7% des Jahresenergieverbrauchs werden über den Wasserstoffkreis geführt.

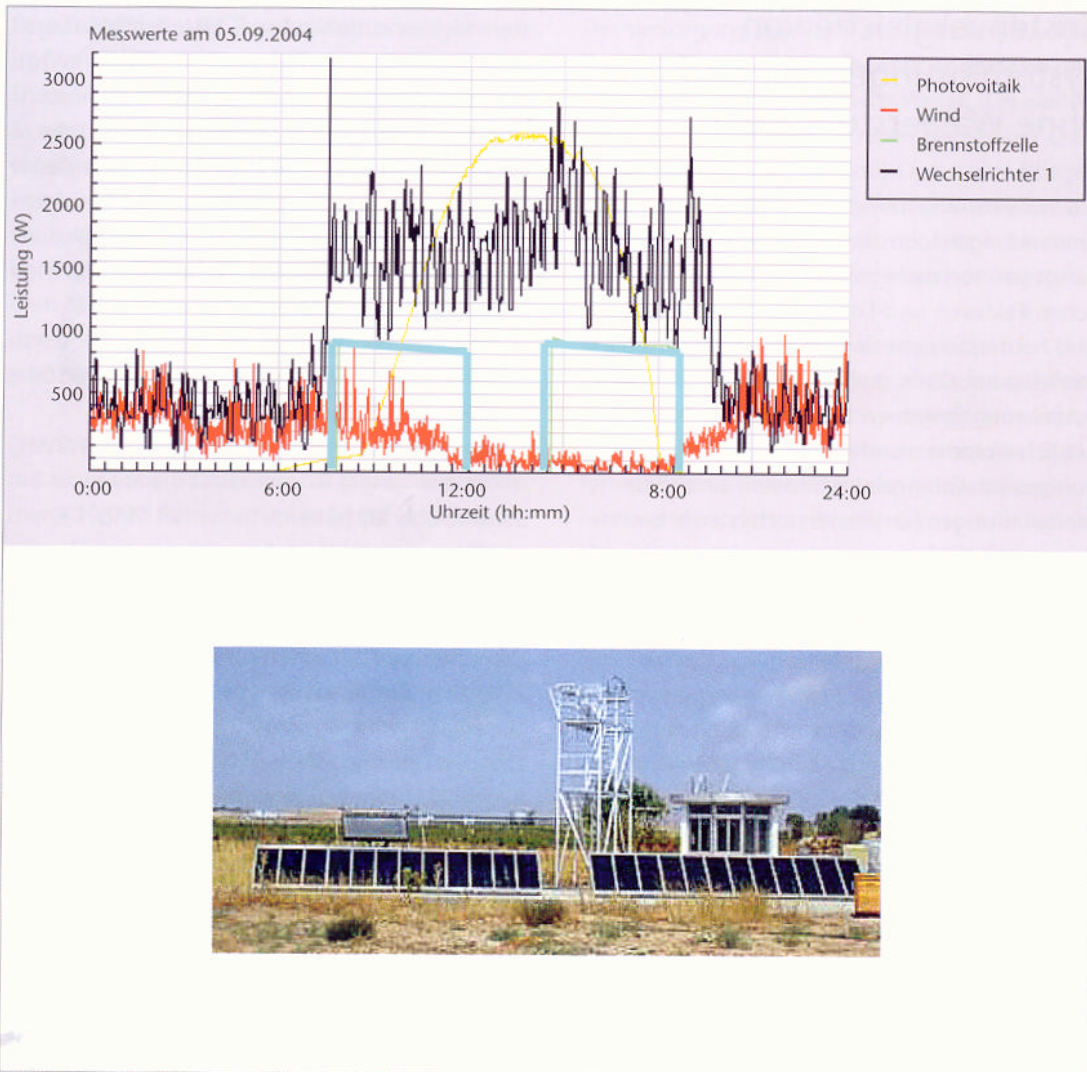


Abbildung 3
Systemkonzept der
Stromversorgungs-
anlage in „FIRST“
und Foto der Anlage

Mit der Anlage konnte ein vollständig autarker Betrieb demonstriert werden. Trotz eines effizienten Energiemanagements zeigen die Erfahrungen aus Planung und Betrieb, dass Wasserstoffsysteme als Saisonspeicher noch erhebliche Technologieentwicklung und Kostensenkung benötigen, um eine Marktchance zu erhalten:

