

Steuerung, Regelung und Überwachung von Brennstoffzellen-Heizgeräten

Energiesparen ist für die Bürger in Deutschland zurzeit ein Top-Thema, ob aus ökologischen Gründen oder durch die steigenden Energiepreise. Daher ist das Thema „Dezentrale Stromerzeugung“ im Ein- und Mehrfamilienhausbereich zur Steigerung der Energieeffizienz von hohem Interesse. Denn damit kann eine bessere Ausnutzung der eingesetzten Energie erreicht und den steigenden Energiepreisen etwas entgegengewirkt werden. Dazu können zukünftig auch die Brennstoffzellen-Heizgeräte einen Beitrag leisten, wobei es bis zu einer Markteinführung von serienmäßigen Geräten noch einige Zeit dauern wird [1]. In diesem Artikel werden die „Innereien“ der Brennstoffzellen-Heizgeräte mit der dazugehörigen Steuerung, Regelung und Überwachung näher beschrieben.

Verwendete Brennstoffzellentypen bei Heiztechnik-Herstellern

Bei den Brennstoffzellen-Heizgeräten der verschiedenen Hersteller kommt meist eine PEMFC (Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell = Polymermembran-Brennstoffzelle) zum Einsatz. Die Tabelle 1 zeigt eine Übersicht über die bei den verschiedenen Heiztechnikherstellern eingesetzten Brennstoffzellen mit der dazugehörigen maximalen elektrischen bzw. thermischen Leistung. Neben einem BZH auf PEM-Basis entwickelt Vaillant zusammen mit Webasto ein Gerät auf SOFC-Basis. Hexis und MTS (Elco) entwickeln dagegen nur ein Brennstoffzellen-Heizgerät auf SOFC-Basis.

Aufbau eines Brennstoffzellen-Heizgerätes

Das Bild 1 zeigt das Schema eines Brennstoffzellen-Heizgerätes auf PEM-Basis mit den Hauptkomponenten und mit den wärmetechnischen Schnittstellen [2]. Bei den Brennstoffzellen-Heizgeräten wird der erforderliche Wasserstoff durch die Aufbereitung kohlenwasserstoffreicher Gase gewonnen (Reformierung). Der Reformer ist das Zentrum der Brenngasaufbereitung. Der Wasserstoff wird aus dem Prozessgas auf chemischem Wege bei Temperaturen um 800°C und durch Mitwirkung von Katalysatoren in der Brenngasaufbereitung der Anlage erzeugt (Reformierung). Nach dem Verlassen des Reformers ist das Brenngas noch stark mit Kohlenmonoxid

angereicht, das als Katalysatorgift wirkt. Im Shift-Reaktor wird das Kohlenmonoxid deshalb mit Wasserdampf in Kohlendioxid umgesetzt. Nach dem Verlassen des Reformers (Shift-Reaktor) ist es notwendig, den Kohlenmonoxidgehalt des Reformats durch ein chemisch-katalytisches Verfahren weiter zu reduzieren. Bei dem chemisch-katalytischen Verfahren, d.h. bei der selektiven Oxidation (PROX), reagiert Kohlenmonoxid unter Zufuhr von Luftsauerstoff zu Kohlendioxid, das zuvor dem Reformat vor der PROX zugeführt wurde.

Das Bild 2 zeigt zu dem Schema (Bild 1) den Aufbau eines realen Brennstoffzellen-Heizgerätes auf Basis einer PEM-Brennstoffzelle [2]. Der linke Teil des Bildes zeigt dabei die Komponenten des Brennstoffzellen-

Heizgerätes, die man von vorne erkennen kann und der rechte Teil zeigt die anderen Komponenten von der rechten Seite her gesehen.

