

# Praktische Erfahrungen mit der Phosphorsauren Brennstoffzelle

von Holger Grubel  
und Gerald Newi

## Überblick

Der Betrieb von zwei phosphorsauren Brennstoffzellen (PAFC) der Firma ONSI im Pilotprojekt Brennstoffzellen-BHKW der Hamburgischen Electricitäts-Werke und der Hamburger Gaswerke erlaubt den Vergleich zwischen der PC25 A, die mit Erdgas betrieben wird, und dem Nachfolgemodell PC25 C, die für den Wasserstoffbetrieb umgebaut wurde. Die Einbindung in eine Nahwärmeversorgung liefert Erfahrungen aus dem Betrieb in der Grundlast und der wärmegeführten Betriebsweise der Brennstoffzellen. Dabei werden Stärken und Schwächen der Brennstoffzellen dargestellt und es wird deutlich, dass die Anlagen nicht für eine Kraft-Wärme-Kopplung ausgelegt sind. Ebenso klar haben die Brennstoffzellen herausragende Eigenschaften demonstriert, die sie als ein Bindeglied von der heutigen Energieversorgung in eine auf solare Energien basierenden Energiewirtschaft darstellen.

Two phosphoric acid fuel cells (PAFC) built by ONSI and now in operation by the Hamburgische Electricitäts-Werke and the Hamburger Gaswerke allow to compare the PC25 A running on natural gas and the follow-up model PC25 C modified for the operation with hydrogen. By the installation in an existing district heating system, operate experience is gained in base load and thermal demand-following mode. This brought up strong and weak points of of the fuel cells, obviating that these units have not been originally designed for co-generation purposes. Nonetheless, the fuel cells have demonstrated outstanding characteristics, proofing that they can become a binding element in the transition from today's energy supply system to a future solar based energy economy.

## 1. Vorbemerkung zur Frage, warum wir uns mit Brennstoffzellen beschäftigen

Weltweit wird die Energie zu 80% aus fossilen Trägern gewonnen. Der größte Vorteil von z. B. Kohle oder Erdöl, die hohe Energiedichte, Transportier- und Speicherbarkeit, hat für eine flächendeckende Verbreitung gesorgt. Diese vor Jahrmlionen eingelagerte Energie steht jedoch auf lange Sicht nur begrenzt zur Verfügung und die CO<sub>2</sub>-Anreicherung in der Atmosphäre zwingt uns, über neue Energieträger und -strukturen nachzudenken. Die Vision der zukünftigen Energiever-

sorgung basiert auf erneuerbaren Energiequellen und emittiert dabei keinerlei Schadstoffe. Einzig die solare Energiewirtschaft sowie Beiträge von Geothermie und Gezeiten machen diese Energieversorgung nach heutiger Erkenntnis möglich. Dabei müssen die Schwierigkeiten der eingeschränkten Speicherbarkeit und Transportierbarkeit durch neue Energieträger wie z. B. Wasserstoff bewältigt werden.

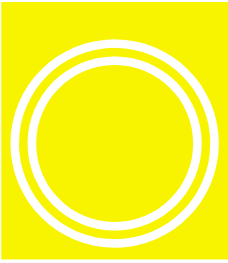
Brennstoffzellen stellen eine Schlüsselkomponente in diesem Prozess dar. Ihre hohe Effizienz, die außerordentlich vielseitige Anwendbarkeit vom Kraftwerk bis zur Knopfzelle und die Emissionsarmut machen die Brennstoffzelle zu einem Bindeglied beim Übergang vom fossilen in solar fundierte Energiesysteme. Heute können sie sehr effizient mit Erdgas betrieben werden und reduzieren damit CO<sub>2</sub>-Emissionen und Schadstoffausstoß. Zukünftig bieten sie die geeignete Technologie, um auf Wasserstoff als Energiespeicher der Zukunft umzusteigen.

