

# Validierung eines Brennstoffzellen-Matlab- Modells anhand einer NT-PEM- Brennstoffzelle

Stefanie Balzarek  
Fachhochschule Bielefeld  
Bielefeld, Deutschland  
stefanie.balzarek@fh-bielefeld.de

Kersten Kröger  
Fachhochschule Bielefeld  
Bielefeld, Deutschland  
kersten.kroeger@fh-bielefeld.de

Jens Haubrock  
Fachhochschule Bielefeld  
Bielefeld, Deutschland  
jens.haubrock@fh-bielefeld.de

**Zusammenfassung**—An der Fachhochschule Bielefeld wird im Rahmen des Forschungsprojektes „Optimierung von Brennstoffzellenheizgeräten als Komponente einer zukünftigen Gebäudeenergieversorgung in Smart Cities“ ein PEM-Brennstoffzellensystem mit integriertem BHKW-Simulator im skalierten Maßstab betrieben. Gefördert wurde der Langzeit-Teststand für PEM-BZ von dem Unternehmen „inhouse engineering GmbH“ aus Mitteln des Landes NRW (Programm FH Extra). Nach erfolgreicher Inbetriebnahme des Systems, ersten Probemessungen und dem Erstellen von Referenzkennlinien bei unterschiedlichen Betriebstemperaturen ist ein weiterer wichtiger Schritt innerhalb des Projektes die Modellbildung. Das Modell wird mit Hilfe von geeigneten Messungen verifiziert. Langfristig ist es das Ziel, eine Optimierung der Betriebsführung von Brennstoffzellenheizgeräten in Kombination mit unterschiedlichen Peripheriekomponenten wie z.B. einem thermischen Speicher und elektrischen Verbrauchern zu erreichen.

**Index Terms**—Brennstoffzelle, Mini-/Mikro-BHKW, stationäre Brennstoffzellensysteme, NT-PEM, KWK

## I. EINLEITUNG

Die Struktur der Energieversorgung befindet sich seit einigen Jahren in einem starken Wandel. Durch die vermehrte Einspeisung volatiler Erzeuger, wie beispielsweise Photovoltaik- und Windkraftanlagen, und dem zeitgleichen Ausstieg aus der Kernenergie (Großkraftwerke) ergeben sich neue Herausforderungen und Anforderungen an das zukünftige Energiesystem. Neben den bekannten Kriterien wie Effizienz, Verfügbarkeit und Versorgungssicherheit werden in Zukunft die Flexibilität eines Systems und die Nachhaltigkeit des eingesetzten Primärenergieträgers immer wichtiger. Diese neuen Anforderungen werden zu einer verstärkten Nachfrage an dezentralen Energien führen.[1]

Für die genannten Zwecke eignen sich unter anderem Kraft-Wärme- Kopplungs- Anlagen (KWK). Durch die zeitgleiche Erzeugung von Strom und Wärme kann der Brennstoffausnutzungsgrad gegenüber der alleinigen Stromerzeugung erhöht werden. KWK-Anlagen verbessern die wirtschaftliche Situation von dezentralen Anlagen, da sich bei ihrem Einsatz sogar die kostspieligen dezentralen Technologien für die Stromerzeugung rentieren. Als Beispiel dieser Technologien gilt die Brennstoffzelle.[1]

Die Brennstoffzelle wandelt chemisch gebundene Energie direkt in elektrische Arbeit um. Auf Grund dessen weisen Brennstoffzellen hohe Wirkungsgrade auf und eignen sich

somit besonders für kleine, dezentrale Energiesysteme. Zusätzlich eignet sich das sehr gute Teillastverhalten für den Einsatz in zukünftigen 'smart grids'. Zur Bereitstellung von Reserve- und Spitzenlast sind neben Gasturbinenkraftwerken auch flexible KWK-Anlagen nötig. Auch hier eignet sich ein dezentrales BZ-System. Über ein entsprechendes Lastmanagementsystem könnten diese Anlagen zentral gesteuert werden und auf Anforderung des Netzbetreibers kurzfristig zusätzlich Strom produzieren.[1]

## II. BESCHREIBUNG DES TESTSTANDES

### A. PEM Brennstoffzellen

Die Polymerelektrolyt- Brennstoffzelle (PEMBZ) eignet sich für stationäre Kleinanlagen bis hin zu Blockheizkraftwerken (0,5 bis 250 kW) [2].