Regelung eines Brennstoffzellen-Heizgerätes

Ein Brennstoffzellen-Heizgerät besteht aus einer Vielzahl von Regelkreisen (Tabelle 2). Diese gehen weit über die von einem Heizgerät (bodenstehend oder wandhängend) bekannten Regelkreise hinaus. Je nach Realisierung und Entwicklungsstand der Brennstoffzellen-Heizgeräte kann dabei der eine oder andere Regelkreis beim Seriengerät noch wegfallen oder hinzukommen. Die BZH-Regelungen und auch die Überwachungs- und Sicherheitseinrichtung sind zur Zeit aus Flexibilitätsgründen meist noch als SPS (= Speicherprogrammierbare Steuerung) ausgeführt, da erst für die Seriengeräte integrierte Hardwarelösungen vorgesehen bzw. zu erwarten sind.

Die Steuer- und Regelungseinheit des Brennstoffzellen-Heizgerätes beinhaltet neben der Steuerung / Regelung und der Sicherheitstechnik [3] auch die gesamte Ablaufsteuerung des BZH. Mit der Ablaufsteuerung (Zustandsautomat) werden der Reformer und die Brennstoffzelle hoch- bzw. heruntergefahren und bei Fehler / Störungen auch in einen sicheren Zustand gebracht. Diese Sicherheitsstellung muss dabei von jedem möglichen Betriebspunkt aus sicher erreicht werden können. Innerhalb der ein-

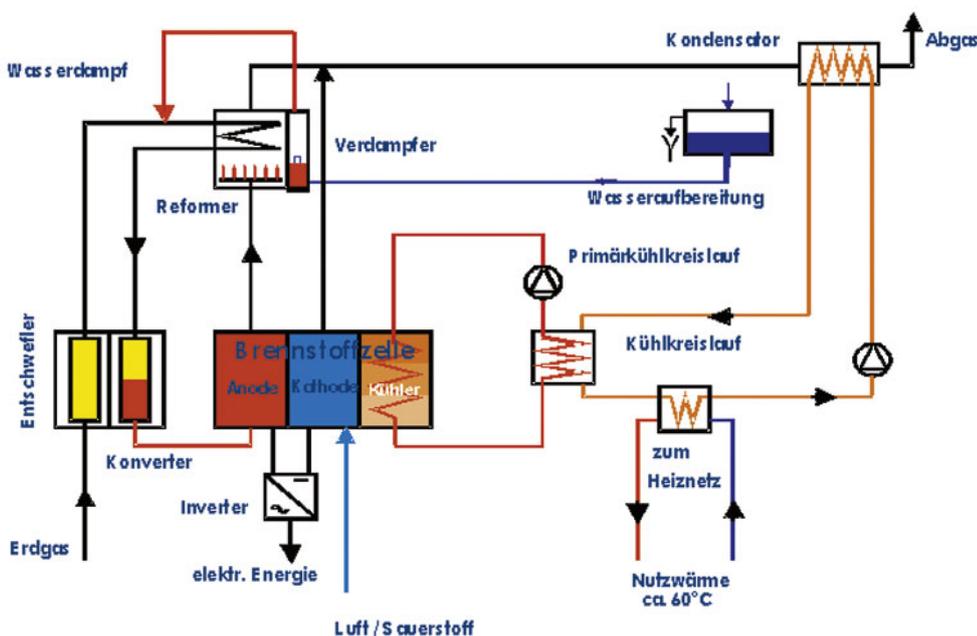


Bild 1: Schema eines Brennstoffzellen-Heizgerätes mit den wärmetechnischen Schnittstellen [3].

zelnen Zustände des Zustandsautomaten werden dann die unterschiedlichsten Steuer-, Regelungs- und Überwachungsfunktionen ausgeführt.