## 2. Ziele für den Einsatz in der dezentralen Wärmeversorgung

Entsprechend leiten sich die Ziele des Pilotprojekts Brennstoffzellen-BHKW in Hamburg, Arbeitsgemein-

*Abbildung 1: Pilotprojekt Brennstoffzellen-BHKW Lyserstraße, AG der Hamburgischen Electricitäts-Werke AG und der Hamburger Gaswerke GmbH*





schaft der Hamburgischen Electricitäts-Werke AG und der Hamburger Gaswerke GmbH ab:

- Einsatz von Brennstoffzellen zur effizienten Energieumwandlung
- Reduzierung der Schadstoffemissionen
- Darstellung einer wärmegeführten Betriebsweise in einem Nahwärmeversorgungsgebiet
- Erfahrungen mit Wasserstoff als Energieträger
- Akzeptanzsteigerung von Wasserstoff
- Darstellung der Genehmigungsfähigkeit von Wasserstoffversorgungssystemen

Zum Erreichen der Ziele wurde das Projekt in zwei Hauptabschnitte eingeteilt. Zunächst stand die Technologie der Brennstoffzelle selbst im Vordergrund. 1995 wurde eine erdgasbetriebene phosphorsaure Brennstoffzelle installiert, mit welcher Erfahrungen bei Wartungsaufwand, Einsatzmöglichkeiten und Genehmigungsanforderungen gewonnen werden konnten.

Nach ersten Erfahrungen mit der Brennstoffzellentechnologie wurde dann 1997 im zweiten Schritt die Version PC25 C mit Wasserstoff realisiert, so dass vor Ort die Vergleichbarkeit zwischen den beiden Brennstoffzellen gewährleistet ist. Hierbei standen zunächst Akzeptanz- und Genehmigungsfragen im Vordergrund. Während der Betriebsphase wird seitdem das Betriebsverhalten der Brennstoffzelle in einem Nahwärmeversorgungssystem untersucht. Dabei wurden in Absprache mit der EU als Fördermittelgeber möglichst allgemeingültige Erkenntnisse angestrebt.

### 3. Betriebsphasen

Die Akzeptanz für die Brennstoffzellentechnologie ist hoch. Das öffentliche Interesse ist sehr groß, denn man erkennt, dass mit der Brennstoffzelle eine Technologie auf dem Weg zum Marktdurchbruch ist, die nahezu emissionsfrei Strom und Wärme erzeugt.

