

Das Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald

SWB
Ein Unternehmen der
Bayernwerk-Gruppe



Schriftenreihe Solarer Wasserstoff Solar-Wasserstoff-Anlage Nr. 10

Erschienen in VDI Berichte, Nr. 1174, 1995

Regenerative Energieversorgung am Beispiel des SWB-Projekts Neunburg vorm Wald, unter besonderer Berücksichtigung von Brennstoffzellenanlagen

A. Szyszka

Zusammenfassung

In Neunburg vorm Wald, Oberpfalz, wurden in industrieller Größenordnung wichtige technische Systeme einer möglichen zukünftigen Solar-Wasserstoff-Energiewirtschaft errichtet /1/. Erste technische Aspekte eines schrittweisen Übergangs aus der bisher vornehmlich fossil ausgerichteten Energieversorgung wurden berücksichtigt. Untersuchungsschwerpunkte des Vorhabens sind das Verhalten der hauptsächlich aus Prototypen innovativer Technologien bestehenden Anlagenteilsysteme sowie ihr gegenseitiges Zusammenspiel unter praxisorientierten Betriebsbedingungen.

Die Auswertungen sollen eine verlässliche Datenbasis zur aktuellen Beurteilung von Chancen und Problemen der Solar-Wasserstoff-Technik schaffen.

Dieses Tagungspapier (Stand Dezember 1994) konzentriert sich auf die Technik und den Betrieb der Anlage unter besonderer Behandlung von regenerativer Energieversorgung und Brennstoffzellenanlagen auf die Zielsetzung und Realisierung des Projekts sowie den Anlagentestbetrieb.

1. Einleitung

Die Ende 1986 gegründete Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH (SWB), ein Beteiligungsunternehmen der Gesellschafter Bayernwerk AG (70 % Anteil), BMW INTEC Beteiligungs GmbH, Linde AG über eine 100 %-Tochter GmbH und Siemens AG (je 10 % Anteil) realisierte, betreibt und ergänzt derzeit die oben skizzierte Demonstrationsanlage für Systeme einer möglichen zukünftigen Solar-Wasserstoff-Energiewirtschaft.

Das Vorhaben ist, in Projektphasen unterteilt, längerfristig angelegt. Das geplante Investitionsvolumen von ca. DM 64 Mio für die 5 Jahre bis Ende 1991 dauernde Phase 1 wurde eingehalten. Das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT) und das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr (BStMWV) förderten den bezuschussungsfähigen Teil der Kosten mit 35 % resp. 15 %.

Derzeit befindet sich das Projekt bei gleicher Förderquote der öffentlichen Hand in einer zunächst den Zeitraum 1992 - 1996 umfassenden 2. Projektphase.

Im Zusammenhang mit zwei Ende November 1994 bestellten elektrochemischen Anlagenteilsystemen laufen zusätzlich die Vorbereitungen für eine Verlängerung des Anlagenbetriebs bis Ende 1999. Das gesamte Kostenvolumen des Zeitraums 1992 - 1999 wird derzeit auf ca. DM 81 Mio geschätzt.

Somit werden im SWB-Projekt im Zeitraum von 13 Jahren ca. DM 145 Mio investiert worden sein.

2. Projektziele

Übergeordnete Zielsetzung des Solar-Wasserstoff-Projekts ist die Erprobung der entsprechenden Techniken im industriellen Demonstrationsmaßstab. Soweit vorhanden, sollen unterschiedliche Technologien verglichen und im Zusammenwirken mit anderen Anlagenteilsystemen getestet werden. Die Lieferanten wurden zur Mitgestaltung der Versuchsprogramme eingeladen. Da ein Markt für Solar-Wasserstoffsysteme der beschriebenen Art praktisch noch nicht existiert, sollen damit auch das Interesse der Industrie sowie Forschungs- und Entwicklungsvorhaben angeregt werden. Für die SWB und deren Gesellschafter stand, unterstützt durch ausreichende Kenntnis systeminterner Vorgänge (nicht nur "black box"- Betrieb), die Gewinnung von Know-how für Planung, Montage und Betrieb entsprechender Anlagen im Vordergrund, u. a. auch, um auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse eine qualifizierte und realistische Öffentlichkeitsarbeit mit Informationen aus erster Hand betreiben zu können.

3. Konzept Gesamtanlage

Die *Hauptsysteme der Gesamtanlage* sind in *Abb. 1* schematisch dargestellt.

3.1 Anlagenteilsysteme der Phase 1

Es wurden folgende *Anlagenteilsysteme* realisiert:

- Solargeneratoren in mono- und polykristalliner Technik mit Feld-Nennleistungen von 135 kW_p bzw. 131 kW_p
- elektrische Leistungsaufbereitung (Gleichstromsteller, Gleichstromschiene, Elektrolysestromversorgungen, Umrichter, Drehstromschiene, Wechselrichter)
- 2 fortgeschrittene Niederdruck-Wasserelektrolyseure unterschiedlicher Technologie mit 111 kW_{el} bzw. 100 kW_{el} Nennleistung. Maximale Wasserstofferzeugung gesamt 47 Nm³/h
- H₂-/O₂-Gassysteme zur Aufbereitung und Speicherung der elektrolytisch erzeugten Gase (≥99,9 Vol.-% H₂ bzw. O₂)
- 2 Gasheizkessel mit Brennwertechnik, unterschiedliche Oxidanten (O₂ bzw. Luft). Kessel jeweils im Leistungsbereich von 20 kW_{th}
- 2 Brennstoffzellenanlagen unterschiedlicher Technologie, und zwar 6,5 kW_{el} alkalischer und 79 kW_{el} / 42 kW_{th} phosphorsaurer Typ
- Flüssigwasserstoff (LH₂)-Tankstelle zur Erprobung von Fahrzeugbetankungssystemen