- Die Komplexität des Wasserstoffsystems und die Abhängigkeit der Komponenten untereinander ist erheblich. Für einen zuverlässigen und wartungsarmen Betrieb muss eine Vielzahl von Betriebszuständen beherrscht und in seinen Auswirkungen auf Lebensdauer und Wirkungsgrade verstanden sein.
- Die Temperaturabhängigkeit des Be- und Entladeverhaltens von Metallhydridspeichern vermindert die nutzbare Speicherkapazität erheblich. Beim Einlagern im Sommer ist hoher Druck notwendig (bis über 10 bar) während bei der Entnahme im Winter nur niedriger Druck entnommen werden kann (in diesem System benötigt die Brennstoffzelle mindestens 2 bar). Damit kann im gegebenen System nur etwa 50% der theoretischen Speicherkapazität genutzt werden.
- Die Wasserstoff-Speichertechnik ist teuer (Metallhydrid) oder potenziell zu energieaufwändig (Druckspeicher).
- Besondere Schwachstellen sind Komponenten der Systemperipherie (Pumpen, Ventile, Sensoren).

Kostenvergleiche von Systemlösungen mit und ohne Wasserstoffsystem

Ob Wasserstoffsysteme in den beschriebenen Anwendungsfeldern Einzug erhalten werden, hängt von technologischen und wirtschaftlichen Faktoren und Entwicklungen ab. Diese sind heute nur schwer vorherzusagen und zu modellieren. Da in die Lebensdauerkosten von autonomen Systemen die Betriebskosten erheblich eingehen und nicht nur die Abschreibungen für Anfangsinvestitionen, sind diese Modellierungen für Wasserstoffsysteme besonders erschwert¹.

Die folgenden Kostenvergleiche wurden zwar ohne detaillierte Modellierung von Kostenfaktoren und Betriebsführungsstrategien erstellt, beinhalten aber keine Barwertermittlung unter Berücksichtigung von Inflation und Zinsen. Sie sind daher lediglich als Plausibilitätsprüfungen zu verstehen. Sie geben wertvolle Anhaltspunkte ob das entsprechende Marktsegment überhaupt für Wasserstofftechnologie attraktiv ist und welche technologischen Ziele hierfür in etwa erreicht werden müssen. Es ist auch zu beachten, dass die Sicherheitstechnik heute noch sehr hohe Kosten verursacht, die ebenfalls erheblich reduziert werden müssen.

Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger im Vergleich mit einem reinen PV-System

Im Sinne einer Extremwertbetrachtung wird ein reines Photovoltaik-Batterie-System mit einem Hybridsystem PV-Batterie-Brennstoffzelle verglichen. Es wird angenommen, dass in einem größeren Photovoltaik-Batterie-System ein Anteil von 10 kWh/d der Last über vier Wintermonate nicht mehr über Photovoltaik, sondern über eine Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger bereitgestellt werden soll. Dies entspricht in unseren Breiten etwa einer PV-Generatorleistung von 10 kW, um die der PV-Generator im Hybridsy-

stem kleiner ausfallen kann. Inklusive Montage und Laderegler spart dies ca. 50 T. Die 10 kWh/d sollen im Alternativsystem über eine Brennstoffzelle von 1 kW Leistung bereitgestellt werden, die täglich 10 h läuft. Für das Brennstoffzellensystem ergeben sich überschlägig mit heutiger Technologie (Wirkungsgrad 33 %, 2000 h Lebensdauer, benötigte H₂-Qualität 5.0) folgende Kostenfaktoren:

• Kosten pro Brennstoffzelle (fällt über 20 Jahre 12 Mal an)	12 x 3500 €
• H ₂ -Qualität 5.0	2,8 €/kWh _e
Summe über 20 Jahre	115 T €

Darin sind Transportkosten für den Wasserstoff, die je nach Standort erheblich variieren, nicht enthalten. Es liegt auf der Hand, dass allein der 12-malige Austausch der Brennstoffzellen nicht akzeptabel wäre. Auch die Brennstoffkosten sind erheblich zu hoch. Nimmt man für die selbe Rechnung jedoch eine verbesserte Brennstoffzellentechnologie an (Wirkungsgrad 40 %, 10000 h Lebensdauer, benötigte H₂-Qualität 3.0), ergibt sich eine deutlich bessere Perspektive:

• Kosten Brennstoffzellen (fällt über 20 Jahre 3 Mal an)	3 x 3500 €
• H ₂ -Qualität 3.0	0,6 €/kWh _e
Summe über 20 Jahre (ohne Transportkosten)	31 T €

Der Vergleich zeigt, dass technologisch neben der erforderlichen Erhöhung der Lebensdauern vor allem auch die Anforderungen an die Brennstoffqualität reduziert werden müssen. Gelingt dies, scheinen entsprechende Systeme als Alternative zu reinen PV-Systemen interessant. In diesem Fall kann je nach Anwendung als weiterer Vorteil die durch einen zweiten Stromerzeuger im System steigende Systemverfügbarkeit geltend gemacht werden.