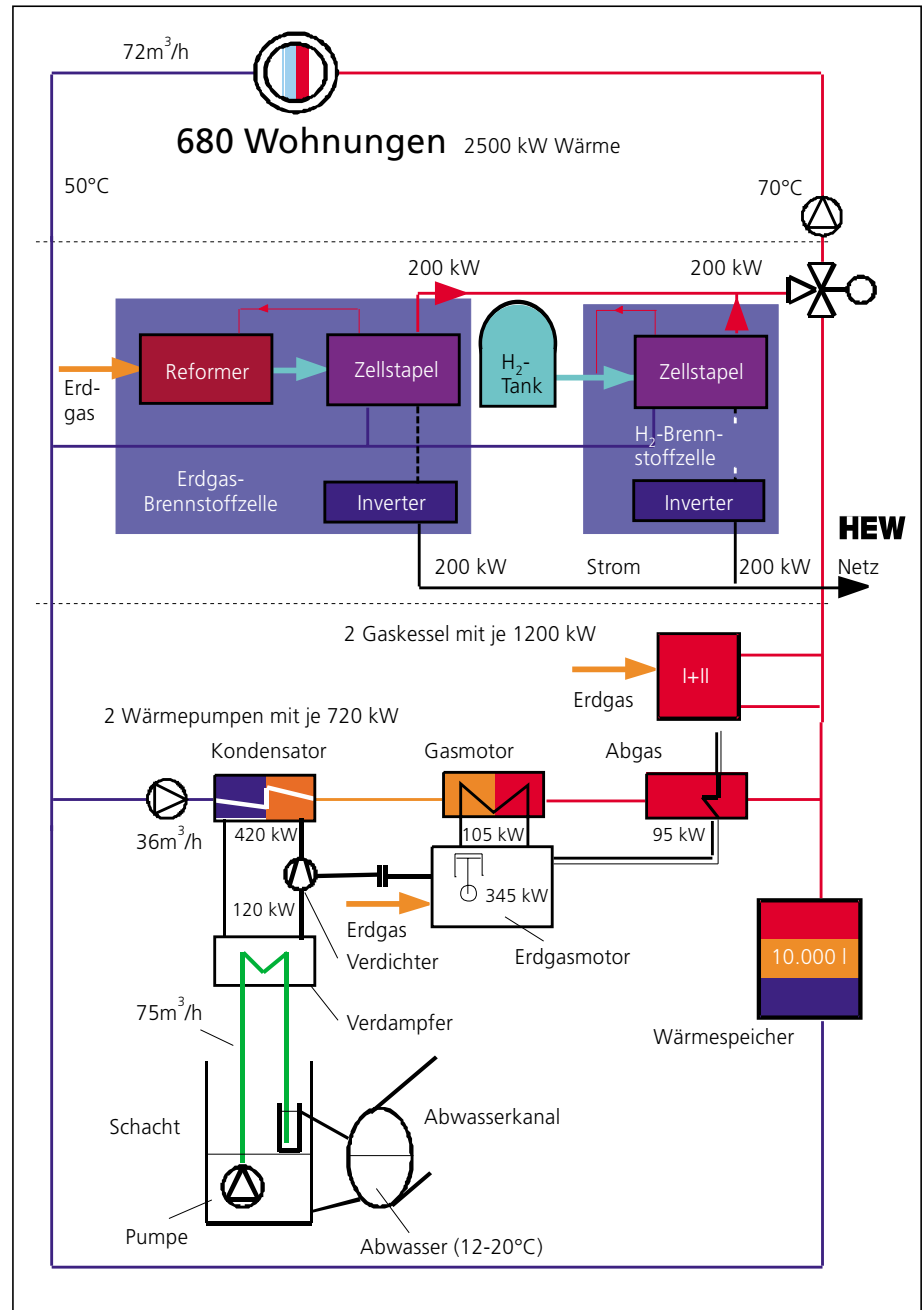
Bedenken, die zunächst gegen die Installation des Wasserstofftanks in unmittelbarer Nähe von Wohnhäusern vorhanden waren, konnten bei einer öffentlichen Anhörung ausgeräumt werden. Die eingesetzte Speichertechnik ist seit Jahren aus verschiedenen industriellen Anwendungen heraus bekannt und bewährt, lediglich die Installation innerhalb eines Wohngebietes mit den veränderten Anforderungen aus dem Bundes Immissionsschutz Gesetz ist eine neue Erfahrung. Die in Hamburg ausgeführte Speicheranlage ist besonders relevant im Hinblick auf eine weitere Verbreitung, bei der zukünftig auch Fahrzeuge mit Wasserstoff in Wohngebieten zum Einsatz kommen werden.

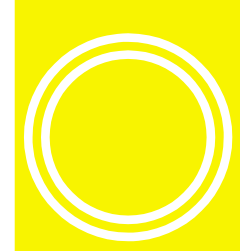
Bei der zukünftig auch Fahrzeuge mit Wasserstoff in Wohngebieten zum Einsatz kommen werden.

### 4. Einsatz in der Wärmeversorgung

Beide Brennstoffzellen speisen die mögliche Wärmeleistung in den Rücklauf des Nahwärmenetzes in Hamburg Bahrenfeld ein. Im Winter wird dadurch die Rücklauftemperatur im Wärmenetz angehoben, während im Sommer die Wärmeleistung der beiden Brennstoffzellenanlagen ausreichend für die Versorgung der Wohnhäuser ist. Bei schwacher Last wird

Abbildung 2: Nahwärmenetz Hamburg Lyserstraße





Wärme in einem 10 m<sup>3</sup> Wassertank gespeichert und bei Spitzenlast aus diesem Tank abgezogen (Abbildung 1).