Die PEMBZ kann in unterschiedlichen Temperaturbereichen betrieben werden. Ein Niedertemperatursystem arbeitet bei 40 °C bis 80 °C. Bei Hochtemperatursystemen (HT-PEM) liegt der Arbeitsbereich bei einer Temperatur von 130 °C bis 200 °C. Innerhalb des Projektes wird eine NT-PEM-BZ verwendet.[3]

Die schematische Darstellung und die Reaktionsabläufe einer PEMBZ sind in Abbildung 1 dargestellt. Die Zelle besteht aus zwei Elektroden, der Anode und der Kathode.

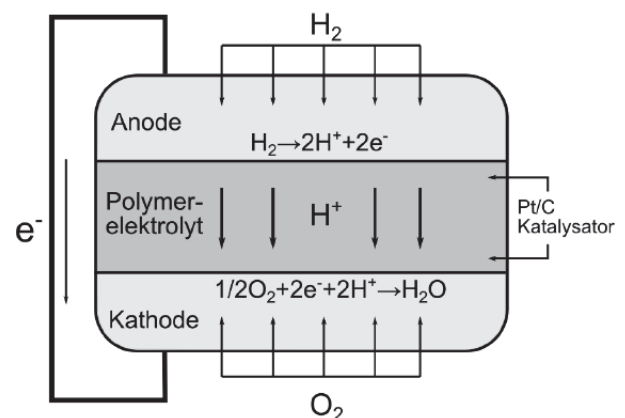


Abbildung 1. Schematische Darstellung einer PEMFC[4]

Diese werden mit einer dünnen Edelmetallschicht, meist Platin oder einer Platinlegierung, überzogen und dienen so als

Katalysator. Die Elektroden werden durch den Elektrolyten, eine ionendurchlässige Polymermembran, getrennt. Die Membran ist etwa  $20 \mu\text{m} - 200 \mu\text{m}$  dick und gasundurchlässig; somit wird eine direkte Reaktion von Wasser- und Sauerstoff verhindert. Des Weiteren ist die Membran elektrisch isolierend, sodass keine Elektronen sondern nur Ionen hindurch gelangen können. Diese „Sandwich“-Struktur wird als MEA (‘membrane electrode assembly’) bezeichnet und hat eine Dicke von unter einem Millimeter. Der Brennstoff (Wasserstoff) wird an der Anode zugeführt, das Oxidans (Sauerstoff, Luft) an der Kathode. An der Anode oxidiert der Wasserstoff und es entstehen Protonen (Wasserstoff-Ionen), welche durch die Elektrolytmembran transportiert werden, und Elektronen, die auf Grund der vorhandenen Potentialdifferenz über den äußeren Stromkreis zur Kathode fließen. Auf der Seite der Kathode rekombinieren die Sauerstoff- Ionen, die Elektronen und die  $\text{H}^+$  - Ionen, es entsteht Wasser.[4], [5]

Das Betriebsverhalten einer Brennstoffzelle erklärt sich anhand der Spannungs- Stromdichte- Kennlinie (U-J- Kennlinie). Eine typische Kennlinie ist in Abbildung 2 dargestellt. Eine ideale Brennstoffzelle könnte jeden beliebigen Strombetrag bereitstellen (solange genügend Brennstoff zur Verfügung steht), während die durch die Thermodynamik bestimmte Spannung konstant bleibt. In der Praxis ist die Zellspannung geringer als die thermoneutrale Spannung einer idealen Brennstoffzelle. Die Spannung ist nicht nur geringer als die theoretisch errechnete Spannung, sie nimmt mit steigender Stromstärke ab. Die thermoneutrale Spannung einer Zelle liegt bei 1,48 V und die reversible Klemmspannung bei 1,23 V.[4]