3.2 Anlagenteilsysteme der Phase 2

Das Bestehende wird um folgende *Anlagenteilsysteme* erweitert:

- Solargeneratoren neuester Technologie mit jeweils zugehöriger elektrischer Leistungsaufbereitung (amorphes Silizium: 25 kW_p bzw. 24 kW_p Feld-Nennleistung; weiterentwickelte monokristalline Strukturen 11,3 kW_p A.S. Hybrid Zelle, 2 x 6,1 kW_p H.E. Zelle auf manuell zwischen 20° und 70° verstellbaren Tischen; weiterentwickelte polykristalline Struktur: 9,7 kW_p MIS-I).
Untersuchung alternativer Fundament- und Aufständerungskonzepte, u. a. in Form einer seilverspannten Tragkonstruktion mit 10,3 kW_p monokristallinen Zellen
- alkalischer Druckelektrolyseur, Leistung bei Nennstrom ≤ 115 kW_{el}, Arbeitsdruck 32 bar
- katalytisches Heizgerät mit Brennwertechnik (10 kW_{th} Kesselleistung) für Erdgas- und Erdgas-/H₂-Mischbetrieb, mit Luft als Oxidant. Einbindung in die vorhandene Heizungsanlage
- katalytisch beheizte Absorptionskälteanlage (Nennkälteleistung 16,6 kW_{th}), Brennstoff H₂, Oxidant Luft. Die Anlage unterstützt die vorhandene Kaltwasserversorgung
- Brennstoffzellenanlage mit protonenaustauschender Membran, PEMFC, im Luftbetrieb. 10 kW_{el} Nennleistung, für mobilen Einsatz in einem Elektro-Gabelstapler mit Hydridspeicher zur H₂-Versorgung
- Optimierung der vorhandenen LH₂-Tankstelle auf Verminderung der Betankungszeit und Verdampfungsverluste sowie der Anzahl notwendiger Ablaufschritte. Vergleich zweier neu entwickelter, kaltziehbarer Kupplungssysteme

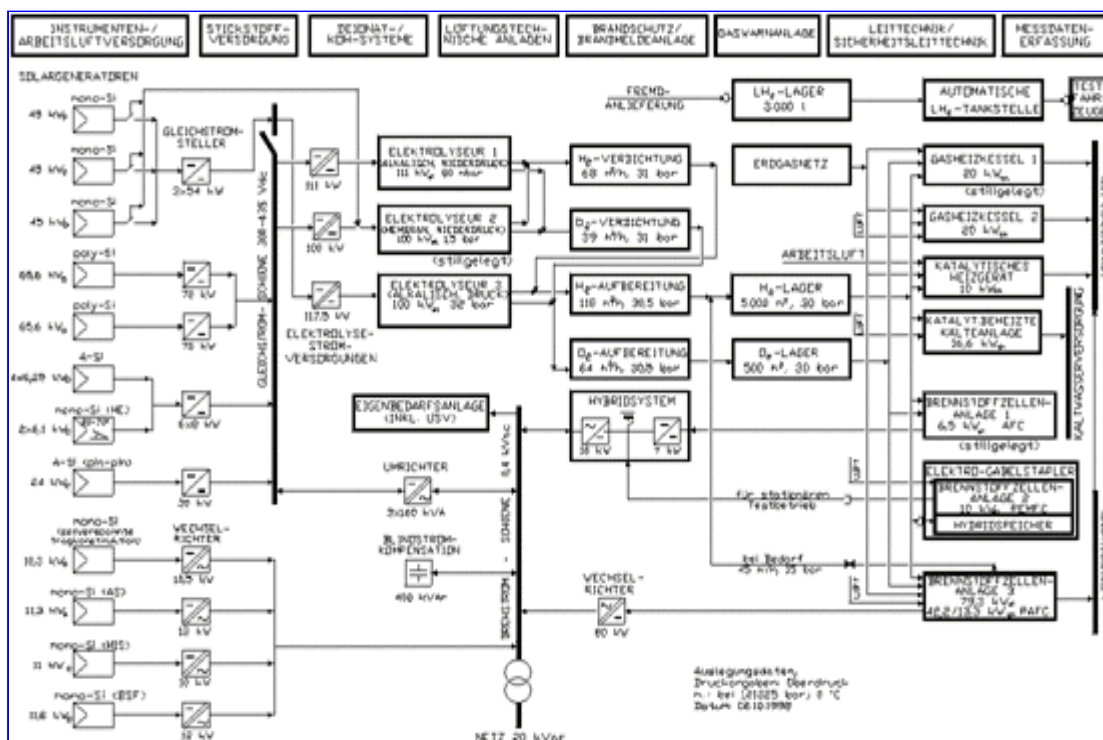


Abb. 1: Blockschartbild Gesamtanlage Phase 1 und 2

3.3 Periphere Systeme

Auffallend ist, daß im Zusammenhang mit Solar-Wasserstoff-Anlagen häufig nur die bekannten Anlagenteilsysteme genannt werden. In der Praxis ist zum Anlagenbetrieb jedoch eine Vielzahl zusätzlicher peripherer Systeme erforderlich.