Bei der hier eingesetzten Art der Einbindung einer Erzeugungsanlage in eine Wärmeversorgung würde in den meisten vergleichbaren Systemen die Leistungseinstellung mit der Rücklauftemperatur als Stellgröße erfolgen. Die Brennstoffzellen Anlage PC25 von ONSI bietet diese Möglichkeit in der Originalversion nicht. Die Leistungsvorgabe erfolgt durch die manuelle Einstellung der elektrischen Leistung. Um wärmegeführt zu fahren, wird der Wärmebedarf gesondert ermittelt. Durch eine externe Steuerung kann die elektrische Leistung so vorgeben werden, dass die gewünschte thermische Leistung erzeugt wird. Dieses Hilfsmodell funktioniert dann gut, wenn die elektrische Leistung stets über einen konstanten Proportionalitätsfaktor der Wärmeleistung entspricht. Dies ist bei phosphorsauren Brennstoffzellen zumindest im oberen Leistungsbereich gegeben, denn die Stromkennzahl 1, das Verhältnis aus erzeugter elektrischer zu thermischer Leistung, bleibt nahezu konstant.

Das Nahwärmenetz in der Lysenstraße besitzt eine so große Grundlast, dass die beiden phosphorsauren Brennstoffzellen fast ausschließlich bei voller Leistung in der Grundlast betrieben werden können. Diese Fahrweise gibt jedoch keinen Aufschluss über die Beanspruchung und materielle Tauglichkeit der Brennstoffzellen in verschiedenen Betriebszuständen. Aus diesem Grund wird die Leistung an typische Tagesganglinien angepasst. Dies geschieht mit einer externen Steuerung über ein analoges Signal (4-20mA), das bei der PC25C für die Einstellung der Leistung verantwortlich ist. Die Fahrweise der Brennstoffzelle entspricht dann einer Anlage, die als Spitzenlasterzeuger in einem Wärmesystem arbeitet, und stellt damit den härtesten Fall für die Auslegung einer Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Anlage dar.

### 5. Unterschiedliche Belastungen der Brennstoffzelle

Die Tagesganglinien sind durch eine Nachtabenkung, eine starke morgendliche Spitze und einen stark schwankenden Tagesverlauf gekenn-