Anwendungen wären also Bereiche, in denen sonst 100 % PV-Versorgung notwendig wäre, z. B. weil Diesel als Zusatzgenerator wegen Lärm- und Abgasemissionen oder eines Standortes mit sehr hohen Wartungskosten (Anfahrtskosten) nicht in Frage kommt.

¹ Am Fraunhofer ISE wurden auch detaillierte Lebensdauerkosten-Berechnungen für spezielle Anlagenauslegungen im Rahmen des Projektes FIRST durchgeführt. Dabei wurde ein umfassender Modellansatz mit dem ebenfalls am Fraunhofer ISE entwickelten Software-tool „TALCO“ (Technical and Least Cost Optimisation) verwendet.

Brennstoffzelle als Zusatzstromerzeuger im Vergleich mit einem Photovoltaik-Diesel-Hybridsystem

Es wird angenommen, dass 1 kW Zusatzstromerzeugerleistung ersetzt werden soll. In einem konventionellen Hybridsystem würde diese Leistung über einen überdimensionierten Diesel bereitgestellt, da kleinere Aggregate nicht auf dem Markt verfügbar sind (nur als Benzin, deren Wartungskosten aber für die hier unterstellte Anwendung zu hoch sind).

Der Diesel-Generator im Referenzsystem wird mit einer Lebensdauer von 10 Jahren angenommen (20.000 Betriebsstunden) und der elektrische Wirkungsgrad η mit 15 %. Damit ergeben sich Kraftstoffkosten von ca. 0,7 €/kWh elektrischer Energie. Eine kleine Wartung (Ölwechsel) soll alle 500 Betriebsstunden durchgeführt werden (je 150 €) und eine große Wartung einmal pro Jahr (500 €). Die groben Kostenfaktoren sind dann:

• Investition (10 Jahre Lebensdauer)	2 x 3 T€
• Kraftstoff ($\eta = 15\%$)	0,7 €/kWh _e
• Wartung (2000 h/a Betrieb Teillast)	1,1 T€/a
Summe über 20 Jahre	56 T€

Im Alternativsystem wird direkt eine Brennstoffzelle mit 10.000 h Lebensdauer angenommen, die mit 2000 Volllaststunden/a und Wasserstoff 3.0 betrieben wird:

• Investition (Lebensdauer 10000 h)	4 x 3,5 T€
• Kraftstoff H ₂ -Qualität 3.0 ($\eta = 40\%$)	0,6 €/kWh _e
Summe über 20 Jahre	38 T€

Auch in dieser Wettbewerbssituation scheint also ein Brennstoffzellensystem prinzipiell Marktchancen zu besitzen, wenn die technologischen und wirtschaftlichen Ziele (inkl. kostengünstiger Sicherheitstechnik) erfüllt werden. Vorteile entstehen vor allem bei Leistungen, für die keine entsprechenden Diesel-Generatoren auf dem Markt sind und wenn der Aufwand für Brennstofftransport und -speicherung begrenzt ist.

Die Versorgung der Brennstoffzelle aus flüssigen Brennstoffen wäre hier gegenüber gasförmigem Wasserstoff von erheblichem Vorteil. Ein weiterer Vorteil von Brennstoffzellen gegenüber Diesel-Generatoren ist, dass mit Diesel eine Pflege- und Ladung von Batterien nicht sinnvoll möglich ist, da diese in extremer Teillast mit sehr schlechten Wirkungsgraden betrieben werden müssten.

Wasserstoffsystem als Saisonspeicher

Es wird ein Wasserstoffsystem als Saisonspeicher in autonomen Stromversorgungen betrachtet. In unseren Breiten muss in einem solchen System der PV-Generator stets so groß dimensioniert werden, dass er in einem konventionellen Hybridsystem wenigstens einer 80 %-igen solaren Deckung entsprechen würde, zuzüglich des Ausgleichs der Verluste, die in der Speicherkette Elektrolyseur – H₂-Speicher – Brennstoffzelle entstehen. Andernfalls würde im Sommer nicht genügend Überschussenergie erzeugt, um den Bedarf im Winter zu decken.