In diesem Beitrag wird nicht eingegangen auf die *übergeordnete Leittechnik*, die umfangreiche *Meßwerterfassung* sowie die vielfältigen *Betriebsmitteleinrichtungen* und *Nebensysteme*. Abb. 1 zeigt in der Kopfzeile eine entsprechende Übersicht.

3.4 Anlagensicht

Einen optischen Eindruck der Gesamtanlage vermittelt ein Luftbild (Abb. 2), auf dem das Gelände, das Betriebs- und Mehrzweckgebäude sowie die im Freien installierten Anlagenteilsysteme zu erkennen sind. Dazu gehören die zum Zeitpunkt der Aufnahme noch teilweise in der Montage befindlichen Solarfelder, das Gaslager und die LH₂-Tankstelle.



Abb. 2: Bertram-Luftbild Gesamtanlage vom 23.04.1994

4. Energiewandlung und -speicherung

Nachfolgend nun Erläuterungen zum Konzept der Energiewandlung und -speicherung mit einigen Bemerkungen zum Betriebsverhalten.

Die größeren *Solargeneratoren* speisen mittels MPP-geregelter Gleichstromsteller auf eine gemeinsame Gleichstromschiene, die als Kopplungsglied zwischen den Solargeneratoren, den Elektrolyseuren und dem Netz fungiert.

Der Speisestrom für die Elektrolyseure wird durch die im Gegensatz zu den Gleichstromstellern der Photovoltaik galvanisch trennenden Elektrolysestromversorgungen geregelt. Unter Umgehung des zugehörigen Gleichstromstellers, der Gleichstromschiene und Elektrolysestromversorgung, kann der Membran-Elektrolyseur mit einem Solargenerator auch direkt gekoppelt werden.

Um das Zusammenwirken wichtiger Anlagenteilsysteme besser untersuchen zu können, wurde die *elektrische Leistungsaufbereitung* flexibler und damit aufwendiger gebaut, als sie für ausschließlichen Netzparallelbetrieb über Wechselrichter notwendig wäre (siehe Abb. 1). Die Kopplung von Gleichstromschiene und Drehstromnetz erfolgt über 3 selbstgeführte Umrichter, die im Netzparallelbetrieb eine Leistungs- und Spannungsregelung der Gleichstromschiene erlauben. Je nach eingespeister und abgenommener Energie auf der Gleichstromschiene ist - beides auch sperrbar - sowohl Energielieferung zum Netz als auch Energiebezug vom Netz möglich.

Die Solargeneratoren und zugehörigen Steller der Projektphase 1 sind seit ca. 5 Jahren in Betrieb. An bisher aufgetretenen Problemen bei der Photovoltaik seien nicht erkannte Schädigungen während der Montage und vorzeitige Alterung von Überspannungsableitern genannt. Beides führte zur Verringerung des Isolationswiderstands, so daß teilweise Module und Überspannungsableiter ausgetauscht werden mußten.

Das monokristalline Feld arbeitet gut, während eine größer werdende Anzahl polykristalliner Module interne elektrische Defekte aufweist. Dies äußert sich in einer Unterbrechung der Zellenverschaltung. Die Anzahl der Module mit Glasbruch infolge montagebedingter Verspannungen hat sich hingegen stabilisiert.

Bei den Umrichtern sind - wohl infolge thermischen Stresses - inzwischen vornehmlich Steuerkartenausfälle durch vorzeitige Alterung zu beobachten.

Die Solarfelder der Phase 1 erbringen eine gute Energieernte, nachvollziehbar größer als die Werte, die von einigen anderen Anlagenbetreibern in Mitteleuropa, z. B. im 1.000-Dächer-Programm, genannt werden.

Die erwähnte Direktkopplung des Membran-Elektrolyseurs mit dem monokristallinen Solargenerator zeigte keine größeren technischen Probleme und erscheint, den Gesamtnutzungsgrad betrachtet, auch für unsere Einstrahlungsverhältnisse empfehlenswert.

Im Winter 1993/94 wurden 6 neue Solargeneratoren installiert. Der Wirkungsgrad einiger kristalliner Technologien blieb jedoch teilweise deutlich unter dem jeweils garantierten Wert. Die amorphen Technologien hingegen erreichten die - im Vergleich zu den kristallinen Technologien deutlich geringeren - garantierten Wirkungsgrade.

Auch die meisten Gleichstromsteller und Wechselrichter der Phase 2 arbeiteten nicht auf Anhieb zufriedenstellend, was nur teilweise mit dem gegebenen Prototypencharakter erklärbar ist. Es bedurfte z. T. erheblicher Nachbesserungen.

