

SOFC-Brennstoffzelle für gebäudebezogene Kraft-Wärme-Kopplung

Tests und erste Erfahrungen für eine optimale Einbindung in eine Gebäudeheizung

Die gebäudebezogene Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) mit einer Brennstoffzelle erreicht von allen Mikro-KWK-Technologien die höchsten elektrischen Wirkungsgrade. Diese Technologie ist bereits weit entwickelt und steht kurz vor dem Markteintritt. Der deutsche Feldtest „Callux“ (www.Callux.net) und das von der EU geförderte Demonstrations- und Forschungsprojekt „ene.field“ (www.enefield.eu) mit im Endausbau zusammen 1.500 Einheiten unterstützen diesen Markteintritt mit großem Engagement sowohl auf nationaler als auch auf europäischer Ebene.

Diese dezentrale, gebäudebezogene Kraft-Wärme-Kopplung kann die stark schwankende Stromerzeugung aus Wind und Sonne ergänzen und das Gesamtsystem stabilisieren, kann zu virtuellen Kraftwerken vernetzt werden, kann elektrische Netze entlasten und kann auch vorhandene Heizkessel in energieoptimierten Ein- und Zweifamilienhäusern ersetzen.

Es besteht insofern breiter Konsens darüber, dass die Kraft-Wärme-Kopplung insgesamt ein wichtiger Baustein für die Energiewende ist. Dies wird aktuell mit dem politischen Ziel verknüpft, bis zum Jahre 2020 25 % des Stroms aus KWK zu liefern und die zugehörigen Klimaziele zu erreichen.



Prof. Dr.-Ing. Klaus Sommer, Leiter des Heizungslabors und zuständig für den Lehrstuhl Heizungstechnik und Gebäude- und Anlagensimulation (TRNSYS) am Institut für Technische Gebäudeausrüstung an der Fachhochschule Köln

Eva Mesenhöller, Studium der Energie- und Gebäudetechnik mit Schwerpunkt auf Green Building Engineering an der Fachhochschule Köln am Institut für Technische Gebäudeausrüstung, Bachelorstudentin im 7. Semester

untersucht [1]. Das Projekt unterteilt sich in die folgenden Arbeitsschritte: experimentelle Ermittlung der Leistungscharakteristika systemrelevanter Anlagenkomponenten, Parametrierung verschiedener Simulationsmodelle auf der Grundlage der experimentellen Ergebnisse und ganzheitliche Systemoptimierung auf der Grundlage der dynamischen Gebäude- und Anlagensimulation mit TRNSYS. Die nachfolgenden ersten Erfahrungen wurden im Laufe dieses Forschungsvorhabens gewonnen und auszugsweise in [2, 3, 4] präsentiert und veröffentlicht.

Der Versuchsstand

Abbildung 1 zeigt den Versuchsstand mit dem Mikro-KWK-Gerät und den zu Testzwe-

cken überdimensionierten Pufferspeicher. Die dargestellte Einhausung soll eine typische Kellersituation nachstellen.

Das Mikro-KWK-Gerät mit dem Namen BlueGEN ist ein Produkt der Firma Ceramic Fuel Cells GmbH (www.ceramicfuelcells.de), das in Australien entwickelt wurde und in Deutschland produziert wird. Dieses bodenstehende Gerät erzeugt zum überwiegenden Teil Strom und gleichzeitig auch etwas Wärme, wird mit Erdgas betrieben und hat die Größe einer Waschmaschine. Außerdem wird dieses Gerät mit Luft und Wasser versorgt, hat einen elektrischen Anschluss an das öffentliche Netz und eine Verbindung zum Internet für Fernüberwachung und Fernsteuerung. Ein Teil der Komponenten

Einleitung

In dem vorliegenden Beitrag geht es um ein Mikro-KWK-Gerät mit einer Festoxid-Brennstoffzelle (SOFC), welches bei einer elektrischen Leistung von 1,5 kW einen außergewöhnlich hohen elektrischen Wirkungsgrad aufweist. Dieses Gerät wird seit 2011 am Institut für Technische Gebäudeausrüstung der Fachhochschule Köln im Rahmen eines Forschungsvorhabens untersucht. Gefördert vom KlimaKreis Köln, der Rheinenergie AG und der Fachhochschule Köln, werden dabei für dieses KWK-Gerät die optimalen heiztechnischen Einsatzmöglichkeiten in Wohngebäuden unter praxisnahen Bedingungen



Abbildung 1: Versuchsstand des erdgasbetriebenen Brennstoffzellen-Mikro-KWK-Gerätes „BlueGEN“ der Firma Ceramic Fuel Cells GmbH. Hersteller-Angaben: elektrische Leistung $P_{el, Export}$ 500 - 1500 W, thermische Leistung $\Phi_{th, Export}$ 300 - 540 W. Heizungslabor der Fachhochschule Köln am Institut für Technische Gebäudeausrüstung.

dieses Brennstoffzellen-Gerätes wird in Abbildung 2 wiedergegeben.

Unterhalb des Brennstoffzellenstapels befinden sich der Wärmetauscher (Luft und Brennstoff), der Dampfgenerator sowie der Start- und Nachbrenner. 51 Lagen mit insgesamt 204 Zellen (Festoxid-Brennstoffzellen) bilden den Brennstoffzellenstapel, der bei ungefähr 750°C betrieben wird. Dabei durchläuft der zugeführte Brennstoff die folgenden Prozessschritte: Entschwefelung, Vorreformierung und Dampfzufuhr, anodenseitige Methanreformierung in Wasserstoff und Kohlenstoffdioxid und dann anodenseitige Reaktion mit Sauerstoffionen, wobei elektrische Energie, Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid (Abgas) entstehen. Die thermische Energie im Abgas wird über den Abgas-Wasser-Wärmetauscher und das daran angeschlossene Wassersystem nutzbar gemacht. Gelingt es, den im Abgas enthaltenen Wasserdampf durch niedrigere Rücklauftemperaturen kondensieren zu lassen, führt dies zu einer erhöhten nutzbaren Wärmeausbeute.