Ein komplexer Regelkreis ist z.B. die Brennerregelung (Bild 3), die aus der Reformertemperaturregelung und der überlagerten Verbrennungsoptimierung (O₂-Regelung) besteht. Mit der Reformertemperaturregelung wird der Reformierbrenner auf eine vorgegebene Temperatur geregelt, die in Abhängigkeit von den Betriebszuständen unterschiedlich sein kann. Bei konventionellen Gasbrennern wird das Gas-Luft-Verhältnis beim Brenner üblicherweise pneumatisch gesteuert. Dies ist ausreichend, da sich die Netz-Gaszusammensetzung nur in einer eingeschränkten Bandbreite ändern kann. Anders ist dies bei den Brennstoffzellen-Heizgeräten. Das Anodenrestgas wird zum Verbrennen vom Stack auf den Reformierbrenner zurückgeführt. Da sich die Zusammensetzung des Anodenrestgases im Betrieb stark ändert, ergibt sich eine große Bandbreite des Brenngasgemisches von reinem Erdgas bis zu einem hoch wasserstoffhaltigem Gemisch. Beim Start der Anlage ist noch kein Anodenrestgas vorhanden und der Reformierbrenner wird vollständig mit Erdgas beheizt. Während des Starts des Reformierungsprozesses wird Wasserstoff erzeugt. Der Stack gibt aber noch keine Leistung ab, da sich das BZH noch im Hochfahren befindet, und somit strömt das gesamte Reformat noch auf den Brenner. Für den Reformierbrenner ergeben sich daher die folgenden wechselnden Betriebssituationen:

- Aufheizen mit Erdgas,
- Aufheizen mit Gemisch aus Erdgas und Reformat,
- Dauerbetrieb mit Gemisch aus Erdgas und Anodenrestgas,
- Übergangszustände mit stark schwankendem

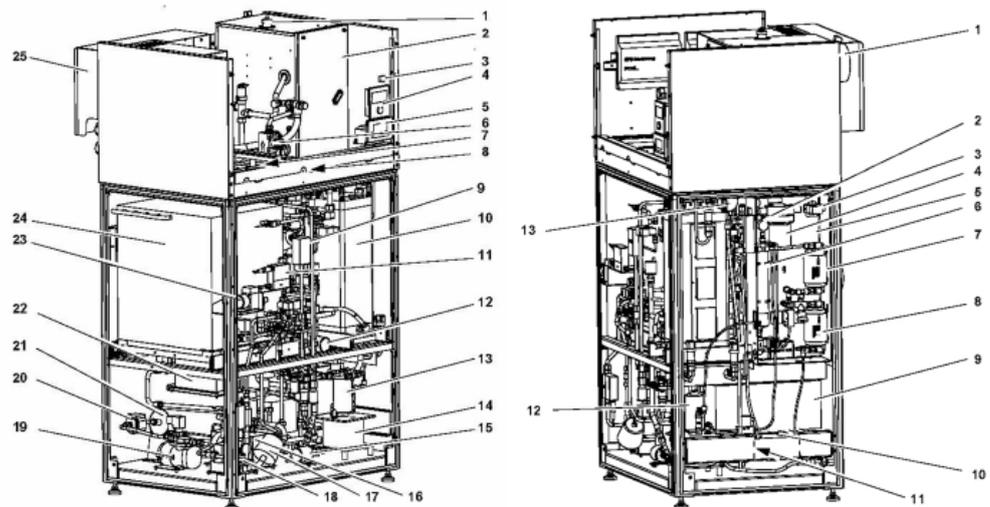


Bild 2: Aufbau eines Brennstoffzellen-Heizgerätes (links: Vorderseite, rechts: rechte Seite) [2].

links: Vorderseite:

- 1 Schnellentlüfter
- 2 Zusatzheizgerät, Brennergehäuse
- 3 Schalter Zusatzheizgerät
- 4 Kessel-Bedienmodul
- 5 BZH-Bedienpanel
- 6 Gasventil
- 7 Heizkreispumpe
- 8 Wasserstoff-Sensor
- 9 Lambda-Sonde
- 10 BZ-Stack
- 11 Volumenstrommesser
- 12 Kühlkreislaufpumpe