Die zwei bisher installierten *Niederdruck-Elektrolyseure* sind Anlagen fortgeschrittener Technologie (Nullabstandsgeometrie, kein Asbest-Diaphragma, aktivierte Elektroden, erhöhte Stromdichte) mit gegenüber konventionellen Ausführungen deutlich verbessertem spezifischen Energieverbrauch. Zur Zeit der Anschaffung dieser Geräte waren fortgeschrittene Druckelektrolyseure in der 100kW-Klasse mit Arbeitsdrücken von ca. 30 bar noch nicht verfügbar. Ein solches Gerät konnte erst im November 1994 bestellt werden. Die bei beiden Elektrolyseuren aufgetretenen Probleme, vornehmlich auch zwischenzeitlich unzureichende Produktgasreinheiten, konnten bisher tolerabel behoben werden; beim alkalischen Gerät z. B. mittels Ersatz der früher einfachen durch jetzt kathodenseitig verstärkte Polysulfondiaphragmen, beim Membran-Elektrolyseur mittels elektrischer Überbrückung zweier defekter Zellen zur Verringerung der thermischen Belastung.

Den Testergebnissen folgend, arbeiten beide Elektrolyseure zufriedenstellend, das Membran-Gerät auch unter den stark schwankenden Einstrahlungsbedingungen während der Direktkopplung. SWB hätte die gesammelten Erkenntnisse den Lieferanten für eine Weiterentwicklung gerne zur Verfügung gestellt, beide Lieferanten haben inzwischen jedoch das entsprechende Geschäftsfeld aufgegeben.

Da die bisher installierten Elektrolyseure bei niedrigen Drücken betrieben werden, ist zur *Druckspeicherung von H₂ und O₂* eine nachfolgende Verdichtung notwendig. Anschließend werden die Gase H₂ und O₂ von Verunreinigungen durch die jeweils andere Gaskomponente gereinigt und dann getrocknet.

Die grundsätzliche verfahrenstechnische Schaltung der H₂-/O₂-Gassysteme geht aus *Abb. 1* hervor: Jeweils Verdichtung, Aufbereitung mittels Deoxo-Prozeß (katalytische Verbrennung von O₂- bzw. H₂ Restgehalten) und nachfolgender regenerierbarer Trocknung mit Molsieb / Alu-Gel für die gasförmige Speicherung im Gaselager.

Nach Abarbeitung einer Reihe von bis in jüngere Zeit reichenden Schwierigkeiten (dezentrales Prozeßleitsystem, Verdichter, Armaturenundichtheiten durch Adsorbenspartikel, Analysengaskühler) arbeiten die H₂-/O₂-Gassysteme inzwischen weitgehend verlässlich.

Neben der Druckgaslagerung von Wasserstoff wird für den Bereich Verkehrsanwendung *Wasserstoff auch im flüssigen Zustand gespeichert*.

Auf eine Verflüssigung des in Neunburg vorm Wald erzeugten, gasförmigen Wasserstoffs wurde verzichtet. Der derzeitige Stand kommerziell orientierter Verflüssigungstechnik ist bekannt, und eine für die SWB passende Anlage wäre, da relativ klein, einerseits spezifisch teuer, andererseits energetisch weniger effizient. Es wird daher LH₂ für den 3.000 Liter Standtank per Tankwagen geliefert.

Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit, einige Anlagenteilsysteme (die Gasheizkessel, phosphorsaure Brennstoffzellenanlage und das katalytische Heizgerät) außer mit Wasserstoff auch mit Erdgas bzw. teilweise mit Mischungen beider Brenngase zu fahren. Auf diese Weise kann die technische Seite eines *schrittweisen Übergangs von der bisher vornehmlich fossil*

ausgerichteten Energieversorgung in eine mögliche Solar-Energiewirtschaft mit Wasserstoff als Energieträger zumindest in ersten Schritten demonstriert und untersucht werden.

5. Energetische Anwendung

Im Folgenden sollen die in Neunburg vorm Wald installierten sowie bereits bestellten, aber noch nicht ausgelieferten bzw. in Betrieb gesetzten, anwendungsorientierten Anlagenteilsysteme zumindest kurz angesprochen werden. Die Brennstoffzellenanlagen werden sodann detailliert behandelt.

5.1 Gasheizkessel mit Brennwertechnik, LH₂-Tankstelle

Der mit O₂ als Oxidant arbeitende *Gasheizkessel* konnte trotz vernünftiger Versuchsergebnisse infolge von Brennerproblemen keine akzeptable Verfügbarkeit erreichen. Das mit Luft als Oxidant betriebene Gerät hingegen arbeitet gut. Unter Einsatz von O₂ statt Luft stieg erwartungsgemäß der bereits gute Wirkungsgrad. Bei der Verbrennung von H₂ mit Luft ergaben sich im Vergleich zur Verbrennung mit Erdgas (Gruppe H) hohe NO_x-Emissionen; diese konnten jedoch durch eine deutliche Erhöhung des Luftüberschusses reduziert werden.

Mit den gewonnenen Versuchsergebnissen wurde die *LH₂-Tankstelle* gegenüber der Ausgangssituation im April 1991 so weit optimiert, daß die Zeit für einen kompletten Betankungsvorgang statt anfangs über 60 Minuten über eine Zwischenperiode noch ca. 15 Minuten betrug. Gleichzeitig konnten die während eines kompletten Betankungsvorgangs entstehenden Verdampfungsverluste von 30 % auf weniger als 10 % der übertragenen LH₂-Menge gesenkt werden. Eine weitere Verbesserung auf unter 9 Minuten Betankungszeit wurde erstmals im Oktober 1994 mittels neu entwickelter kaltziehbarer Kupplungssysteme erreicht.