Um die thermische Leistungsfähigkeit des Brennstoffzellengerätes untersuchen zu können, ist der Abgas-Wasser-Wärmetauscher über ein Wasserkreislaufsystem mit einem 680 Liter fassenden Pufferspeicher verbunden. Die thermische Leistung des Brennstoffzellengerätes wird dabei mit Hilfe von Pufferspeicher-Ladevorgängen (Vorlaufanschluss oben, Rücklaufanschluss unten) untersucht. Bei der in der Brennstoffzelle erzeugten elektrischen Energie handelt es sich um Gleichstrom, der anschließend über einen im Gerät integrierten Wechselrichter in Wechselstrom umgewandelt und exportiert wird. Eine wei-

tere Beschreibung der Funktionsweise dieser Brennstoffzelle ist [5] zu entnehmen.

Elektrische Leistung $P_{el, Export}$ des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes

Während des Forschungsvorhabens kamen verschiedene Brennstoffzellenstapel zum Einsatz. Abbildung 3 zeigt die Messdaten eines neu installierten Brennstoffzellenstapels, der nach einer Laufzeit des Mikro-KWK-Gerätes von ungefähr 9800 Stunden zum Einsatz kam.

Die exportierte elektrische Leistung $P_{el, Export}$ wurde dabei konstant auf 1500 W eingestellt. Zu Beginn verbrauchte die Brennstoffzelle für die Produktion von 1500 W elektrischer Leistung rund 2500 W Erdgas mit einem elektrischen Wirkungsgrad von ungefähr 60% (siehe unten aufgeführte Berechnung). Um die eingestellte elektrische Leistung von 1500 W beizubehalten, stieg der Gasverbrauch nach ca. 2000 Betriebsstunden des Brennstoffzellenstapels aufgrund der Degradation an. Nach 6000 Betriebsstunden des Brennstoffzellenstapels betrug der Gasverbrauch bereits 2670 W. Der elektrische Wirkungsgrad fiel dadurch auf 56%.

Berechnung des elektrischen Wirkungsgrades η_{el} des Gerätes:

$$\eta_{el} = \frac{P_{el, Export}}{\dot{V}_{Gas} * H_{i, gas}} = \frac{P_{el, Export}}{\dot{Q}_{Gas}}$$

mit

$P_{el, Export}$: exportierte elektrische Leistung (Wechselstrom) in das öffentliche Netz

\dot{V}_{Gas} : Erdgas-Volumenstrom (Normbedingungen)

$H_{i, Gas}$: Heizwert des Erdgases
 $\approx 9,1 \text{ kWh/m}^3$ (Normbedingungen)
 \dot{Q}_{Gas} : Brennstoffeinsatz

Der elektrische Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstapels entwickelte sich folgendermaßen von der ersten Betriebsstunde bei „A“ bis zur letzten Betriebsstunde bei „B“:

$$\eta_{el, A} = \frac{1500 \text{ W}}{2500 \text{ W}} = 0,6 \text{ oder } 60\%$$

$$\eta_{el, B} = \frac{1500 \text{ W}}{2670 \text{ W}} = 0,56 \text{ oder } 56\%$$

Abbildung 4 zeigt einen weiteren Brennstoffzellenstapel, der ungefähr 3000 Stunden betrieben und getestet wurde (Einbau in das KWK-Gerät bei A, Ausbau bei B).

Bei dieser Versuchsreihe wurde schwerpunktmäßig das Teillastverhalten des Brennstoffzellengerätes für die folgenden elektrischen Leistungen $P_{el, Export}$ untersucht: 100 W; 300 W; 500 W; 700 W; 900 W; 1000 W; 1100 W und 1300 W.

Für den in diesem Zeitabschnitt installierten Brennstoffzellenstapel waren diese Tests mit sehr viel Stress verbunden, so dass ein Anstieg im Gasverbrauch für den konstanten Export von 1500 W bereits nach 700 Betriebsstunden des Brennstoffzellenstapels zu verzeichnen war. Am Ende der Betriebszeit benötigte der Brennstoffzellenstapel 2780 W Gaszufuhr um eine elektrische Leistung $P_{el, Export}$ von 1500 W abzugeben; dies entspricht dann einem Wirkungsgrad von 54%. Die Wirkungsgrad-Minderung des Brennstoffzellenstapels war in diesem Fall aufgrund der Degradation in Verbindung mit den verschiedenen Teillast-Stufen deutlich schneller und ausgeprägter als die in Abbildung 3 beschriebene.