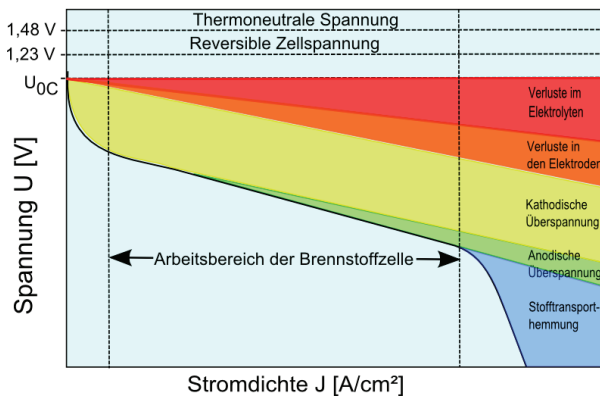


Abbildung 2. U-J-Kennlinie einer NT-PEM-Brennstoffzelle mit den einzelnen Verlustbereichen

Real wird eine Leerlaufspannung  $U_0$  von 0,9 V bis 1 V erreicht. Die Kennlinie kann in drei signifikante Bereiche eingeteilt werden. Der erste Bereich, bei geringen Stromdichten, zeichnet sich durch ein erhebliches Absinken der Zellspannung aus, welches aus Aktivierungsverlusten resultiert. Der zweite Bereich, maßgeblich durch ohmsche Verluste geprägt, zeigt bei zunehmender Stromstärke einen linear abfallenden Spannungsverlauf. Dieser Bereich kennzeichnet den Arbeitsbereich der Brennstoffzelle.[4] Im dritten Bereich zeigt sich ein starkes Absinken der Zellspannung. Verursacht wird dieser

Spannungsfall durch Stofftransporthemmungen[6].

Die PEMFC weist die höchste Leistungsdichte von allen BZ - Typen ( $300 - 1000 \text{ mW/m}^2$ ) auf. Außerdem besitzt sie eine gute Schnellstartfähigkeit und ein gutes An/Aus-Verhalten. Der teure Platinkatalysator, die ebenfalls teure Polymermembran und weitere Zusatzkomponenten erweisen sich als nachteilig. Die geringe CO- und S- Toleranz zählt ebenfalls zu den Nachteilen dieses Brennstoffzellentyps.[4]

Durch die gute Modulierbarkeit über einen weiten Arbeitsbereich in Kombination mit einer Wärmeauskopplung auf einem Niveau nahe der benötigten Nutzwärme, stellen PEM-Brennstoffzellen eine attraktive Grundlage für den Aufbau von BHKWs für Privathaushalte oder Gewerbebetriebe dar. Eine solche Anlage auf PEMBZ-Basis besteht im Wesentlichen aus drei Hauptkomponenten, dem Brennstoffzellenmodul, der Reformieranlage und dem Wechselrichter. Hinzu kommen Peripheriekomponenten wie Wärmetauscher, Befeuchter, Luftversorgung und eine Vielzahl von Sensoren und Aktoren zur Prozessüberwachung und Steuerung. Brennstoffzellen BHKWs sind vor allem im Bereich der stationären Systeme mit einer elektrischen Nennleistung von 1 kW bis 5 kW am Markt verfügbar.[7], [8]

### B. Teststand für Niedertemperaturbrennstoffzellen



Abbildung 3. Langzeit-Teststand (rechts) mit BHKW-Simulator (links)

Im Rahmen des Projektes ist an der FH Bielefeld 2013 ein Langzeit-Teststand für NT-PEM-BZ von dem Unternehmen „inhouse engineering GmbH“ angeschafft worden. Das gesamte Teststandsystem umfasst die Module Teststand und BHKW-Simulator, welche elektrisch und hydraulisch verbunden sind.

Die übergeordnete Regelung wird von einer SPS-Steuerung übernommen. Das Teststandmodul beinhaltet den PEM-BZ-Stack mit einer maximalen Leistung von  $570 \text{ W}_{el}$  und dessen Prozessgasdosierung und -konditionierung, den Primärkühlkreis sowie die elektronische Last. Der Teststand wird mit

reinem Wasserstoff betrieben, es besteht aber die Möglichkeit ein synthetisches Reformatgas- Gemisch aus Wasserstoff und Kohlendioxid zu verwenden.