Da konventionelle Hybridsysteme mit Dieselgenerator an „einfachen“ Standorten in der Regel kostenoptimal mit ca. 50 - 70 % solarer Deckungsrate ausgelegt werden, können Wasserstoffsysteme als Saisonspeicher hier nicht konkurrieren: alleine die Zusatzinvestitionen in den größeren PV-Generator verteuern das System bereits.

Als Marktnische kommen daher nur Anwendungen in Frage, in denen das konventionelle System ohnehin mit hoher solarer Deckungsrate ausgelegt würde, z. B. über 90 %. Gründe hierfür können ein besonders entlegener Standort sein, Emissionen von Zusatzstromerzeugern oder Zuverlässigkeitskriterien. Wie in dem Projektbeispiel deutlich wird, macht allerdings die hohe Komplexität von Wasserstoffsystemen für Saisonspeicher und daran geknüpft ihre Kosten und der Wartungsbedarf noch auf längere Sicht den Markteinstieg solcher Systeme unwahrscheinlich.

Zusammenfassung

Stationäre autonome Stromversorgungen stellen tatsächlich einen realistischen Einstiegsmarkt für Wasserstoffsysteme und Brennstoffzellen dar, vorerst jedoch als Zusatzstromerzeuger und erst mittelfristig als Saisonspeicher – wenn Konkurrenztechnologien wie etwa die Redox-Flow-Battery sich nicht als vorteilhafter erweisen sollten. Zu seiner Erschließung müssen jedoch einige, aus heutiger Sicht teilweise ambitionierte, Ziele erreicht werden:

- Erhebliche Erhöhung der Lebensdauer von Brennstoffzellen und ihren Systemkomponenten auf 10.000 h
- Reduzierung der Anforderungen an die Brennstoffqualität
- Vereinfachung und Kostensenkung in der Sicherheitstechnik
- Zuverlässigere und kostengünstigere Komponenten für die Systemperipherie (Pumpen, Ventile, Sensoren)
- Verbesserte Systemintegration von Brennstoffzellen und Leistungs- und Regelungselektronik
- Für Saisonspeicher Kostensenkung und Steigerung der Zuverlässigkeit der sehr komplexen Systeme (Elektrolyser – H₂-Speicher – Brennstoffzelle) und günstigere Speichertechnologie
- In Outdoor-Anwendungen Entwicklung von Technologien für entsprechende Temperaturbereiche (bis -20 °C)

Danksagung

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 ISE, Freiburg beteiligten sich ebenfalls mit beträchtlichen Eigenmitteln an der Finanzierung dieses Projektes. Die Firma basi Schöberl GmbH und Co, Rastatt stellt den Wasserstoff kostenlos zur Verfügung.

Das Projekt FIRST wurde unter Koordination von INTA, Spanien gemeinsam mit den spanischen Forschungsinstituten CIEMAT und ICP-CSIC, der französischen Firma Air Liquide, der italienischen Firma Nuvera Fuel Cells sowie Würth Elektronik und dem Fraunhofer ISE aus Deutschland durchgeführt. Als Beobachter nehmen die Firmen INABENSA und CHLORIDE aus Spanien teil. Das Projekt wird in Teilen von der Europäischen Gemeinschaft im Rahmen des Forschungsvertrages ERK5-CT1999-00018 finanziert.

Literatur

- [1] A. Steinhüser, R. Kaiser, N. Reich, W. Roth, M. Schneider:
Brennstoffzellen zur dezentralen Stromversorgung auf dem Rappenecker Hof, 19. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein 2004
- [2] J. Benz, B. Hacker, U. Wittstadt, F. Isorna, A.M. Chaparro, L. Daza:
Autonomous PV-hybrid system with electrolyser and fuel cell: Operating experience, EuroSun, Freiburg 2004
- [3] J. Benz, T. Meyer, D.U. Sauer, A. Vegas:
Integrated Design Approach for PV Hybrid Systems, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka 2003
- [4] W. Roth, J. Benz, B. Ortiz, D. U. Sauer, A. Steinhüser:
Fuel Cells in Photovoltaic Hybrid Systems for Stand-Alone Power Supplies, 2nd European PV Hybrid and Mini Grid Conference, Kassel 2003