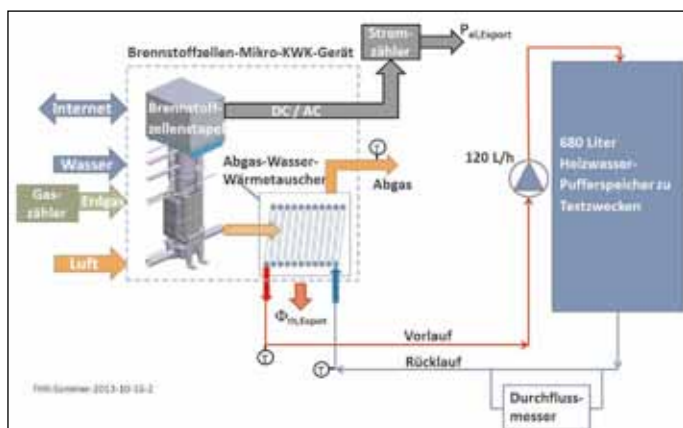


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus aus Abbildung 1. Das Brennstoffzellen-KWK-Gerät wurde am 10. Oktober 2011 im Heizungslabor in Betrieb genommen. Mittlerweile läuft die Anlage seit mehr als 16000 Betriebsstunden, in denen der Brennstoffzellenstapel zu Testzwecken mehrfach ausgetauscht wurde. Weiterführende Angaben zu diesem KWK-Gerät können in [5] gefunden werden.

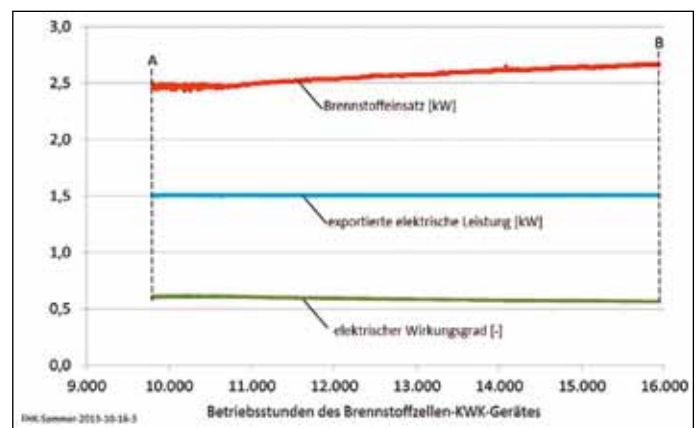


Abbildung 3: Zeitlicher Verlauf ausgewählter Betriebsdaten des Brennstoffzellengerätes mit einem neu installierten Brennstoffzellenstapel, der bei „A“ in Betrieb genommen und bei „B“ ausgewechselt wurde. Experimentelle Daten wurden durch das in dem KWK-Gerät integrierte Management-System erfasst und vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

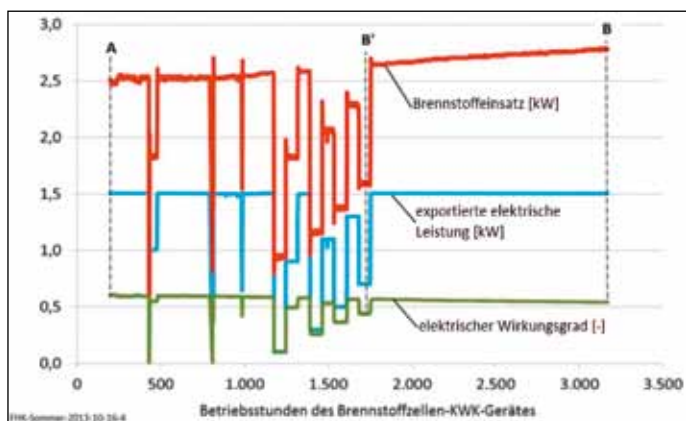


Abbildung 4: Zeitlicher Verlauf ausgewählter Betriebsdaten des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes mit dem ersten eingebauten Brennstoffzellenstapel, der bei Punkt „A“ eingebaut und bei Punkt „B“ außer Betrieb gesetzt wurde. Experimentelle Daten wurden durch das in dem KWK-Gerät integrierte Management-System erfasst und vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

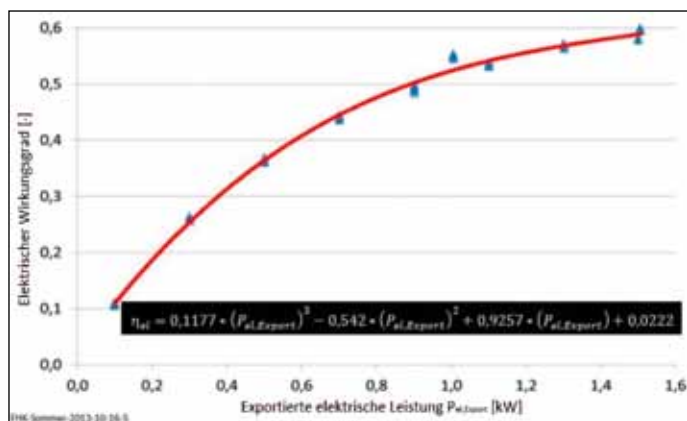


Abbildung 5: Elektrischer Wirkungsgrad des Mikro-KWK-Gerätes über der exportierten elektrischen Leistung $P_{el, Export}$ für den Bereich „A“ bis „B“ in Abbildung 4. Experimentelle Daten wurden durch das in dem KWK-Gerät integrierte Management-System erfasst und vom Hersteller zur Verfügung gestellt.

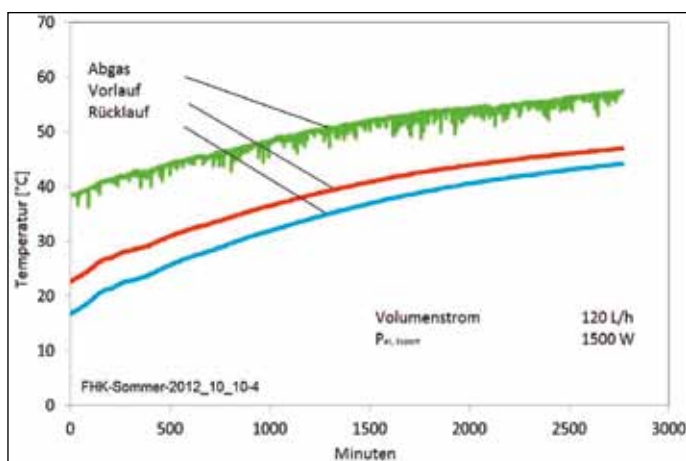


Abbildung 6: Vorlauf-, Rücklauf- und Abgastemperaturen über der Speicherladezeit. Brennstoffeinsatz für das Mikro-KWK-Gerät: 2600 W.

