

Das Solar-Wasserstoff-Projekt in Neunburg vorm Wald

SWB
Ein Unternehmen der
Bayernwerk-Gruppe



Schriftenreihe Solarer Wasserstoff Solar-Wasserstoff-Anlage Nr. 22

Erschienen in Linde Berichte aus Technik und Wissenschaft, Nr. 74 / 1996

Bilanz des Solar-Wasserstoff-Demonstrationsprojekts Neunburg vorm Wald

A. Szyszka

Zusammenfassung

In Neunburg vorm Wald, Oberpfalz, werden in industrieller Größenordnung wichtige technische Systeme einer möglichen künftigen Solar-Wasserstoff-Energiewirtschaft errichtet, wobei erste technische Aspekte eines schrittweisen Übergangs aus der derzeitigen, vornehmlich fossil ausgerichteten Energieversorgung berücksichtigt sind.

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 Herausforderungen der Solar-Wasserstoff-Technik schaffen.

Dieser Beitrag (Stand November 1995) konzentriert sich auf die Technik und den Betrieb der Anlage unter Berücksichtigung der Zielsetzungen und Perspektiven des Projekts. Detailliertere Ergebnisse des Versuchsprogramms werden hier nicht explizit aufgeführt, sondern - in die mehr praktischen Fragen der Betriebserfahrung eingearbeitet - weitergegeben.

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, künftigen Solar-Wasserstoff-Energiewirtschaft.

Das Gründungsmitglied DASA schied Ende September 1994 aus. Das Vorhaben ist in Projektphasen unterteilt, längerfristig angelegt. Das geplante Investitionsvolumen von ca. DM 64 Mio. für die bis Ende 1991 dauernde Phase 1 wurde eingehalten. Das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie (BStMWVT) förderten den bezuschussungsfähigen Teil der Kosten mit 35 % resp. 15 %. Derzeit befindet sich das Projekt bei gleicher Förderquote der öffentlichen Hand in einer den Zeitraum 1992 - 1999 umfassenden 2. Projektphase, nachdem im Zusammenhang mit zwei Ende 1994 bestellten elektrochemischen Anlagenteilsystemen eine Verlängerung des Anlagenbetriebs, über das ursprüngliche Ende (1996) der Phase 2 hinausgehend, beschlossen wurde. Das gesamte Budget für den Zeitraum 1992 - 1999 beläuft sich auf ca. DM 80 Mio. In das SWB-Projekt werden damit im Zeitraum von 13 Jahren ca. DM 60 Mio. (inklusive Investitionszulage) durch die öffentliche Hand und ca. DM 84 Mio. durch die SWB-Gesellschafter investiert worden sein.