13 CO₂-Falle

- 14 Wassertank
- 15 Wasserpumpe
- 16 Reformierbrennerpumpe
- 17 Filter
- 18 Kathodenluft-Gebläse
- 19 Kompressor
- 20 Filter Entschwefler
- 21 Entschwefler
- 22 H₂-Zirkulationspumpe
- 23 Anodenluftgebläse
- 24 Reformierbrenner
- 25 Reformier-Sicherheitsüberwachung/regelung

rechts: rechte Seite:

- 1 Abgasstutzen
- 2 Manometer Wasserdruck
- 3 Frischwasserventil
- 4 Wasseraufbereitung
- 5 Wasseraufbereitung
- 6 Wasseraufbereitung
- 7 Ionentauscher
- 8 Ionentauscher
- 9 Befeuchter
- 10 Wasserpumpe
- 11 Wasserfilter
- 12 CO₂-Falle
- 13 Schnellentlüfter

Gemisch aus Erdgas und Reformat / Anodenrestgas beim Zu- und Abschalten des Brennstoffzellen-Stacks.

Zur Erreichung eines hohen Gesamtwirkungsgrades und aus sicherheitstechnischen Forderungen muss der Brenner das Anodenrestgas vollständig verbrennen. Somit ist das Anodenrestgas zum Brenner nicht steuerbar. Lediglich durch die Dosierung der zugeführten Erdgasmenge kann die sich ergebende

Mischgasmenge eingestellt werden, wenn auch nur in Grenzen. Die Luftsauerstoffzufuhr kann über die Drehzahl des Brennergebläses eingestellt werden. Daraus ergeben sich zwei Stellgrößen – zudosierte Erdgasmenge und Luftmenge – mit denen die Leistung und die Luftzahl gesteuert werden können. Eine reine Steuerung der Luftzahl ist wegen der großen Gemischbandbreite zur Sicherstellung der Verbrennungshygiene und eines zuverlässigen Betriebes

nicht ausreichend. Daher wird ein Sauerstoffsensor im Abgas zur Ermittlung des Restsauerstoffgehaltes im Abgas verwendet, mit dem die Luftzahl (Gas-Luft-Verhältnis) berechnet wird. Zusammen mit den beiden Stellgrößen ist eine Regelung der Luftzahl möglich und die Verbrennungshygiene wird auf diese Art sichergestellt.

Das Bild 4 zeigt den Reformertemperatur-Regelkreis mit dem überlagerten Regelkreis zur Verbrennungsoptimierung

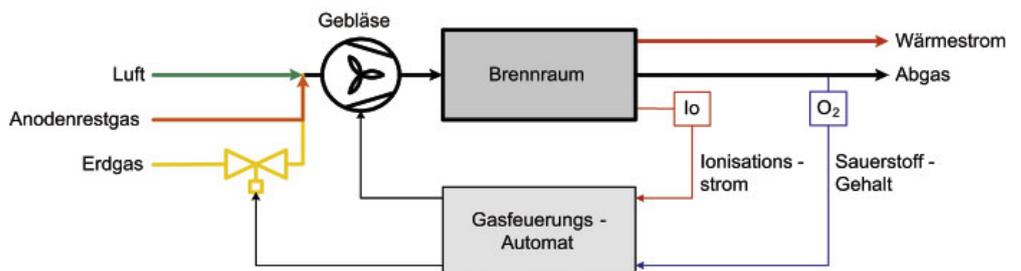


Bild 3: Schema der Brennerregelung.

Tabelle 1: Übersicht über die bei den verschiedenen Heiztechnik-Herstellern eingesetzten Brennstoffzellentypen mit den dazugehörigen elektrischen und thermischen Leistungen.