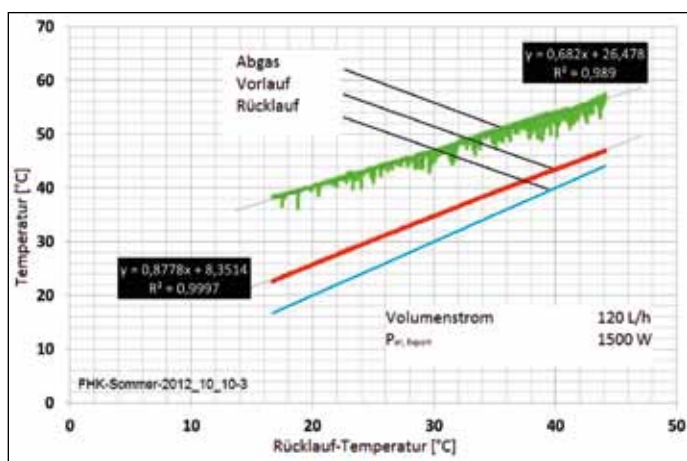


Abbildung 7: Temperaturen aus Abbildung 6 aufgetragen über der Rücklauf-Temperatur.

Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang zwischen dem elektrischen Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstapels und der abgegebenen elektrischen Leistung $P_{el, Export}$ für den Betriebsabschnitt „A“ bis „B“ des KWK-Gerätes, siehe Abbildung 4.

Je höher die exportierte elektrische Leistung $P_{el, Export}$ des KWK-Gerätes, umso höher ist der elektrische Wirkungsgrad des Brennstoffzellenstapels.

Um einen hohen elektrischen Wirkungsgrad zu erzielen und Stress für die Brennstoffzellen zu vermeiden, sollte dieses KWK-Gerät daher möglichst immer konstant bei einer elektrischen Leistungsabgabe von 1500 W betrieben werden.

Thermische Leistung $\Phi_{th, Export}$ des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes

Die thermische Leistung des Brennstoffzellengerätes wurde bei einer gleichzeitigen

elektrischen Leistungsabgabe von $P_{el, Export} = 1500$ W (höchster elektrischer Wirkungsgrad) untersucht. Abbildung 2 zeigt die Lage der Temperaturfühler und des Volumenstrom-Messgerätes im Wasserkreislauf zwischen dem Abgas-Wasser-Wärmetauscher des Brennstoffzellengerätes und dem Heizwasser-Pufferspeicher. Bei diesen Untersuchungen wurde der Pufferspeicher immer bei einem Volumenstrom von 120 Litern pro Stunde (Herstellerempfehlung) geladen, was im Rahmen der Tests auch zu genügend langen thermischen Ladevorgängen führt.

In Abbildung 6 werden die Vorlauf-, Rücklauf- und Abgastemperaturen über der Speicherladezeit dargestellt.

Das Brennstoffzellen-KWK-Gerät erzeugt heizwasserseitig eine Temperaturdifferenz von 6 K bis 2 K zwischen Vorlauf und Rücklauf. Dabei werden die höheren Temperaturdifferenzen bei niedrigen Rücklauftempe-

raturen erzielt. Unter diesen eingestellten Testbedingungen endet die von dem Brennstoffzellengerät erzeugte Vorlauf-Temperatur bei ca. 47°C. Ab diesem Zeitpunkt sind keine weiteren Veränderungen mehr sichtbar, da die thermische Leistung $\Phi_{th, Export}$ des Mikro-KWK-Gerätes nun mehr den Wärmeverlusten des angeschlossenen Heizwassersystems entspricht.

Trägt man die Ergebnisse aus Abbildung 6 über der Speicher-Rücklauf-Temperatur auf, so lässt sich eine einfache lineare Abhängigkeit der Vorlauf-Temperatur von der Rücklauf-Temperatur bei diesem Brennstoffzellen-KWK-Gerät nachweisen, wie in Abbildung 7 erkennbar.

In Abbildung 8 wird deutlich, dass geringe Rücklauf-Temperaturen zu einer höheren thermischen Leistung dieses Brennstoffzellen-KWK-Gerätes führen.

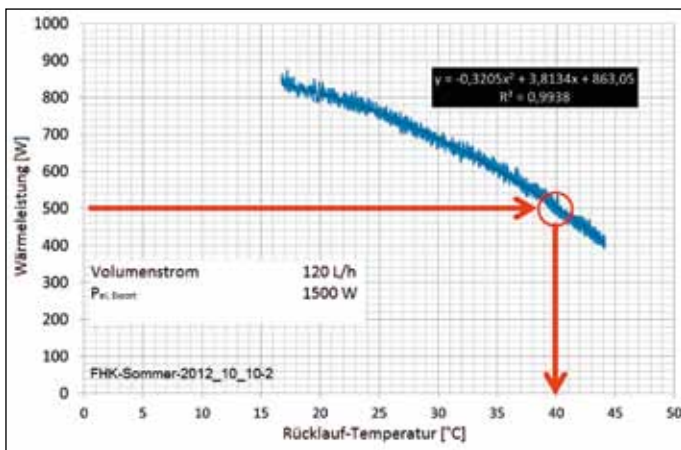


Abbildung 8: Thermische Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes $\Phi_{th, Export}$ in Abhängigkeit von der Heizwasser-Rücklauf-Temperatur. Die Ergebnisse wurden aus Abbildung 6 abgeleitet.