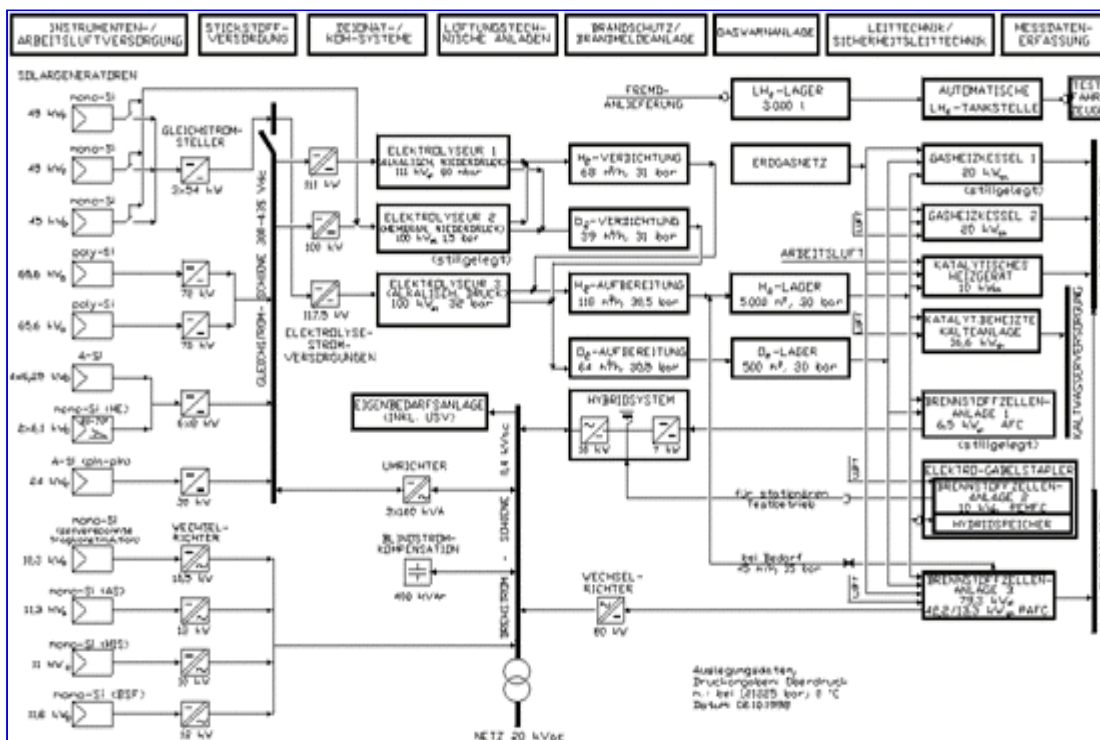


Abb. 1 : Blockschaubild Gesamtanlage Projektphasen 1 und 2

2. Projektziele

Übergeordnete Zielsetzung des Solar-Wasserstoff-Projekts ist die Erprobung wichtiger Techniken eines solaren Wasserstoff-Kreislaufs im industriellen Demonstrationsmaßstab. Unterschiedliche Technologien sollen verglichen und im Zusammenwirken mit anderen Anlagenteilsystemen getestet werden. Die Lieferanten wurden zur Mitgestaltung der Versuchsprogramme eingeladen. Da ein Markt für Solar-Wasserstoff-Systeme 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 die erworbene Kenntnis systeminterner Vorgänge (nicht nur "black box" Betrieb) die Gewinnung von Know-how für Planung, Errichtung und Betrieb entsprechender Anlagen im Vordergrund. Eine qualifizierte und realistische Öffentlichkeitsarbeit mit Information aus erster Hand ist ein weiteres Ziel.

3. Konzept Gesamtanlage

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

3.1 Anlagenteilsysteme Projektphase 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 Wasserstoffherzeugung gesamt 47 Nm³/h
- H₂-/O₂-Gassysteme zur Verdichtung, Reinigung, Trocknung und Speicherung der elektrolytisch erzeugten Gase (≥99,9 Vol.-% H₂ bzw. O₂)
- 2 Gasheizkessel mit Brennwerttechnik unterschiedliche Oxidanten (O₂ bzw. Luft). Kessel jeweils im Leistungsbereich von 20 kW_{th}
- 2 Brennstoffzellenanlagen unterschiedlicher Technologie: 6,5 kW_{el} alkalischer und 79kW_{el}/42 kW_{th} phosphorsaurer Typ
- Flüssigwasserstoff (LH₂)-Tankstelle zur Erprobung von Fahrzeugbetankungssystemen

3.2 Anlagenteilsysteme Projektphase 2

Das Bestehende wurde bzw. wird noch um folgende Anlagenteilsysteme erweitert:

- Solargeneratoren neuerer Technologie mit jeweils zugehöriger elektrischer Leistungsaufbereitung (amorphes Silizium: 25 kW_p bzw. 24 kW_p Feld-Nennleistung; weiterentwickelte monokristalline Strukturen: 11,3 kW_p AS Hybrid Zelle, 2 x 6,1 kW_p HE Zelle auf manuell zwischen 20° und 70° verstellbaren Tischen, 11 kW_p MIS-Technik). Untersuchung alternativer Fundament- und Aufständerkonzepte, u.a. in Form einer seilverspannten Tragkonstruktion mit 10,3 kW_p monokristallinen Zellen
- alkalischer Druckelektrolyseur der 100 kW_{el} Klasse, Arbeitsdruck 32 bar
- katalytisches Heizgerät mit Brennwerttechnik (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 im Luftbetrieb (PEMFC). 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. Betrieb eines kryogenen Pumpensystems, Test eines neuartigen PKW-Tanksystems ohne Kryoventile.