Heiztechnik-Hersteller	PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)	Leistung	
			elektrisch	thermisch
Bosch-Buderus-Thermotechnik	X		4,6 kW	9,0 kW
BAXI INNOTECH	X		1,5 kW	3,5 kW
Hexis		X	1,0 kW	2,5 kW
MTS(Elco)		X	2,0 kW	5,0 kW
Vaillant	X	X	4,6 kW	7,0 kW
Viessmann	X		2,0 kW	5,0 kW

mit einem Sauerstoffsensor. Der Regler für die Reformertemperatur verstellt bei einer Regelabweichung die Luftmenge des Brenners und in Abhängigkeit der eingestellten Luftmenge führt eine Steuerung die Gasmenge der Luftmenge (Gas- / Luft-Kennlinie) automatisch nach. Damit wird sichergestellt, dass bei einer Laständerung die Gasmenge schnell der Luftmenge angepasst wird. Wird durch die Steuerung nicht der gewünschte O_2 -Wert im Abgas des Reformerbrenners erreicht, so greift der Verbrennungsoptimierungsregler ein und korrigiert die Einstellung der Steuerung.

Energiemanagement

Effiziente Energieversorgungs-konzepte für Haus oder Gebäu-

de werden in Zukunft immer mehr für den jeweiligen Haus- oder Gebäudetyp maßgeschneidert. Das Energiemanagement muss dabei z. B. eine Bilanzierung der erzeugten und der benötigten Energie durchführen, um daraus die Führungsstrategie sowohl der Erzeugerseite als auch für die Verbraucherseite festzulegen. Dieses System beinhaltet auch die Anbindung weiterer Haussysteme wie z. B. Wärmepumpe oder Solartechnik [4]. Dem Energiemanager obliegt dann die Entscheidung welcher Erzeuger aus energetischen oder aus wirtschaftlichen Gründen zur Energieerzeugung zu- oder abgeschaltet wird. Entsprechend legt der Energiemanager auch fest, welche Energiemenge anhand der benötigten Energie erzeugt werden muss und in

welcher Form diese anhand des gelernten Nutzerverhaltens zu puffern / speichern bzw. vorzuhalten ist.

Man kann die Betriebsweise z. B. optimieren, indem das Brennstoffzellen-Heizgerät in der Zeit auf Vollast betrieben wird, wenn die Netzlast steil ansteigt und im Netz entsprechend Spitzenlast benötigt wird. In dieser Zeit kann das BZH teureren Spitzenstrom substituieren, den Lastgang glätten und aus Sicht des Anlagenbetreibers wertvollen Spitzenstrom produzieren, der von den EVUs in dieser Zeit vielleicht auch entsprechend besser vergütet wird. Die parallel produzierte Wärme geht entweder in das Heizsystem oder in den Warmwasser- und / oder Pufferspeicher. Um dies zu gewährleisten, müssen dem Haus- bzw. Gebäude-Energie-

manager Informationen, wie z. B. die Tarife des EVU, zur Verfügung gestellt werden. Neben der energetischen Steuerung / Regelung des Brennstoffzellen-Heizgerätes liefert der Energiemanager auch energetische und wirtschaftliche Daten von dem Brennstoffzellensystem und eventuell von den anderen Erzeugern. Dies hängt davon ab, wie die verschiedenen Erzeuger dabei mit dem Energiemanager kommunizieren.

Bei dem dezentralen Energiemanagement-System (DEMS) [5] handelt es sich um ein Leitsystem zur zentralen Steuerung vieler stationärer Brennstoffzellengeräte oder anderer dezentraler Stromerzeugungsanlagen. Es sorgt für eine wirtschaftlich optimierte Betriebsweise des Anlagenverbundes (Lastmanagement) sowie für eine effiziente Wartung und Störungsbeseitigung (Service-management). Das dezentrale Energiemanagement-System spricht dabei jedes der einzelnen Brennstoffzellensysteme an. Gekoppelt mit einem Prognosesystem für die wesentlichen Einflussgrößen kann es Einsatzpläne für die dezentralen Stromerzeuger berechnen und den Strombezug aus dem übergeordneten Netz optimieren.