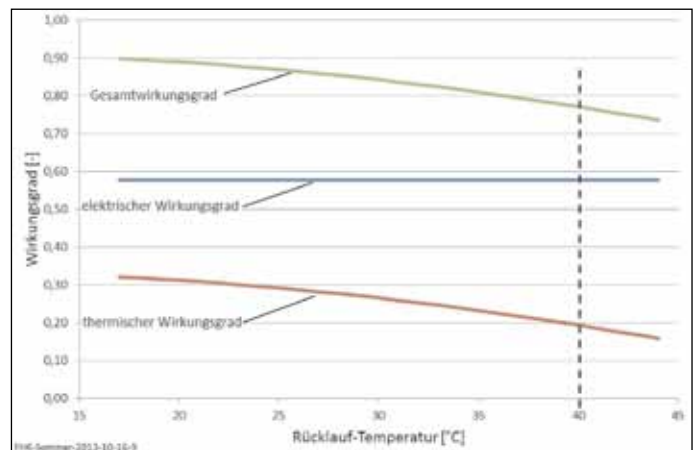


Abbildung 9: Elektrischer, thermischer und Gesamtwirkungsgrad des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes in Abhängigkeit von der Heizwasser-Rücklauf-Temperatur.

Insgesamt betrachtet liegt die exportierte thermische Leistung zwischen etwas über 800 W und 400 W. So zum Beispiel müsste für eine thermische Leistung $\Phi_{th, Export}$ von 500 W die Heizwasser-Rücklauf-Temperatur bei 40 °C liegen.

Der thermische Wirkungsgrad η_{th} kann auf dieselbe Weise wie der elektrische ermittelt werden:

$$\eta_{th} = \frac{\Phi_{th, Export}}{\dot{V}_{Gas} \cdot H_{i, Gas}}$$

$$= \frac{\Phi_{th, Export}}{\dot{Q}_{Gas}}$$

mit

- $\Phi_{th, Export}$: thermische Leistung der Anlage
- \dot{V}_{Gas} : Erdgas-Volumenstrom (Normbedingungen)
- $H_{i, Gas}$: Heizwert des Erdgases $\approx 9,1 \text{ kWh/m}^3$ (Normbedingungen)
- \dot{Q}_{Gas} : Brennstoffeinsatz

Für das in Abbildung 8 markierte Beispiel bedeutet dies:

$$\eta_{th} = \frac{500 \text{ W}}{2600 \text{ W}} = 0,19 \text{ oder } 19\%$$

In Abbildung 9 wird die Abhängigkeit der verschiedenen Wirkungsgrade des KWK-Gerätes von der Heizwasser-Rücklauf-Temperatur gezeigt.

Wie zu erwarten ist, sinkt der thermische Wirkungsgrad mit ansteigender Heizwasser-Rücklauf-Temperatur. Da der Abgas-Wasser-Wärmeübertrager zur Auskopplung der KWK-Wärme rückwirkungsfrei am Ende der Brennstoffzellen-Prozesskette angeordnet ist, wird der elektrische Wirkungsgrad dieses Gerätes von der Heizwasser-Rücklauf-Temperatur nicht beeinflusst. Jedoch wirkt sich der Einfluss der Heizwasser-Rücklauf-Temperatur auf den Gesamtwirkungsgrad

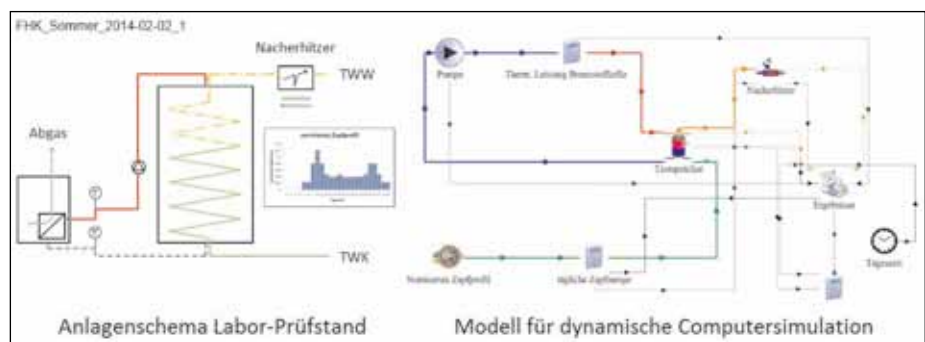


Abbildung 10: Zugrunde gelegte Versuchsanordnungen zur Analyse der Trinkwassererwärmung mit Brennstoffzellen-KWK-Gerät, Heizwasser-Pufferspeicher mit innenliegendem Trinkwasser-Wärmeübertrager und nachgeschaltetem elektrischen Durchlauferhitzer als Backup. Es handelt sich um den Test-Pufferspeicher aus den Abbildungen 1 und 2.

des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes aus, da sich dieser durch die Addition der Einzelwirkungsgrade ergibt.

So ist der Gesamtwirkungsgrad dieses Brennstoffzellen-KWK-Gerätes für das markierte Beispiel der Abbildungen 8 und 9 wie folgt:

$$\eta_{tot} = \eta_{el} + \eta_{th} = \frac{1500 \text{ W}}{2600 \text{ W}} + \frac{500 \text{ W}}{2600 \text{ W}} = 0,58 + 0,19 = 0,77 \text{ oder } 77\%$$

Trinkwassererwärmung mit dem Brennstoffzellen-KWK-Gerät

Eine Trinkwassererwärmung mit dem gebäudebezogenen Brennstoffzellen-KWK-Gerät wird sowohl experimentell als auch mit Hilfe der dynamischen Computersimulation untersucht. Abbildung 10 zeigt hierfür in schematischer Form die Versuchsanordnungen.