3.3 Periphere Systeme

Auffallend ist, daß im Zusammenhang mit Solar-Wasserstoff-Anlagen häufig nur die eben skizzierten, bei SWB "Anlagenteilsysteme" genannten Komponenten angeführt werden. In der Praxis ist zum Anlagenbetrieb jedoch eine Vielzahl zusätzlicher peripherer Systeme erforderlich. In diesem Beitrag wird hierauf nicht eingegangen, insbesondere nicht auf die vielfältigen *Betriebsmitteleinrichtungen* und *Nebensysteme*, die *Leittechnik* sowie die umfangreiche *Meßdatenerfassung*. *Abb. 1* zeigt in der Kopfzeile eine entsprechende Übersicht.

3.4 Anlagenansicht

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 Solarfelder, das Gaselager und die LH₂-Tankstelle.



Abb. 2: Luftbild Gesamtanlage vom Mai 1994

4. Betrieb, Versuchsergebnisse Bestellsituation

In diesem Beitrag kann nur in sehr verdichteter Form über die vielfältigen Erkenntnisse aus dem bisherigen Versuchsbetrieb berichtet werden. Zur besseren Einschätzung sollte dabei nicht unerwähnt bleiben, daß die einzelnen Anlagenteilsysteme entsprechend der angesetzten Versuchskampagnen teilweise recht unterschiedliche kumulierte Betriebszeiten aufweisen. Die ersten Systeme (Photovoltaik) gingen Anfang 1990 in Betrieb.

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

Um das Zusammenwirken wichtiger Anlagenteilsysteme besser untersuchen zu können, wurde die elektrische Leistungsaufbereitung flexibler und damit aufwendiger gebaut, als dies für ausschließlichen Netzparallelbetrieb über Wechselrichter notwendig wäre, (siehe *Abb. 1*).

Der Speisestrom für die Elektrolyseure wird durch die im Gegensatz zu den Gleichstromstellern der Photovoltaik galvanisch trennenden Elektrolysestromversorgungen geregelt. Mittels geeigneter elektrischer Verschaltungen lassen sich die drei Elektrolyseure mit einem Solargenerator auch direkt bzw. simuliert direkt koppeln.

Die *Solargeneratoren* und *zugehörigen Steller der Projektphase 1* sind seit über fünf 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 Meßprinzip der Isolationsüberwachung wurde geändert.

Das monokristalline Feld arbeitet gut, während eine größer werdende Anzahl polykristalliner Module interne elektrische Defekte aufweist. Dies äußert sich in einer Unterbrechung der Zellenverschaltung. Der Hersteller hat mittlerweile diese Erkenntnisse in einen verbesserten Produktionsprozeß einfließen lassen. Die Anzahl der Module mit Glasbruch infolge montagebedingter Verspannungen hingegen hat sich stabilisiert.

Bei den Umrichtern waren - wohl infolge thermischen Stresses - zwischenzeitlich häufig 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 1000-Dächer-Programm, genannt werden.

Im Winter 1993/94 wurden *sechs neue Solargeneratoren* installiert. Der Wirkungsgrad einiger kristalliner Technologien blieb jedoch teilweise deutlich unter dem jeweils garantierten Wert. Somit notwendig gewordene Nachbesserungs-/Austauschmaßnahmen der Lieferanten führten größtenteils zum Erfolg. 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 inzwischen erfolgreich abgeschlossen sind.

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.

Die beim alkalischen Elektrolyseur aufgetretenen Probleme, vornehmlich unzureichende Produktgasreinheiten, konnten mittels Ersatz der früher einfachen, durch jetzt kathodenseitig verstärkte Polysulfondiaphragmen behoben werden. Der Membran-Elektrolyseur mußte infolge zunehmend unzureichender Produktgasreinheiten (besonders H₂ im O₂-Produktgas) vorläufig außer Betrieb genommen werden.

Den Testergebnissen folgend arbeitet der alkalische Elektrolyseur zufriedenstellend, das Membrangerät ursprünglich selbst unter den stark schwankenden Einstrahlungsbedingungen während der Direktkopplung.

SWB hätte die gesammelten Erkenntnisse den Lieferanten für eine Weiterentwicklung gerne zur Verfügung gestellt, beide haben jedoch inzwischen das entsprechende Geschäftsfeld aufgegeben.