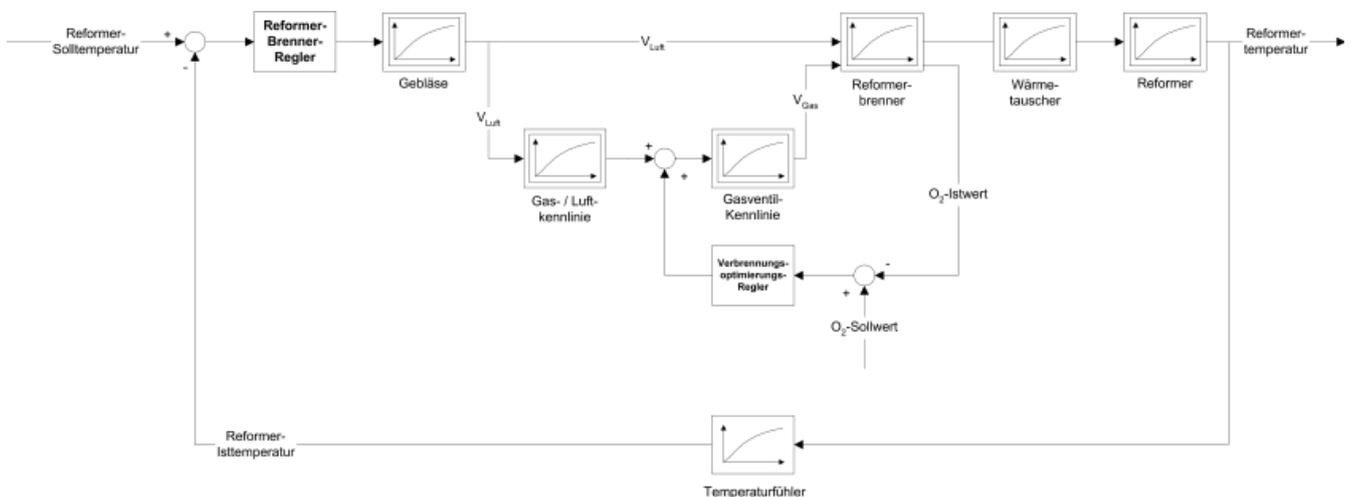


Bild 4: Reformertemperatur-Regelkreis mit überlagelter Verbrennungsoptimierung.

Tabelle 2: Übersicht über die verschiedenen Regelkreise des BZH [4].

Regelkreis	Aufgabe	Regelgröße	Stellgröße
Erdgasmenge	Einregeln der Erdgasmenge für den Reformier	Volumenstrom des Erdgas	Verdichtergebläse / Kompressor
Prozesswassermenge	Einregeln der Prozesswassermenge für den Reformier	Volumenstrom des Prozesswassers	Regelventil oder Pumpe
Verbrennungsoptimierung	Einregeln der Luftzahl	Ionisationsstrom oder O ₂ -Gehalt des Abgases	Erdgasventil des Brenners
Reformertemperatur	Einregeln der Reformertemperatur	Reformertemperatur	Luftgebläsedrehzahl des Brenners / Modulationsgrad
Temperatur vor oder hinter der Hoch- oder Niedertemperatur-Shiftstufe oder der PROX	Einregeln der Temperatur vor oder hinter der Hoch- oder Niedertemperatur-Shiftstufe oder der PROX	Temperatur vor oder hinter der Hoch- oder Niedertemperatur-Shiftstufe oder der PROX	Durchfluss durch den Wärmetauscher vor oder hinter der Hoch- oder Niedertemperatur-Shiftstufe oder der PROX
Temperatur vor oder hinter der Brennstoffzelle	Einregeln der Temperatur vor oder hinter der Brennstoffzelle	Temperatur vor oder hinter der Brennstoffzelle	Durchfluss durch den Wärmetauscher vor der Brennstoffzelle/ Drehzahl der Pumpe
Luftdruck vor der SelOx	Einregeln des Luftdruckes im Pufferbehälter vor der SelOx-Luftführung	Luftdruck im Pufferbehälter	Kolbenpumpe
SelOx-Temperatur	Einregeln des Delta-T über der SelOx, um indirekt den CO-Gehalt auf einem Minimum zu halten	Delta-T = Temperatur nach der SelOx minus Temperatur vor der SelOx	SelOx-Gebläse
Gasdruck vor der Reformierzuführung	Einregeln des Gasdruckes im Pufferbehälter der Reformier-Erdgaszuführung	Gasdruck im Pufferbehälter	Erdgasverdichter
Feuchteregelung der Kathodenabluft	Einregeln des Feuchtegehaltes der Abluft der Kathode auf einen konstanten Wert	Feuchteistwert der Luft	Zuluftgebläse
Luftvolumenstromregelung der Zuluft des Stacks	Einregeln des Luftvolumenstromes zur Kompensation von Verstopfung im Luftweg	Luftvolumenstrom	Gebläse der Stackzuluft
Zellspannungsregelung des Stacks	Konstanthalten der Zellspannung beim Anlauf und Begrenzung im Betrieb	Stromsollwert	Leistung
Stromregelkreis des Stacks	Einregeln des Stromsollwertes	Stromistwert	Wechselrichter
Vorlauftemperatur Sekundärkreislauf	Einregeln auf die Temperaturanforderung der Verbraucher	Vorlauftemperatur des Sekundärkreises	Mischerventil, Pumpe