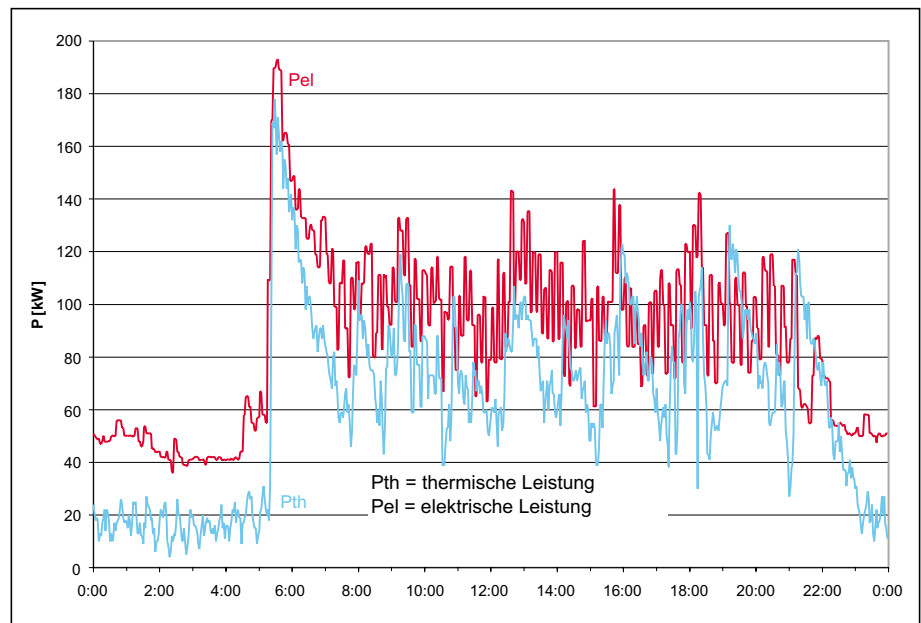


Abbildung 3: Tagesganglinie in einem Nahwärmeversorgungsgebiet

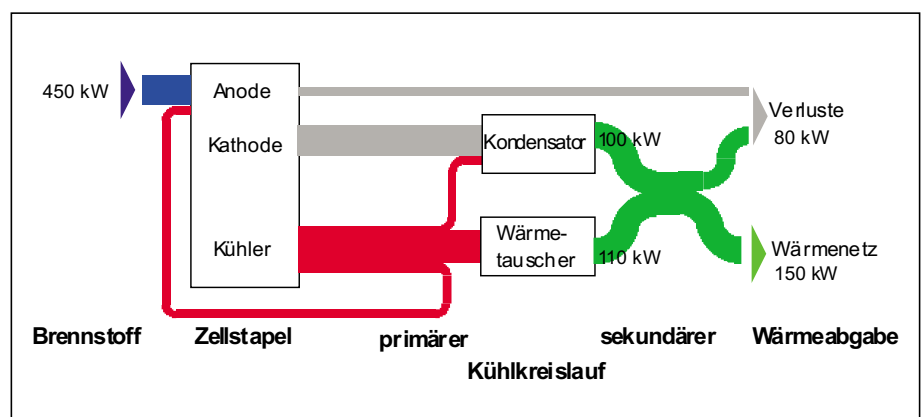


Abbildung 4: Vereinfachtes Wärmeflußdiagramm der Wasserstoff Brennstoffzelle

zeichnet (Abbildung 3). Für die Brennstoffzelle entstehen dadurch drei unterschiedliche Belastungsarten, die für verschiedene Anwendungen von Bedeutung sind: eine Belastung nahezu im Leerlauf, ein starker Lastsprung innerhalb kurzer Zeit und eine schwankende Last im oberen Lastbereich.

Innerhalb der Anlage entstehen mechanische oder thermische Beanspruchungen in erster Linie durch schwankende Temperaturen und instationäre Strömungsverhältnisse innerhalb des Zellstapels. Der primäre Kühlkreislauf ist für die Einhaltung der Zellstapeltemperatur verantwortlich. Er heizt den Zellstapel bei Schwachlast und kühlt erst bei hoher Leistung. Der Kühlkreislauf muss bei höherer Leistung eine niedrigere Temperatur haben, um ausreichend Wärme aus dem Zellstapel abzutransportieren. Andersherum muss

bei kleiner Leistung zusätzlich Wärme zugeführt werden, da durch den Abtransport des Reaktionsprodukts und der überschüssigen Luft zu viel Wärme aus dem Stapel transportiert wird. Bei Nennlast werden je ca. 50 % der Wärme über einen Kühler und über Anoden- bzw. Kathodenabgas aus dem Zellstapel geführt (Abbildung 4). Die Trägheit der Temperaturregelung des Kreislaufs führt bei Lastwechseln zu ungünstigen Temperaturverteilungen innerhalb des Zellstapels.

#### 5.1 Fahren bei niedriger Last

Der Bruttowirkungsgrad eines jeden Brennstoffzellenstapels steigt bei kleiner Last stark an. Hierin unterscheiden sich Brennstoffzellen deutlich von Verbrennungskraftprozessen. Bei praktischen Ausführungen von Brennstoffzellenanlagen überlagert sich diese Er

scheinung aber mit dem bei niedrigen Lasten überproportional großen Eigenverbrauch durch Pumpen, Ventile und Heizer.

Analysiert man die Auswirkung auf die Anlage, so ergibt sich bei kleiner Last, dass die Anlage nicht ausreichend Wärme erzeugt, um den Bedarf zu decken. Bei Lasten unter ca. 80 kW reicht die Wärmeentwicklung des Brennstoffzellenprozesses nicht aus, um ausreichend Wärme zu produzieren. Die Bruttoleistung des Zellstapels schwankt in diesem Bereich deutlich stärker als die netto thermische und elektrische Leistung – ein Indiz dafür, dass zum Wärmeausgleich die installierten elektrischen Heizer in unregelmäßigen Abständen zu- und abgeschaltet werden. Die entstandene Wärme innerhalb des Zellstapels wird zum großen Teil über das Abgas ausgetragen. Der anschließende kleine Kondensator ist nur auf die notwendige Wassergewinnung ausgelegt, so dass das Temperaturniveau nicht hoch genug ist, um ausreichend Wärme an das Wärmenetz abzugeben. Hier macht sich besonders negativ bemerkbar, dass der sekundäre Kühlkreislauf auf eine Temperatur von ca. 35°C abgekühlt werden muss, um ein ausreichend niedriges Temperaturniveau für den Kondensator bereitzustellen. Dies kann nur durch ständige Abfuhr von Wärme über das externe Kühlaggregat erreicht werden. Innerhalb der Anlage wird also der primäre Kühlkreislauf elektrisch geheizt, während der sekundäre Kühlkreislauf Wärme an die Umgebung abgibt. Die ursprünglich für reine Stromerzeugung ausgelegte Brennstoffzellenanlage ist daher für Fahren bei geringer Last in Kraft-Wärme-Kopplung nicht sinnvoll ausgelegt, der hohe elektrische Wirkungsgrad des Zellstapels kann nicht genutzt werden.