Somit ist auch eine Ersatzteilbeschaffung, z. B. für den Membran-Elektrolyseur, der wegen der geschilderten Probleme dringend einer Zerlegung/Reparatur des Zellblocks bedürfte, sehr aufwendig.

Zur Zeit der Anschaffung der beiden Niederdruck-Elektrolyseure waren fortgeschrittene *Druckelektrolyseure* in der 100 kW_{el} Klasse mit Arbeitsdrücken von ca. 30 bar noch nicht verfügbar. Ein solches Gerät konnte erst im November 1994 bestellt werden; der Garantielauf ist für Juni 1996 geplant.

Da die beiden bisher installierten Elektrolyseure bei niedrigen Drücken betrieben werden, ist zur Druckgasspeicherung von H₂ und O₂ eine nachfolgende Verdichtung notwendig. Anschließend werden beide Gase von Verunreinigungen durch die jeweils andere Gaskomponente befreit, getrocknet und dann in Druckbehältern gespeichert.

Nach Beseitigung einer Reihe von bis in jüngere Zeit reichenden Mängeln (dezentrales Prozeßleitsystem, Verdichter, Armaturenundichtheiten durch mitgerissene Adsorbenspartikel, Analysengaskühler) arbeitet das H₂-Gassystem inzwischen weitgehend verlässlich. Für das O₂-Gassystem sind noch weitere Umbaumaßnahmen geplant.

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

Eine weitere Besonderheit ist die Möglichkeit, einige Anlagenteilsysteme (die Gasheizkessel, phosphorsaure Brennstoffzellenanlage und das katalytische Heizgerät) außer mit Erdgas auch mit Wasserstoff 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 Energiewirtschaft mit

CO₂-frei erzeugtem Wasserstoff als Energieträger zumindest in ersten Schritten demonstriert und untersucht werden.

Dies führt uns zu den anwendungsorientierten Anlagenteilsystemen in Neunburg vorm Wald.

Der mit Sauerstoff als Oxidant arbeitende *Gasheizkessel* konnte trotz bis dahin vernünftiger Versuchsergebnisse, infolge von zuletzt aufgetretenen Brennerproblemen keine akzeptable Verfügbarkeit erreichen. Das Gerät wurde im Mai 1995 stillgelegt.

Das mit Luft als Oxidant betriebene Gerät hingegen arbeitet weiterhin gut. Bei gleicher Technik ergab sich erwartungsgemäß bei Zufuhr von O₂ ein gegenüber Luft noch besserer Wirkungsgrad. Bei der Verbrennung von H₂ mit Luft ergaben sich im Vergleich zur Verbrennung mit Erdgas (Gruppe H) hohe NO_x-Emissionen; diese können zwar durch eine deutliche Erhöhung des Luftüberschusses reduziert werden, der Wirkungsgrad nimmt aber dabei ab.

Das außer mit Erdgas auch im stufenlosen Zumischungsverhältnis von 10 - 50 Vol.-% H₂ in Erdgas betreibbare *katalytische Heizgerät* mit Brennwertechnik und einer Kesselleistung von 10 kW_{th} wurde als Entwicklungsvorhaben abgewickelt und im September 1995 montiert. Der Oxidant ist Luft. Infolge der auf < 900° C reduzierten Verbrennungstemperatur werden u. a. NO_x-Emissionen unter 20mg/kW_{th} erwartet. Das Gerät wird voraussichtlich ab November 1995, in die Heizungsanlage des Betriebsgebäudes eingebunden, im Versuchsbetrieb getestet.

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 arbeitet nach einer Reihe von Nachbesserungen an Standardteilen inzwischen gut und unterstützt den vorhandenen Kaltwassersatz.

Bei SWB wurden bisher zwei *Brennstoffzellenanlagen*, eine alkalische und eine phosphorsaure, getestet. Alkalische und phosphorsaure 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 geeignet (bisheriger Einsatz: Raumfahrt, U-Boote).

In Verbindung mit einem sogenannten Hybridsystem - bestehend aus Gleichstromsteller, Batteriepufferung, Umrichter und Steuereinheit, siehe *Abb. 1* - erlaubte die alkalische Brennstoffzellenanlage der SWB auch die reproduzierbare Fahrzyklen-Simulation von Elektrofahrzeugen im stationären Einsatz.