Zusammenfassung und Ausblick

Ein großer Part bei den Brennstoffzellen-Heizgeräten nimmt die Sicherheits-, Steuer- und Regelungstechnik ein. Diese gehen bei den Brennstoffzellen-Heizgeräten über das heute von den Kesseln und Thermen bekannte weit hinaus, und die Regelung für ein Brennstoffzellen-Heizgerät ist weitaus komplexer als die heutigen Heizungsregelungen. In diesem Artikel wurde versucht diese komplexe Steuer- und Regelungstechnik etwas näher zu beleuchten und einen Einblick in die verschiedenen Regelkreise zu geben.

Vor einer serienmäßigen Markteinführung von Brennstoffzellen-Heizgeräten sind jedoch noch einige Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen notwendig. Gegenwärtig arbeiten die Heiztechnik-Hersteller an der Serientauglichkeit, d.h. an der Reduzierung der Größe und der Bauteile, um die Systemkosten zu senken. Ziel ist es, die Kosten auf ein konkurrenzfähiges Niveau von höchstens 1500,- Euro pro kW elektrischer Leistung zu drücken.

Literatur

- [1] Pfannstiel, D.: Auf dem Weg ins Feld. HLH, Lüftung / Klima, Heizung / Sanitär, Gebäudetechnik. Heft 7, 2005, Seite 11.

- [2] Technische Information Brennstoffzellen-Heizgerät BETA 1.5. BAXI INNOTECH GmbH, Hamburg.
- [3] Gossen, F.: Sicherheitsaspekte von Brennstoffzellen-Systemen. Ringvorlesung an der FH-Köln. TÜV-Rheinland, April 2004.
- [4] Feldmeth, R.: Steuerung und Regelung von BZ-Systemen. 1. Symposium f-cell, Die Brennstoffzelle. Haus der Wirtschaft, Stuttgart, 2001.
- [5] IBZ-Vortragspaket. Initiative Brennstoffzelle, www.Initiative-Brennstoffzelle.de, Januar 2007.

DiWiTech Ingenieurpraxis,
D-36287 Breitenbach a. H.,
Tel. +49 6675 918 851, E-Mail:
D.Pfannstiel@DiWiTech-Pfannstiel.de,
Internet: www.DiWiTech-Pfannstiel.de

Dr. Dieter Pfannstiel (47) ist seit 1997 als selbständiger Ingenieur im Bereich der Automatisierungstechnik tätig und war nach seiner Promotion an der TU-Darmstadt (Institut für Automatisierungstechnik, Prof. Dr.-Ing. R. Isermann) bis 1997 als Abteilungsleiter bei den Viessmann Werken in Allendorf / Eder im Bereich Forschung und Entwicklung beschäftigt.

Dieter Pfannstiel