5.2 Katalytisches Heizgerät, katalytisch beheizte Absorptionskälteanlage

Das außer mit Erdgas auch im stufenlosen Zumischungsverhältnis von 10 - 50 Vol.-% H₂ zu Erdgas betreibbare *katalytische Heizgerät* mit einer Kesselleistung von 10 kW_{th} wurde in Entwicklungsauftrag gegeben. Der Oxidant ist Luft. Das Gerät mit Brennwertechnik wird voraussichtlich im Herbst 1995, in die Heizungsanlage des Betriebsgebäudes eingebunden, in Betrieb gehen.

Ebenfalls in Entwicklungsauftrag gegeben wurde die *katalytisch mit Wasserstoff beheizte Absorptionskälteanlage*. Mit Luft auf der Oxidantenseite gefahren, bringt die Anlage eine Kälteleistung von 16,6 kW_{th}. Die Wärmeerzeugung erfolgt katalytisch an Diffusionsbrennerstrukturen (ohne Vormischung von Brennstoff und Oxidant). Das Gerät befindet sich z. Zt. in der Nachbesserungsphase zur Inbetriebsetzung und wird den im Betriebsgebäude vorhandenen Kaltwassersatz unterstützen.

5.3 Brennstoffzellenanlagen

Der Tagungsthematik weiter folgend, nun detaillierte Ausführungen zu den Brennstoffzellenanlagen im SWB-Projekt.

Zwei Anlagen, eine alkalische und eine phosphorsaure, wurden getestet; eine weitere in Membran-Technik wurde im November 1994 bestellt.

Die beiden installierten Brennstoffzellenanlagen zielen auf unterschiedliche Einsatzfelder. Die *alkalische* ist infolge der Anforderung, reinen O₂ als Oxidant und reinen H₂ als Brennstoff zu benötigen, mehr für Nischenanwendungen (bisheriger Einsatz: Raumfahrt, U-Boote) geeignet. In Verbindung mit einem sogenannten Hybridsystem - bestehend aus Gleichstromsteller, Batteriepufferung, Umrichter und Steuerrechner, siehe *Abb. 1* - erlaubt die alkalische Brennstoffzellenanlage die Fahrzyklen-Simulation von Elektrofahrzeugen im stationären Einsatz. Die *phosphorsaure Brennstoffzellenanlage* (mit der Möglichkeit zur Abwärmenutzung) wird als eine Alternative zu heutigen konventionellen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gesehen.

Die vor kurzem bestellte Brennstoffzellenanlage mit protonenaustauschender Membran soll als System an den bisher noch nicht existierenden Luft (statt O₂)-Einsatz angepaßt werden.

Dabei steht der Bau einer Anlage an, die bei einer Nennleistung von 10kW_{el} als funktionsfähige Stromquelle für den Antrieb eines Serien-Elektrogabelstaplers auf dem Versuchsgelände in Neunburg vorm Wald betrieben werden soll. Als Wasserstoffspeicher kommt die dabei gewichtsmäßig hier sogar vorteilhafte Hydridtechnik zum Einsatz, wobei die Nutzkapazität auf einen 8-Stunden-Betrieb des Staplers bei einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von 4kW_{el} ausgelegt ist. Somit ergibt sich für SWB die Möglichkeit, neben der bereits eingesetzten Druckgas- und Flüssigwasserstoff-Technologie eine dritte wichtige Speichertechnik im praktischen Betrieb zu erproben und entsprechende Erfahrungen zu sammeln. Die Beladung des Hydridspeichers soll dabei aus dem Gaselager bei Drücken zwischen 10 und 30 bar erfolgen. Es ist beabsichtigt, das bereits installierte Hybridsystem für stationäre Versuche der Membran-Brennstoffzellenanlage zur Simulation von Fahrzyklen umzurüsten.

Zurück zu den bereits betriebenen Brennstoffzellenanlagen. Über erste, bis etwa Ende 1991 reichende Erfahrungen wurde bereits früher berichtet /2/.

5.3.1 Alkalische Brennstoffzellenanlage

Der Hersteller der alkalischen Brennstoffzellenanlage gab das zugehörige Geschäftsfeld vor einiger Zeit auf. Aus diesem Grunde sollen die SWB-Erfahrungen mit der alkalischen Brennstoffzellenanlage nur noch summiert aufgezeigt werden.

Infolge aufgetretener elektrischer Umpolung von Einzelzellen wurden Zusatzmaßnahmen an den Versorgungssystemen und bei der Kontrolle der Einsatzgase getroffen. Mehrfacher Austausch des Zellblocks wurde notwendig, da Reparaturen nicht sinnvoll realisierbar erschienen. Als in Anwesenheit des Herstellers nach weiteren Umbaumaßnahmen im September 1994 erneut eine Umpolung, dieses Mal an der Sauerstoff-Spülzelle, eintrat, wurde gemeinsam beschlossen, die Anlage stillzulegen. Zu Einzelheiten über die wichtigsten Störungen und deren Abhilfemaßnahmen sowie zum guten Leistungsverhalten der Anlage in den Perioden störungsfreien Betriebs sei auf das Schrifttum verwiesen /2/, /3/.