Infolge aufgetretener elektrischer Umpolung von Einzelzellen wurden Zusatzmaßnahmen an den Versorgungssystemen und bei der Kontrolle der Einsatzgase getroffen. Nach mehrfach notwendig gewordenem Austausch der Brennstoffzelle wurde im Herbst 1994 beschlossen, die Anlage stillzulegen, obwohl sie in den Perioden störungsfreien Betriebs ein gutes Leistungsverhalten zeigte.

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. Im übrigen gab der Hersteller das zugehörige Geschäftsfeld vor einiger Zeit auf.

Die *phosphorsaure Brennstoffzellenanlage* (mit der Möglichkeit zur Abwärmenutzung) wird als eine Alternative zu heutigen konventionellen Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen gesehen.

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. Infolge des

guten Gesamtwirkungsgrads einer solchen Brennstoffzellenanlage wird im Vergleich zu konkurrierenden, konventionellen Systemen weniger CO₂ bilanziert.

Zur Erprobung des erwähnten Übergangsszenarios kann die phosphorsaure Brennstoffzellenanlage in Neunburg vorm Wald, siehe *Abb. 3*, mit Erdgas aus dem öffentlichen Netz (Gruppe H) oder direkt mit H₂ aus dem SWB-Gaselager betrieben werden. Auf der Oxidantenseite wird Umgebungsluft - alternativ mit Sauerstoff aus dem Gaselager bis auf max. 50 Vol.-% O₂ angereichert - gefahren. Die auf elektrische Leistung optimierte phosphorsaure Brennstoffzellenanlage wurde mit einer Vielzahl an Betriebsarten für den Versuchsbetrieb in einer Solar-Wasserstoff-Demonstrationsanlage konzipiert. Es handelt sich hier also nicht um eine kommerzielle, containerisierte Produktionsanlage.

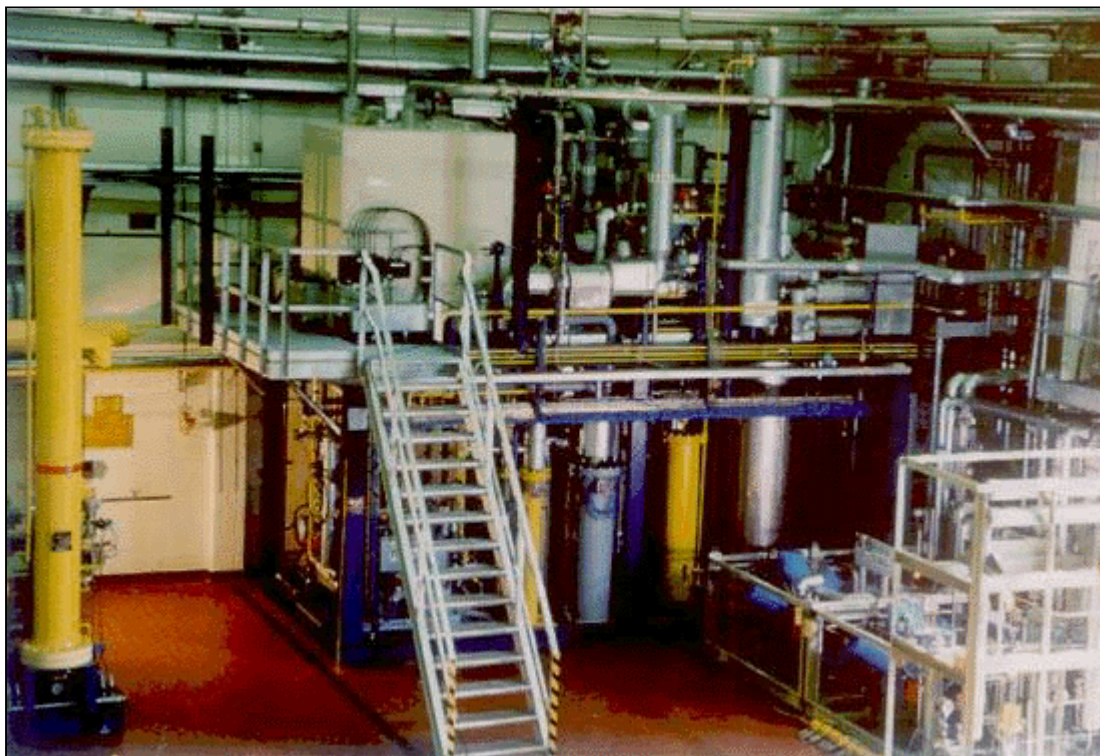


Abb.