Bei den nachfolgend gezeigten ersten Versuchen kommt der Heizwasser-Pufferspeicher der Abbildungen 1 und 2, allerdings mit verbesserter Wärmedämmung, zum Einsatz.

Dieser Speicher ist mit einem innen, vertikal angeordneten Trinkwasser-Wärmeübertrager, wie in Abbildung 10 links zu sehen, bestückt. Zur Sicherstellung einer bestimmten Zapftemperatur, im vorliegenden Fall 45°C, befindet sich in der Warmwasser-Zapfleitung in Fließrichtung hinter dem Pufferspeicher ein elektrischer Durchlauferhitzer als Backup. Der Versuchsstand ist außerdem mit einer programmierbaren Zapfeinrichtung ausgestattet, um so verschieden hohe Warmwasserverbräuche untersuchen zu können. Der hier für eine vierköpfige Familie zugrunde gelegte Tagesgang des Warmwasserverbrauchs ist zusammen mit den Ergebnissen den Abbildungen 12 bis 14 zu entnehmen. Das in Abbildung 10 auf der rechten Seite in schematischer Form gezeigte Simulationsmodell berücksichtigt alle zuvor genannten relevanten Anlagenkomponenten für die dynamische Computersimulation, wobei die von der Rücklauf-Temperatur abhängige exportierte thermische Leistung $\Phi_{th, Export}$ des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes den Abbildungen 7 und 8 entnommen wird.

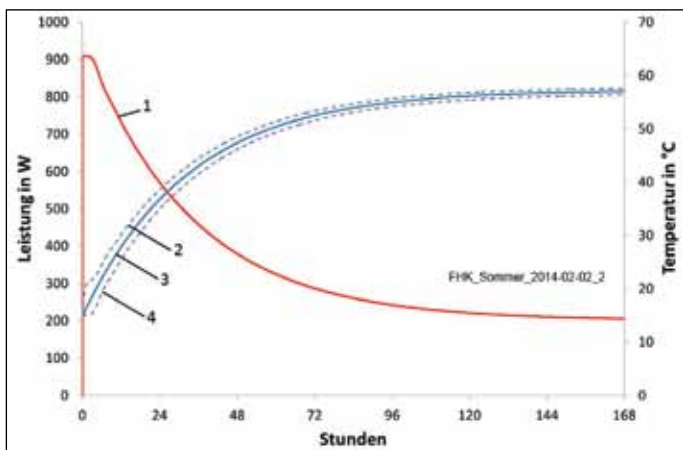


Abbildung 11: Zusammenspiel zwischen der exportierten thermischen Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes und den Heizwassertemperaturen im 680-Liter-Pufferspeicher (nach Vollenladung) für den Fall „kein Warmwasserverbrauch (Urlaubszeit)“:

- 1: Exportierte thermische Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes in W
- 2: Heizwasser-Pufferspeichertemperatur OBEN in °C
- 3: Heizwasser-Pufferspeichertemperatur MITTELWERT in °C
- 4: Heizwasser-Pufferspeichertemperatur UNTEN in °C

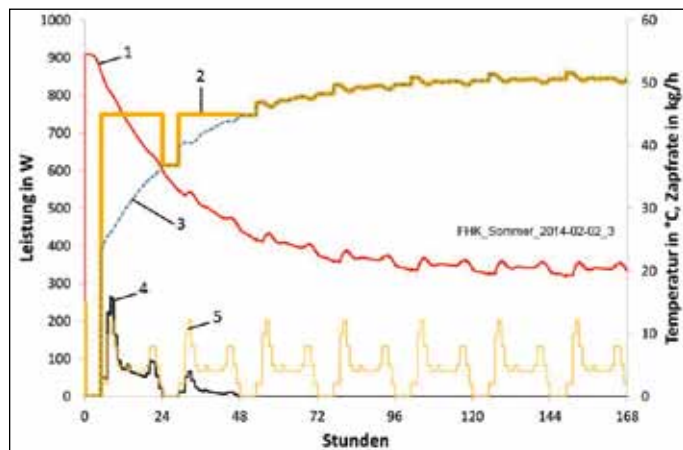


Abbildung 12: Zusammenspiel zwischen der exportierten thermischen Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes, den Heizwassertemperaturen im 680-Liter-Pufferspeicher (nach Vollenladung), den verschiedenen Warmwasser-Zapftemperaturen und der elektrischen Leistung des nachgeschalteten Durchlauferhitzers für den Fall „Geringer Warmwasserverbrauch“:

- 1: Exportierte thermische Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes in W
- 2: Warmwasser-Zapftemperatur hinter dem elektrischen Nacherhitzer in °C
- 3: Warmwasser-Temperatur vor dem elektrischen Nacherhitzer in °C
- 4: Erforderliche elektrische Leistung in W des nachgeschalteten Durchlauferhitzers für die Gewährleistung einer minimalen Zapftemperatur von 45 °C
- 5: Tagesgang der Warmwasser-Zapfmenge in kg/h