Nach den gesammelten Erfahrungen erwies sich die alkalische Brennstoffzellenanlage wegen ihrer Komplexität als zu empfindlich für den Betrieb in Gasnetzen. Vor allem ist die Möglichkeit der irreversiblen Schädigung der Nickelanode eine Erschwernis für den Einsatz.

5.3.2 Phosphorsaure Brennstoffzellenanlage

Da Wasserstoff in absehbarer Zeit in energiewirtschaftlichen Mengen nicht leitungsgebunden zur Verfügung stehen wird, ist die Kombination Wasserstofferzeugung mittels Dampfreformierung von Erdgas, CO-Konvertierung und Brennstoffzelle sinnvoll.

Die phosphorsaure Brennstoffzellenanlage in Neunburg vorm Wald kann mit Erdgas aus dem öffentlichen Netz (Gruppe H) oder direkt mit H_2 aus dem SWB-Gaselager betrieben werden. Auf der Oxidantenseite wird normale Umgebungsluft - alternativ mit Sauerstoff aus dem Gaselager bis auf max. 50 Vol.% O_2 angereichert - gefahren.

Abb. 3 zeigt das Blockschema der Anlage

Stunden-Betrieb vorgesehen werden. Über den für phosphorsaure Brennstoffzellenanlagen eigentlich normalen, durchlaufenden Betrieb hinaus wurde bei SWB die Ermöglichung eines sogenannten "Hot Stand-by" vorgesehen, um die durch den Schichtbetrieb bedingten An- und Abfahrprozeduren zu verkürzen. Bezüglich Einzelheiten sei auf das Schrifttum verwiesen /4/.

Während der Inbetriebsetzung traten große Probleme auf, darunter mehrere Reparatur- und Umbaumaßnahmen sowie zeit- und personalaufwendige Optimierungsarbeiten infolge des hohen Automatisierungsgrades mit daraus resultierenden Verzögerungen und erheblich verspätetem Garantielauf /2/.

Seit der Übernahme der Anlage durch SWB im März 1993 jedoch kommt die Durchführung des Versuchsprogramms gut voran. Leistungen und Lastwechselverhalten entsprechen den Erwartungen. Zu bemerken ist ein in der Höhe unerwarteter elektrischer Eigenbedarf.

Bei den Versuchskampagnen wird besonderes Augenmerk auf das Verhalten der Brennstoffzellenanlage hinsichtlich der erwähnten intermittierenden Fahrweise gelegt. Mit wichtigen Erkenntnissen zur Langzeitstandfestigkeit, auch unter diesen sehr erschwerten Betriebsbedingungen wird gerechnet.

Bis Mitte 1995 sollen dann das An- und Abfahrverhalten genauer untersucht sowie Messungen zur Überprüfung der Emissionen durchgeführt werden.

Angesichts des gegebenen Prototypencharakters dieser Versuchsanlage und des weitgehenden Mangels an zugänglichen Betriebserfahrungen anderer Anlagen sind aus dem SWB-Projekt weitere wichtige Erkenntnisse zur Optimierung und Kommerzialisierung der phosphorsauren Technologie zu erwarten.

Abschließend noch eine Zusammenfassung wichtiger Ergebnisse des bisherigen Versuchsbetriebs, siehe auch ausführlicher /4/.

An der Brennstoffzelle, die mit guten Werten (53% Brennstoffzellenwirkungsgrad bei Nennleistung im Betriebsfall H₂ und Luft) im Herbst 1990 in Japan abgenommen wurde, sind bisher ca. 13% Degradation der elektrischen Leistung zu beobachten.

Ursache sind aus heutiger Sicht die zahlreichen automatischen Notabschaltungen während der ersten 1.000 Betriebsstunden (ca. 140 während der sich über 2 Jahre hingezogenen Inbetriebsetzung, die restlichen 60 im bisherigen Versuchsbetrieb, auch infolge der beschriebenen Betriebsphilosophie in Neunburg vorm Wald) mit dabei auftretender irreversibler Schädigung des 3-Phasengebiets an den Elektroden der Brennstoffzelle.

Für Lastwechsel der Brennstoffzellenanlage in beliebiger Richtung zwischen Minimallast (25% Nennleistung) und Vollast wird in jeder Betriebsart eine Minute benötigt, um den neuen Sollwert erstmalig mit einer Abweichung von 1% zu erreichen (Anschwingzeit). 10 Minuten nach einem Lastwechsel ist dann wieder ein stabiler Betriebsverlauf mit Schwankungen der AC-Leistung unter +/- 1% gegeben. Zusammen mit der Leistungsänderung der Brennstoffzelle werden alle anderen zugehörigen Anlagenteile, wie Reformier und DWA, im gleichen Maß in ihrer Leistung angepaßt.

In *Tab. 1* sind Meßdaten für die verschiedenen Betriebsarten aufgeführt.

Durch die in der Versuchsanlage mögliche Sauerstoffanreicherung der Kathodenluft auf 50 Vol.-% O₂ kann die Gleichstromleistung bei Nennstrom um 5 kW gegenüber dem Betrieb mit Umgebungsluft erhöht werden.

Der Brennstoffzellenwirkungsgrad liegt mit 46 bis 49% im Bereich der bei phosphorsauren Zellen zu erwartenden Werte. Im Teillastbereich steigt er bis auf maximal 51% (Oxidant Umgebungsluft) an, bzw. bis 54% mit auf 50 Vol.-% O₂ angereicherter Kathodenluft.