3: Phosphorsaure Brennstoffzellenanlage (ohne H₂-Feinreinigung)

Während der Inbetriebsetzung traten große Probleme auf, darunter mehrere Reparatur- und Umbaumaßnahmen sowie zeit- und personelaufwendige Optimierungsarbeiten infolge des hohen Automatisierungsgrades mit daraus resultierenden Verzögerungen und erheblich verspätetem Garantielauf. Die meisten Schwierigkeiten ergaben sich in der Anlagenperipherie, nur sehr wenige dagegen auf Seiten der Brennstoffzelle selbst.

Seit der Übernahme der Anlage durch die 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 bei der SWB gegebenen und in einer Solar-Wasserstoff-Energiewirtschaft zweckmäßigen intermittierenden Fahrweise gelegt. Mit wichtigen Erkenntnissen zur Langzeitstandfestigkeit, insbesondere unter diesen sehr erschwerten Betriebsbedingungen mit zahlreichen Starts und Stopps (bisher ca. 320 in kumulierten ca. 1800 Versuchsbetriebsstunden) wird gerechnet.

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

Die bestellte *Brennstoffzellenanlage mit protonenaustauschender Membran* soll herstellerseitig als System an den bisher noch nicht existierenden Luft (statt O₂)-Einsatz angepaßt werden. Dabei steht der Bau einer mobilen Anlage an, die bei einer Nennleistung

von 10 kW_{el} als elektrochemische Stromquelle für den Antrieb eines Serien-Elektrogabelstaplers auf dem Versuchsgelände in Neunburg vorm Wald verwendet werden soll. Der Garantielauf wird für Ende 1996 erwartet.

Als Wasserstoffspeicher kommt die hier gewichtsmäßig sogar vorteilhafte *Hydridtechnik* zum Einsatz, wobei die Nutzkapazität auf einen 8-Stunden-Betrieb des Staplers bei einem durchschnittlichen Leistungsbedarf von 4 kW_{el} ausgelegt ist.

Somit ergibt sich für die SWB die Möglichkeit, neben der bereits eingesetzten Druckgas- und Flüssig-Wasserstoff-Technologie eine dritte wichtige Speichertechnik im praktischen Versuchsbetrieb 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 der alkalischen Brennstoffzellenanlage für stationäre Versuche der Membran-Brennstoffzellenanlage zur Simulation von Fahrzyklen umzurüsten. Generell ist die beauftragte PEMFC-Technologie als elektrochemische Stromquelle insbesondere für einen zukünftigen Einsatz in Elektrofahrzeugen prädestiniert.



Abb. 4: Betankungsserie von LH₂-Versuchsfahrzeugen

Mit den gewonnenen Versuchsergebnissen wurde die LH₂-Tankstelle, siehe Abb. 4, gegenüber der Ausgangssituation im April 1991 so weit optimiert, daß die Zeit für einen kompletten Betankungsvorgang von anfangs über 60 Minuten auf zunächst noch ca. 15 Minuten verkürzt und die während dieses Vorgangs entstehenden Verdampfungsverluste von 30 % auf weniger als 10 % der übertragenen LH₂-Menge gesenkt werden konnten. Eine weitere Verbesserung auf unter 9 Minuten wurde erstmals im Oktober 1994 - seit September 1995 ca. 5 Minuten - mittels neu entwickelter kaltziehbarer Kupplungssysteme erreicht. Folgebetankungen sind innerhalb von 3 Minuten möglich.

Im Juli 1995 beauftragte die SWB ein 125-Liter - Fahrzeugtanksystem ohne Kryovalve, bei dem ab April 1996 in Neunburg vorm Wald entsprechende Zeiten von etwa 5 Minuten bei dann rückgasfreier Betankung erzielt werden sollen.

5. Übergeordnete Erkenntnisse

Bei der Abwicklung des SWB-Projekts hat sich herausgestellt, daß Wasserstoff-Systeme zur

Energiewandlung derzeit meist nur als Prototypen zu kaufen sind, und sich ihre Integration zu einem sinnvollen Gesamtkonzept häufig schwieriger gestaltet, als gemeinhin vermutet. So werden besonders Umfang und Komplexität der zugehörigen Anlagenperipherie häufig unterschätzt.