### 5.2 Der Lastsprung

Den starken Lastsprung erledigt die Brennstoffzelle nach außen hin ohne Probleme. Dabei ist der Gradient der Leistungsänderung durch die Anlagensteuerung fest vorgegeben und beträgt bei der Wasserstoffanlage 10 kW/s und bei der Erdgasanlage 5 kW/s. Begrenzt und reguliert wird dies, damit die Messwerte und die Sollwerte von Temperaturen, Ventilen und Lüftern nicht zu sehr divergieren. Nach ca.

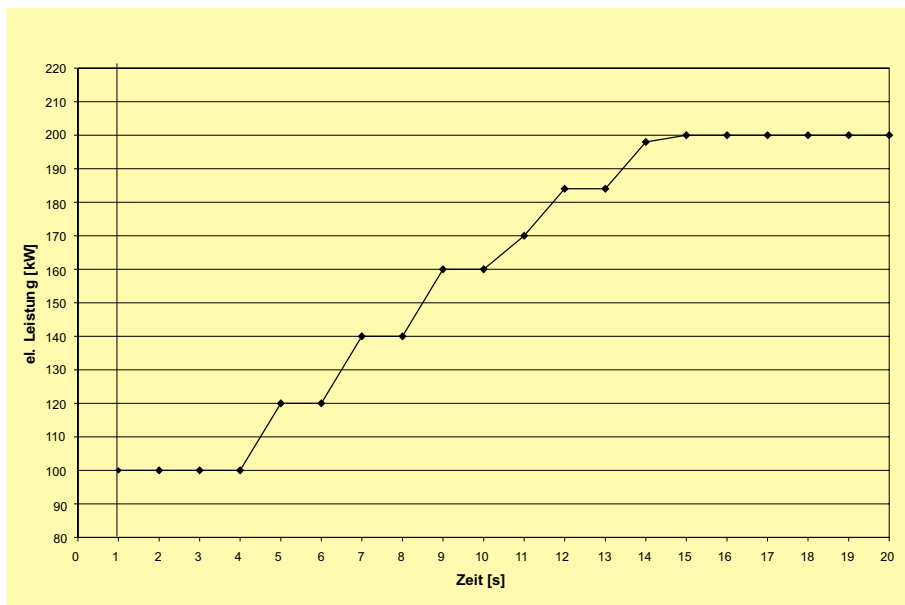


Abbildung 5: Lastsprung von 100 kW auf 200 kW – Eingangssignal bei 1 sec

20 min haben sich alle Betriebsparameter auf das neue Leistungsniveau eingependelt. Bei der PC25 erfolgt die Sollwerteinstellung der meisten Parameter über die Abfrage nach dem Stromfluss des Zellstapels – eine Kennfeldregelung gibt es nicht und daher wird ein großer Leistungssprung in kleineren Schritten absolviert. Das Diagramm (Abbildung 5) macht ebenfalls deutlich, dass sich die Bruttoleistung des Zellstapels deutlich schneller verändert; einzig regulierender Faktor ist hierbei die Geschwindigkeit, mit der Brenngas und Sauerstoff in die Zellen geführt werden können. Die hohe mögliche Regelgeschwindigkeit wird jedoch für das Einhalten der Betriebstemperatur innerhalb des Zellstapels und damit der längeren Lebensdauer reduziert.