Betriebsart Einsatz Oxidant	18,8 Nm ³ Erdgas/h		52,3 Nm ³ H ₂ /h	
	Luft	Luft mit 50 Vol.% O ₂	Luft	Luft mit 50 Vol.% O ₂
Gleichstromleistung in kW _{el}	72	77	72	77
Wechselstromleistung in kW _{el}	67	72	67	72
thermische Leistung in kW _{th}	21	21	45	45
elektrischer Eigenbedarf in kW _{el}	32	32	12	12
- davon für DWA in kW _{el}	16	16	-	-
Brennstoffzellenwirkungsgrad ¹⁾ in %	46	49	46	49
elektrischer Wirkungsgrad ²⁾ in %	19	21	35	38
Gesamtwirkungsgrad ³⁾ in %	30	32	64	67

¹⁾ Gleichstromleistung / (Wasserstoffvolumenstrom x unterer Heizwert)

²⁾ nach VDEW [4] : (Wechselstromleistung - elektrischer Eigenbedarf) / (Einsatzgasvolumenstrom x unterer Heizwert)

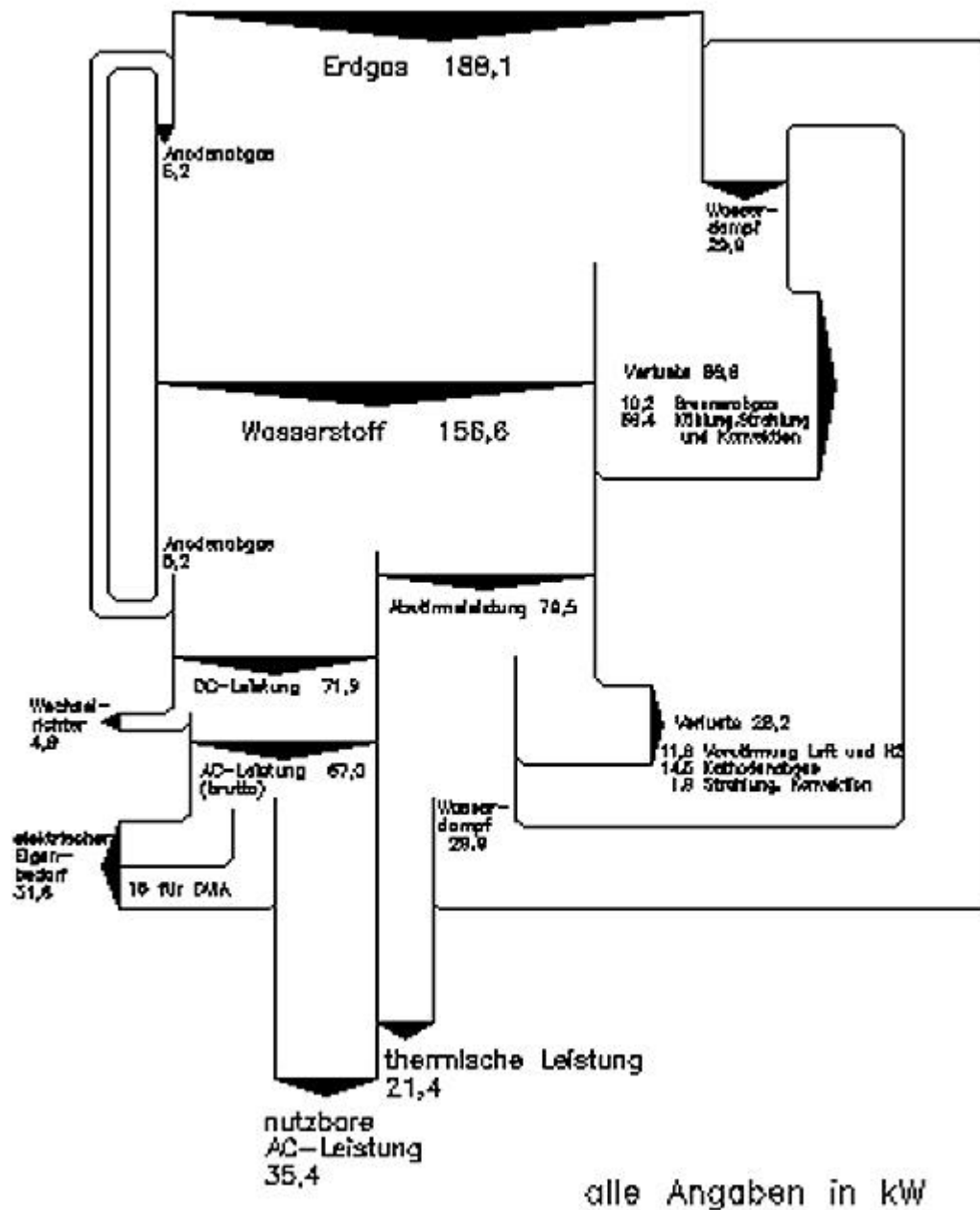
³⁾ nach VDEW [4] : (Wechselstromleistung + thermische Leistung - elektrischer Eigenbedarf) / (Einsatzgasvolumenstrom x unterer Heizwert)

Tab. 1: Meßdaten von Dezember 1993, Brennstoffzellenanlage bei Nennleistung

Die Auswertung der Energiebilanzen bei Erdgas-Einsatz zeigt relativ ungünstige Werte. Da es sich um eine vergleichsweise kleine Demonstrationsanlage handelt, schlagen vor allem die Werte des elektrischen Eigenbedarfs (incl. DWA) überproportional zu Buche.