Die Vielzahl notwendiger Betriebsmitteleinrichtungen und Nebensysteme unterstreicht den Sachverhalt, daß größere Wasserstoff-Anlagen individuell zu planende Systeme des Anlagenbaus sind.

Zentralisierte Erzeugung, Speicherung und anschließende energetische Nutzung drängen sich nicht nur aus Gründen der Kostendegression, sondern auch hinsichtlich einer optimalen Betreuung und sicherheitstechnischen Ausstattung auf.

Ferner ist - abweichend vom Konzept in Neunburg vorm Wald - anzuregen, größere Anlagenteilsysteme der Gaserzeugung und -nutzung im Freien aufzustellen. Die Entscheidung (zum Teil auch Lieferantenforderung), aus Betreuungs-, Wartungs- und Versuchsbequemlichkeitsgründen die meisten Prototypen in eine gemeinsame Betriebsgebäudehalle zu stellen, zieht eine aufwendige Peripherie der Gesamtanlage nach sich und ist letztlich nicht notwendig. Oft mußte wegen Arbeiten an einzelnen Systemen die Gesamtanlage abgeschaltet bzw. die gesamte Betriebsgebäudehalle in einen inertisierten Zustand gebracht werden. Da in einer Versuchsanlage der vorstehend beschriebenen, gewünschten Komplexität fast immer irgendwo gearbeitet wird, hat darunter die Betriebsstundenstatistik einzelner Systeme deutlich gelitten.

Seit ca. sechs Jahren wird die - wie erwähnt, weitgehend aus Prototypen aufgebaute - Gesamtanlage problemlos und sicher betrieben. Abgesehen von einem lokalen Kabelbrand im März 1991, der von der Betriebsmannschaft mit Handfeuerlöschern erstickt werden konnte, traten sicherheitstechnisch keine kritischen Ereignisse auf.

Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer ausreichenden Sicherheitstechnik und Erfahrung des eingesetzten Personals. Generell läßt sich feststellen, daß anfangs nicht alle installierten Systeme der Solar-Wasserstoff-Anlage zufriedenstellend arbeiteten. Die SWB war jedoch bisher in der Lage, die meisten - auch zwischenzeitlich immer wieder neu - auftretenden Probleme sowohl an einzelnen Teilsystemen als auch bei deren Zusammenwirken zufriedenstellend zu lösen. Teilweise konnten zusätzliche Verbesserungen erarbeitet werden.

So stellte sich z. B. auch bei der Photovoltaik heraus, daß noch nicht alle Komponenten (Module, Umrichter) ausgereift sind. Hier führten in guter Zusammenarbeit mit den Lieferanten die gewonnenen SWB-Erkenntnisse direkt zu wesentlichen Änderungen bei der Entwicklung und Herstellung. Besonders für größere Photovoltaikanlagen konnten gemeinsam eine Reihe grundsätzlicher Erkenntnisse erarbeitet werden, die z. T. bereits in die Realisierung anderer Anlagen eingeflossen sind. Dazu gehören die Verbesserung der elektrischen Verschaltung (Verluste, Blitzschutz und Freischaltmöglichkeiten für Wartungsarbeiten) sowie optimierte Steuerungs- und Regelungskonzepte der Umrichter.

Im Verlauf des Projekts konnte eine Reihe von neuen Entwicklungen mit angestoßen werden. Dies betrifft - siehe dazu auch *Abb. 1* - neben einigen kristallinen Solarzellentechniken (z. B. AS Hybrid und HE) 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 und ein neuartiges Tanksystem für die Betankung von LH₂-Versuchsfahrzeugen. Mit diesen Entwicklungsanstößen ist die SWB einer wichtigen Zielsetzung gerecht geworden.

Einige Firmen haben, wie erwähnt, ihre Aktivitäten auf dem Gebiet der bei der SWB getesteten Anlagenteilsysteme eingestellt. Für die SWB bedeutet das zum einen auslaufende Möglichkeiten der Ersatzteilversorgung, zum anderen aber, daß diese Firmen nicht mit Fortsetzungsentwicklungen auf den gewonnenen Ergebnissen aufbauen können.