### 5.3 Schwankende Lasten

Die 20 Minuten dauernde Annäherung der Werte an die Sollwerte zeigt auch, dass die schwankenden Lasten Belastungen für die Brennstoffzelle darstellen. Verändert sich innerhalb von wenigen Minuten die Leistung mehrmals um ca. 40 kW, so reagiert die Brennstoffzelle als schwingungsfähiges System und gerät mitunter dicht an Grenzwerte, die einen automatischen Shutdown verursachen würden. Die Wärmeabfuhr aus dem Zellstapel kann bei dieser Betriebsweise nicht mehr sicher gewährleistet werden, so dass bei längerem Betrieb

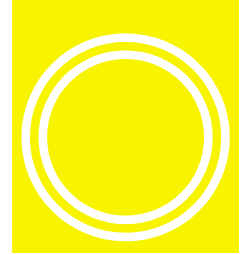
mit schwankender Last von einer Degradation ausgegangen werden muss, die deutlich über den normalen Werten liegt.

### 5.4 Erkenntnisse aus vier Jahren Betrieb

Die Verfügbarkeit der Brennstoffzellen liegt, wie bei einem Pilotprojekt zu erwarten, nicht auf dem Level vergleichbarer Motor-BHKW. Es ist jedoch auffällig, dass die von ONSI entwickelte Kernkomponente – der Zellstapel – zu keinem Zeitpunkt Ursache von Problemen war. Vielmehr sind es die Standardbauteile wie Pumpen, Ventile und Wärmetauscher, die deutlich zu viele Ausfälle haben. So wird auf diesem Weg der theoretische Vorteil der hohen Verfügbarkeit angesichts einer geringen Anzahl bewegter Teile wieder verspielt. Beispielhaft sollen hier zwei Fälle erläutert werden.

### 5.5 Ereignis bei der erdgasbetriebenen PC25 A

Der primäre Kühlkreislauf der PC25 benötigt deionisiertes Wasser. Die Reinhaltung des Kühlwassers erfolgt über einen Bypass-Kreislauf, durch den kontinuierlich ein kleiner Mengenstrom abgezweigt, heruntergekühlt, gereinigt und wieder zugeführt wird. Diese Reinigung durch Grobfilter, vier Ionentauscher-Harzflaschen und einen organischen Filter wird nicht kontinuierlich überwacht, sondern durch Stichproben kontrolliert. Erfol-



gen diese Stichproben zu selten oder zu spät, so verschlechtert sich die Wasserqualität rapide. Ablagerungen aus dem Kühlwasser lagern sich in Pumpen ab und führen letztendlich zum Ausfall. Dieser Fehler trat bei vielen Anlagen der Serie PC25 A auf, so dass bei dem Nachfolgemodell der PC25 C eine Online-Überwachung der Wasseraufbereitung eingebaut wurde.

#### 5.6 Ereignis bei der wasserstoffbetriebenen PC25 C

Die Eintrittstemperatur in den Zellstapel wird bei der PC25 C über ein Drei-Wege-Ventil geregelt, das die Mengenströme aus dem Wärmetauscher und dessen Bypass entsprechend des Sollwertes regelt. Das Ventil wird lediglich digital angesteuert und pendelt kontinuierlich um den Sollwert herum. Dies bedeutet relativ großen Stress für die beteiligten Komponenten, die sowohl Temperatur- als auch Druckzyklen unterliegen. Damit die Amplitude dieser Pendelbewegung etwas reduziert wird, wurde eine elektrische Bremse eingebaut, die in die Bewegung des Ventils nach Überschreiten des Sollwertes eingreift. Eine falsche Ansteuerung der Bremse führte jedoch wiederholt zum Ausfall der gesamten Anlage, da die Temperatur sich zu langsam dem Sollwert annäherte.