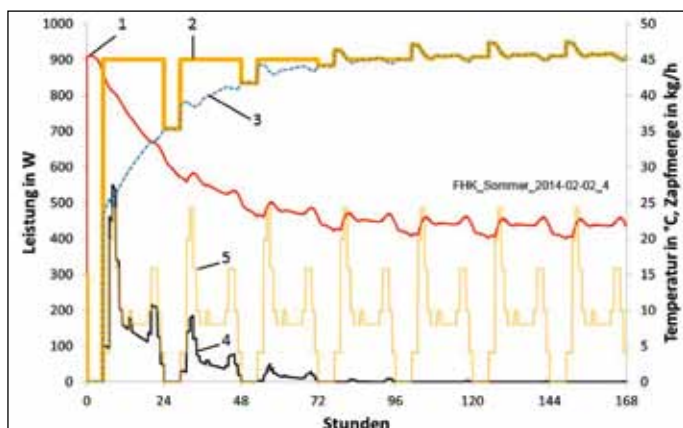


Abbildung 13: Zusammenspiel zwischen der exportierten thermischen Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes, den Heizwassertemperaturen des 680-Liter-Pufferspeichers (nach Vollenladung) und dem nachgeschalteten elektrischen Durchlauferhitzer für den Fall „Normaler Warmwasserverbrauch“. Legende siehe Abbildung 12.

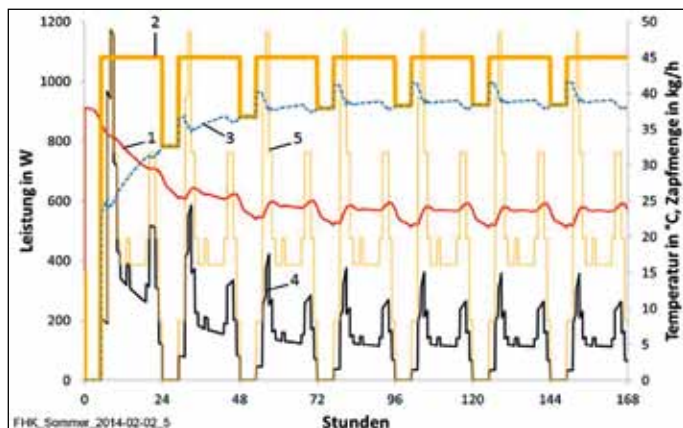


Abbildung 14: Zusammenspiel zwischen der exportierten thermischen Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes, den Heizwassertemperaturen des 680-Liter-Pufferspeichers (nach Vollenladung) und dem nachgeschalteten elektrischen Durchlauferhitzer für den Fall „Hoher Warmwasserverbrauch“. Legende siehe Abbildung 12.

Nachfolgend werden einige Ergebnisse zur Trinkwassererwärmung mit dem Brennstoffzellen-KWK-Gerät auf Basis der dynamischen Computersimulation wiedergegeben. Abbildung 11 zeigt den zeitlichen Verlauf für das Zusammenspiel zwischen der exportierten thermischen Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes und den Heizwassertemperaturen im Pufferspeicher, wenn beginnend mit einer Wassertemperatur von 15 °C nach Vollenladung sieben Tage lang kein Trinkwarmwasser gezapft wird (Urlaubszeit).

Während dieser Zeit steigt die Heizwassertemperatur im Pufferspeicher bis auf annähernd 60 °C an, wobei gleichzeitig die

thermische Leistung des KWK-Gerätes, ausgehend von rund 900 W bis auf circa 200 W, sinkt. Nach sieben Tagen befindet sich dieser Prozess in Beharrung, weil die Brennstoffzelle nur noch die Wärme exportieren kann, die zur Deckung der Wärmeverluste des Speichersystems benötigt wird. Hinweis: Würde die Dämmung des Speichersystems weiter verbessert werden, dann träte diese Beharrung bei einer noch höheren Speichertemperatur ein.

Abbildung 12 zeigt das zeitliche Zusammenspiel zwischen der exportierten thermischen Leistung des Brennstoffzellen-

KWK-Gerätes, den Temperaturen im Heizwasser-Pufferspeicher, den verschiedenen Warmwasser-Zapftemperaturen und der elektrischen Leistung des nachgeschalteten Durchlauferhitzers, wenn täglich 100 Liter Warmwasser gezapft werden.

Nur an den ersten zwei Tagen nach Vollenladung des Pufferspeichers ist eine elektrische Nachheizung erforderlich, um die Zapftemperatur von 45 °C zu garantieren. Danach steigt die Zapftemperatur allein durch das Brennstoffzellen-KWK-Gerät als Wärmequelle auf über 45 °C an, um dann nach sieben Tagen mit rund 50 °C im ein-

geschwungenen Zustand zu sein. Dies ist auf die hohe Heizwassertemperatur im Pufferspeicher zurückzuführen, die allerdings auch dazu führt, dass die Brennstoffzelle wegen der hohen Rücklauftemperaturen im eingeschwungenen Zustand nur noch rund 350 W thermische Leistung liefert.

Abbildung 13 zeigt das schon zuvor in Abbildung 12 behandelte zeitliche Zusammenspiel, jedoch jetzt mit einer täglichen Warmwasser-Zapfmenge von 200 Litern.

Wieder stellt sich sieben Tage nach Vollentladung der eingeschwungene Zustand ein, bei dem das Brennstoffzellen-KWK-Gerät allein die Trinkwarmwasser-Erwärmung bei 45°C aufrecht halten kann. Dabei ist die exportierte thermische Leistung des Brennstoffzellen-KWK-Gerätes mit rund 450 W höher als zuvor bei der täglichen Zapfmenge von 100 Liter. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit steigendem Warmwasserverbrauch die Heizwassertemperatur im Pufferspeicher sinkt. Wird die tägliche Warmwasserzapfmenge gegenüber Abbildung 13 auf 400 Liter verdoppelt, steigt die thermische Leistung des KWK-Gerätes auf 550 W, siehe Abbildung 14 im eingeschwungenen Zustand (sieben Tage nach Vollentladung des Pufferspeichers). Dieser positive Effekt hat allerdings eine elektrische Nachheizung der Warmwasser-Zapfmenge zur Folge.