Der Kontakt zu Genehmigungsbehörden hat sich ausgesprochen positiv entwickelt. So wurden z. B. mit dem TÜV Bayern Sachsen Ergebnisse erarbeitet, welche die notwendigen Anforderungen und Randbedingungen auch auf z. T. damals noch neuen Arbeitsgebieten berücksichtigen. Das zur Verfügung stehende, über bisher neun Jahre gewachsene Know-how der SWB ist durch die Realisierung des beschriebenen Demonstrationsprojekts breit gefächert und wird weiterführend auch bei der Konzeption und ggf. nachfolgenden

Abwicklung neuer (Solar-) Wasserstoff-Projekte genutzt, wie sie beispielsweise im Rahmen der vom Bayerischen Wirtschaftsministerium initiierten "Offensive Wasserstoff - Energietechnologie in Bayern" derzeit konkretisiert werden.

Ferner sprechen die vielfältigen Erkenntnisse aus dem SWB-Projekt Neunburg vorm Wald für die Zweckmäßigkeit bzw. Notwendigkeit, neben Grundlagenforschung und Entwicklungsvorhaben auch weiterhin technologisch orientierte Demonstrations- und Versuchsvorhaben im industriellen Maßstab zur praxisnahen Erprobung von Prototypen durchzuführen. Darüber hinaus kann die SWB heute eine qualifizierte Öffentlichkeitsarbeit mit Information aus erster Hand anbieten. Dies zeigt die generell positive Resonanz des Projekts, ferner ersichtlich in der jährlichen Durchschnittszahl von ca. 13 000 internationalen Experten und sonstigen Interessenten, die Neunburg vorm Wald besuchen.

6. Energiewirtschaftliche Einordnung, Perspektiven

Aus den Arbeiten auch der SWB folgt die energiewirtschaftliche Einschätzung, daß eine auf Wasserstoff als Energieträger basierende Energiewirtschaft nur nach einem erheblichen 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. Wasserstoff und elektrischer Strom sind keine konkurrierenden Alternativen.

Eine Ausnahme stellt aus heutiger Sicht ggf. der Verkehr dar, der zur Immissionsentlastung in Ballungsgebieten auf einen gut speicherbaren, sauberen Energieträger angewiesen sein wird. Weiterhin gibt es Anstrengungen, infolge des höheren elektrischen und Gesamtwirkungsgrads kleinere Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen auf Basis kommerzieller phosphorsaurer Brennstoffzellenanlagen gegenüber Gasmotoren konkurrenzfähig zu machen.

Kleine Membran-Brennstoffzellenanlagen werden möglicherweise auch im stationären Bereich einen Markt finden.

Realistisch erscheinende Kostensenkungspotentiale bei einzelnen Anlagensystemen sollten weiterverfolgt werden, um sich sukzessive den Verhältnissen der jeweils gegebenen Konkurrenzsysteme anzunähern.

Größeren zentralisierten Anlagen auf regenerativer Basis wäre aus SWB-Sicht gegenüber vielen kleineren der Vorzug zu geben. Als Hauptgründe dafür seien Großkomponentenfertigung, Anlagensicherheit bei der notwendigen komplexen Steuerung sowie der spezifisch sich reduzierende Flächenbedarf genannt.

Die in Neunburg vorm Wald geleisteten Arbeiten auf dem Wasserstoffsektor - sie stellen den Schwerpunkt des Engagements dar - liefern auch losgelöst von der hier genutzten Photovoltaik wertvolle Kenntnisse für entsprechende Wasserstoffszenerarien. Gezeigt hat sich ferner, daß wegen der verfahrenstechnischen und elektrochemischen Schwerpunkte dieser Wasserstoff-Systeme die Verwandtschaft zum konventionellen Anlagenbau größer ist, als man es hinter dem Stichwort "Solartechnologie", in der Wasserstoff als Energieträger oft eingeordnet wird, vermuten würde.

Die Entscheidung zugunsten eines Langzeitenergiespeichers auf Basis Wasserstoff steht derzeit nicht an. Auf längere Sicht könnte Wasserstoff jedoch zunehmend gute Chancen haben. Auch in Zukunft wird die Zweckmäßigkeit eines ausgewogenen Energiemix' wohl weiter gültig sein.