Das in Abb. 4 dargestellte Energieflußdiagramm (im stationären Nennleistungsbetrieb bei Erdgas-Einsatz und Luft als Oxidant) führt zu einem elektrischen Wirkungsgrad der Brennstoffzellenanlage von 18,7%. Von einer Gleichstromleistung der Brennstoffzelle von 71,9 kW bleiben nach Abzug der Wechselrichterverluste und des elektrischen Eigenbedarfs noch 35,4 kW nutzbare AC-Leistung. Hinzu kommt eine bei 165 °C auskoppelbare thermische Leistung von 21,4 kW. Auswertungen zeigen, daß der Anlagenbetrieb mit einer Brennstoffzellenleistung von unterhalb etwa 34 kW_{el} bereits zu negativen elektrischen Wirkungsgraden führt.

Das Herausrechnen der Druckwechsel-Adsorptionsanlage als SWB-Spezifikum verbessert den elektrischen Wirkungsgrad deutlich auf ca. 27% (bei Nennleistung und Luft als Oxidant).



bei Nennleistung

(basieren auf den urbanen Halbzert)

File: Soy_Abb4.wd

Plot: Soy_Abb4.plt

Erstelldatum: 07.11.1994

Bearbeiter: z

Abb. 4: Energiebilanz bei Erdgas-Einsatz und Luft als Oxidant

In Konsequenz des hohen elektrischen Eigenbedarfs weist die Brennstoffzellenanlage gegenüber Nennlast ein Teillastverhalten mit niedrigeren Wirkungsgraden auf, obwohl bei Teillast die elektrochemischen Prozesse an der Brennstoffzelle selbst mit höherem Wirkungsgrad ablaufen.

Generell ist festzuhalten, daß die Versuchsanlage elektrisch und thermisch weiter optimierbar wäre, wie auch ein Blick auf Verlustströme in Abb. 4 zeigt.

6. Übergeordnete Erkenntnisse und Erfahrungen

Bei der Abwicklung des SWB-Projekts hat sich wiederholt herausgestellt, daß Wasserstoff-Systeme derzeit meist nur als Prototypen zu kaufen sind, und sich deren Integration zu einem sinnvollen Gesamtkonzept häufig schwieriger gestaltet, als gemeinhin vermutet. So werden besonders Umfang und Komplexität der zugehörigen Anlagenperipherie häufig unterschätzt.

Aus den Arbeiten der SWB folgt die energiewirtschaftliche Einschätzung, daß eine auf Wasserstoff als Energieträger basierende Energiewirtschaft nur nachrangig zum Ausbau regenerativer Stromerzeugung beginnen könnte. Erst wenn der so erzeugte Strom nicht mehr zeitgleich unter Verdrängung fossiler Energieträger verbraucht werden kann, wird eine Energiespeicherung sinnvoll.

Eine Ausnahme stellt ggf. der Verkehr dar, der zur Immissionsentlastung in Ballungsgebieten auf einen gut speicherbaren, sauberen Energieträger in größeren Mengen angewiesen sein wird. Weiterhin sollten kleine Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis kommerzieller phosphorsaurer Brennstoffzellenanlagen gegen über Gasmotoren infolge des hohen elektrischen und Gesamtwirkungsgrades konkurrenzfähig werden können.

Einige Firmen haben ihre Aktivitäten auf dem Gebiet der bei SWB getesteten Anlagenteilsysteme eingestellt. Im Verlauf des Projekts konnte eine Reihe von neuen Entwicklungen mit angestoßen werden. Dies betrifft (siehe dazu auch *Abb. 1*) den alkalischen Niederdruck-Elektrolyseur, die beiden Gasheizkessel, das katalytische Heizgerät und die Absorptionskälteanlage mit katalytisch beheiztem Austreiber, den Einsatz eines alkalischen Druckelektrolyseurs, die luftatmende Membran-Brennstoffzellenanlage sowie zwei fortgeschrittene Kupplungssysteme für die LH₂-Betankung von Versuchsfahrzeugen. Mit diesen Entwicklungsanstößen ist SWB einer wichtigen Zielsetzung gerecht geworden.

Darüber hinaus kann die SWB aufgrund ihres gesammelten Know-hows heute eine qualifizierte Öffentlichkeitsarbeit mit Informationen aus erster Hand machen.

Schrifttum

/1/ A. Szyska: Neunburg vorm Wald - test centre for solar hydrogen technology, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 19, No. 10, 1994

/2/ A. Szyska, G. Schimpf, J. Tachtler: Bisherige Erfahrungen mit einer 6,5 kW_{el} alkalischen und einer 80 kW_{el} phosphorsaurer Brennstoffzellenanlage im SWB-Projekt in Neunburg vorm Wald (Stand Dezember 1991)
VDI Berichte Nr. 912, 1992

/3/ A. Szyska: Strom aus Wasserstoff?
Siemens Standpunkt 6/93, 6. Jahrgang, November 1993

/4/ K. Hoelzner, G. Schimpf, A. Szyska: Test operation of phosphoric acid fuel cell plant
Power Engineering Journal, December 1994