Zusammenfassung

Das Brennstoffzellen-KWK-Gerät „BlueGEN“ der Firma Ceramic Fuel Cells GmbH, das im Heizungslabor der Fachhochschule Köln am Institut für Technische Gebäudeausrüstung untersucht wurde, erreichte einen heizwertbezogenen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60% bei einer elektrischen Leistung $P_{el, Export}$ von 1500 W. Dieser Wirkungsgrad ist für diese Technologie und Leistungsklasse außergewöhnlich hoch. Im Laufe der Zeit reduziert der Degradationsvorgang innerhalb des Brennstoffzellenstapels jedoch den Wirkungsgrad. Wenn dieses Brennstoffzellen-KWK-Gerät eine konstante elektrische Leistung $P_{el, Export}$ von 1500 W exportiert, sinkt der elektrische Wirkungsgrad über 6000 Betriebsstunden von anfänglichen 60% auf 56%. Wird das Gerät auch im elektrischen Teillastbereich betrieben, so führt dies zu einer weiteren Minderung des elektrischen Wirkungsgrades, da hierdurch der Brennstoffzellenstapel neben der Degradation auch noch Stress erfährt.

Die thermische Leistung $\Phi_{th, Export}$ des hier untersuchten Brennstoffzellen-KWK-Gerätes ist abhängig von der Rücklauftemperatur des angeschlossenen Heizwasserkreislaufes. Je

niedriger die Rücklauftemperatur umso höher die thermische Leistung und damit auch der thermische Wirkungsgrad.

Eine eingestellte elektrische Leistung von 1500 W (höchster elektrischer Wirkungsgrad) und eine für den Praxisfall anzunehmende heizwasserseitige Rücklauftemperatur von 35°C führen zu einem Gesamtwirkungsgrad von 81% (H_i) und einer Heizwasser-Vorlauftemperatur von 39°C. Unter diesen Umständen produziert die Anlage 36 kWh Strom am Tag oder 13140 kWh pro Jahr bei einer gleichzeitig nutzbaren Wärmeauskopplung von 14,5 kWh pro Tag oder 5290 kWh pro Jahr.

Erste Detailanalysen zur Trinkwassererwärmung mit dem gebäudebezogenen Brennstoffzellen-KWK-Gerät zeigen deutlich Optimierungspotential bei Wahl und Größe zusätzlicher Anlagenkomponenten.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich beim Klimakreis Köln, der Rheinenergie AG und der FH Köln für die freundliche Unterstützung des Forschungsprojektes „Praxisnahe Betriebsanalyse eines dezentralen KWK-Brennstoffzellengeräts“.

Literatur

- [1] Forschungsprojekt (2011-2014) "Praxisnahe Betriebsanalyse eines dezentralen KWK-Brennstoffzellengerätes mit dem Ziel der Entwicklung optimaler Einsatzmöglichkeiten in Wohngebäuden und der Ermittlung anwendungsbezogener Systemkennendaten"; Projektleiter Prof. Dr. Klaus Sommer. Gefördert vom Klimakreis Köln (www.klimakreis-koeln.de), der Rheinenergie AG (www.rheinenergie.com) und der Fachhochschule Köln (www.fh-koeln.de).
- [2] Sommer, Klaus: Describing the Real Energy Efficiency of a Fuel Cell-Based Micro-CHP Unit in Residential Buildings. Presentation on ASHRAE Winter Conference in Chicago, 22. Januar 2012.
- [3] Sommer, Klaus: Thermal Performance of a Fuel Cell-Based Micro-CHP Unit for Residential Buildings. Presentation on IEA/ECBCS Annex 54, 6th Experts Meeting, Tokyo University, Japan, 9.-12. Oktober 2012.
- [4] Sommer, Klaus; Mesenhöller, Eva: Practical experience with a fuel cell unit for combined heat and power (CHP) generation on the building level. REHVA Journal, Oktober 2013.
- [5] Sommer, Klaus: Mikro-KWK-Anwendungen für 1- und 2-Familienhäuser für mehr Energieeffizienz, BHKs Almanach 2012.
- [6] Sommer, Klaus: Moderne Heiztechnik unter Berücksichtigung der Brennstoffzelle. VDI-TGA-Vortrag. Köln, 24.01.2013.
- [7] Sommer, Klaus; Mesenhöller, Eva: Praktische Erfahrungen mit einem Brennstoffzellen-Mikro-KWK-Gerät für ein Wohngebäude. HLH, Dezember 2013.

Wasserenthärtung mit dem JUDO i-soft TGA

Stellt sich fast von selbst auf - und ein.



Der JUDO i-soft TGA ist der einzige vollautomatische Wasserenthärter für die Gebäudetechnik – und durch seinen modularen Aufbau besonders leicht zu montieren. Weitere Vorteile:

- ◆ schnelle Inbetriebnahme durch automatische Verschnittwasser-einstellung
- ◆ Wunschwasser per Knopfdruck
- ◆ mehr Hygiene durch stagnationsfreien Betrieb
- ◆ Sicherheit durch DVGW-Prüfzeichen
- ◆ Schutz von Rohren, Armaturen und Geräten



judo.eu



JUDO Wasseraufbereitung GmbH
 Hohreuschstraße 39-41 · D-71364 Winnenden
 Tel. 07195 692-0 · Fax 07195 692-110
 info@judo.eu