#### 6. Auswertung

Der Vergleich zwischen den beiden Modellen PC25 A und PC25 C zeigt, dass die Balance-of-Plant (BoP) Komponenten erkennbare Fortschritte gemacht haben. Die Verfahrenstechnik ist zuverlässiger und kompakter geworden, was unter anderem durch eine aufwändigere und damit auch anfälligeren Steuerung und Elektronik erzielt wurde. Die Verfügbarkeit von einer Vielzahl europäischer Anlagen liegt bereits deutlich über 90%, so

dass eine positive Tendenz eindeutig ausgemacht werden kann.

Die prinzipbedingten Vorteile der Brennstoffzellentechnologie wurden leider bei der Umsetzung nicht konsequent genutzt. Verbesserungspotenzial ist zum einen bei den Schallemissionen auszumachen. Da diese Anlagen sich hervorragend dazu eignen, in einem Wohngebiet die Grundlast des Wärmebedarfs abzudecken, sind die deutlich zu lauten Pumpen und Lüfter ein lästiges Übel. Nachträglich kann die Anlage nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand leiser gemacht werden. Zum anderen stellt sich auch bei stationärer Last kein stationärer Zustand der Anlage ein und alle Ventile und Ströme schwanken um einen Sollwert, was alle Komponenten stärker belastet, als es notwendig erscheint. Dadurch steigert sich das Ausfallrisiko.

#### 7. Probleme für den wärmegeführten Betrieb

Die PC25 ist für den amerikanischen Markt und speziell für militärische Anwendungen ausgelegt worden, in dem Wärmeauskopplung und Geräuscharmut nur eine untergeordnete Rolle spielten. Speziell die aufwändige Anordnung von primärem und sekundärem Kühlkreislauf ist nur durch die für den amerikanischen Bedarf ausgegerichtete alleinige Stromerzeugung sinnvoll. In Europa ist eine Wirtschaftlichkeit nur dann erzielbar, wenn Kraft und Wärme gekoppelt erzeugt werden.

Daher ist es auch von besonderer Bedeutung, Wärme auf einem brauchbaren Temperaturniveau von ca. 110 – 130°C zur Verfügung zu stellen. Aber trotz der Arbeitstemperatur von ca. 180°C kann Wärme maximal bei einer Temperatur von ca. 80°C ausgekoppelt werden. Dies ist für viele Anwendungen zu niedrig und schränkt

dadurch das Einsatzspektrum stark ein. Da die Anlage das Wasser, das zur Reformierung des Erdgas benötigt wird, durch Kondensation aus dem Abgas zurückgewinnen muss, ist die Temperatur für eine Energiegewinnung im sekundären Kühlkreislauf zu niedrig. Die Wärmetauscher sind für die gewünschten kleinen Temperaturdifferenzen oft zu klein ausgelegt.

Der wärmegeführte Betrieb hat gezeigt, dass die Anlage auf Grund ihrer Steuerung nicht für wechselnde Lasten ausgelegt ist. Werden die Anlagen mit schwankenden Lasten gefahren, wäre eine Kennfeldsteuerung unumgänglich, damit die Temperaturen im Zellstapel nicht schwanken und die Standzeit nicht eingeschränkt wird.

#### 8. Einsatzspektrum heute

Hervorragend geeignet ist die Anlage jedoch für stationäre Betriebsweise. Hierbei kann sie ihren Vorteil – hohe Wirkungsgrade von 50% Teillast bis Volllast – ausspielen. Der gelegentliche Wechsel auf ein anderes Leistungsniveau kann dabei schnell und problemlos erfolgen. Hieraus ergeben sich neben der beschriebenen Grundlast in der Wärmeversorgung eines Wohngebiets auch Nischen bei der industriellen Wärmeversorgung in Verbindung mit einem Speicher oder die Notstromversorgung von Rechenzentren oder Krankenhäusern.

ONSI ist die erste Firma, die eine kommerzielle Brennstoffzellenanlage für den stationären öffentlichen Stromversorgungseinsatz gebaut hat. Damit hat dieses Produkt noch heute einige Jahre Entwicklungsvorsprung vor vergleichbaren Konzepten. Vor dieser Tatsache sind die Leistungen der PC25 A und C zu betrachten, die zeigen, dass die europaweit erzielte Verfügbarkeit von deutlich über 70 % eine beachtliche Leistung darstellt.