Im BHKW- Modul sind der Wärmespeicher, die Wasserentsalzungsanlage, sowie der Wärmetauscher für die Wärmeabfuhr vorgesehen. Eine schematische Darstellung mit den wichtigsten Komponenten und Messstellen zeigt die Abbildung 4.[9]

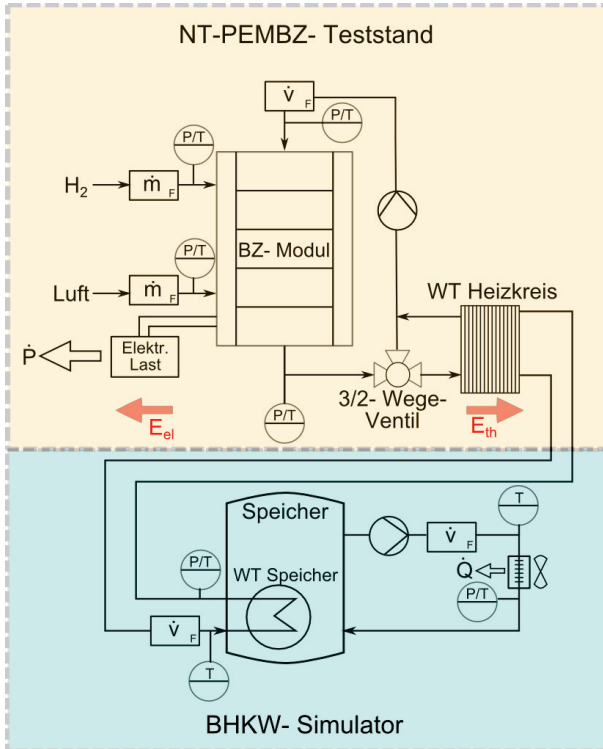


Abbildung 4. Fließschema des PEMBZ-Teststandsystems mit BHKW-Simulator

Der reine Teststandsbetrieb ermöglicht einen weitgehend von der Kühlung unabhängigen Betrieb der BZ, somit ist eine gute Charakterisierung der Zelle möglich. Durch den BHKW- Betrieb kann der Einsatz eines brennstoffzellenbasierten BHKW- Systems in einem Gebäude abgebildet werden.

### III. MATLAB-MODELL

Zur Simulation einer wärme- und stromgeführten Betriebsvariante wurde auf Basis eines mathematischen Modells eine Matlabanwendung programmiert. Als Basisdaten dienen Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK- Anlagen, welche aus den VDI- Richtlinien 4655 stammen. Bei den gegebenen Lastprofilen wird zwischen den Jahreszeiten (Übergang/ Winter/ Sommer) unterschieden. Zusätzlich gibt es noch eine Unterscheidung von Werk- und Sonntagen. Im Winter und zur Übergangszeit werden zusätzlich noch die Wetterbedingungen (heiter/ bedeckt) berücksichtigt.[10], [11]

Die entwickelte Konsolenanwendung simuliert die elektrische und thermische Leistung der BZ anhand diverser Typtage

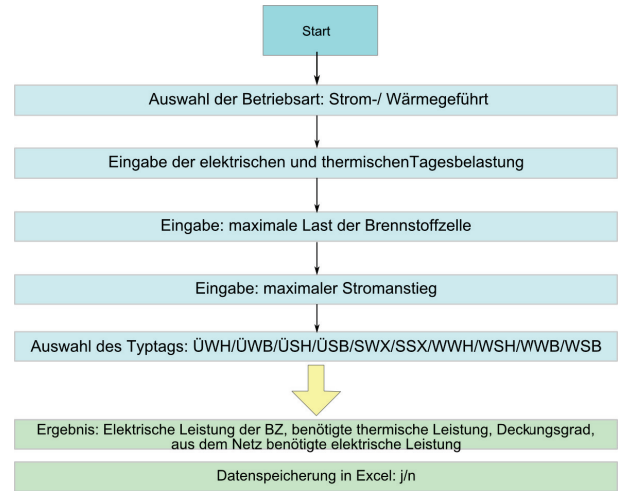


Abbildung 5. Programmablaufplan des BZ-Modells

und zeigt die benötigte thermische Leistung, den Deckungsgrad, sowie die zusätzlich aus dem Netz benötigte elektrische Leistung. Die Anwendung ist leicht bedienbar, schnell und grafisch anschaulich umgesetzt. Der Programmablauf ist in Abbildung 5 schematisch dargestellt, die Simulationsergebnisse werden exemplarisch in Abbildung 6 gezeigt.[10]

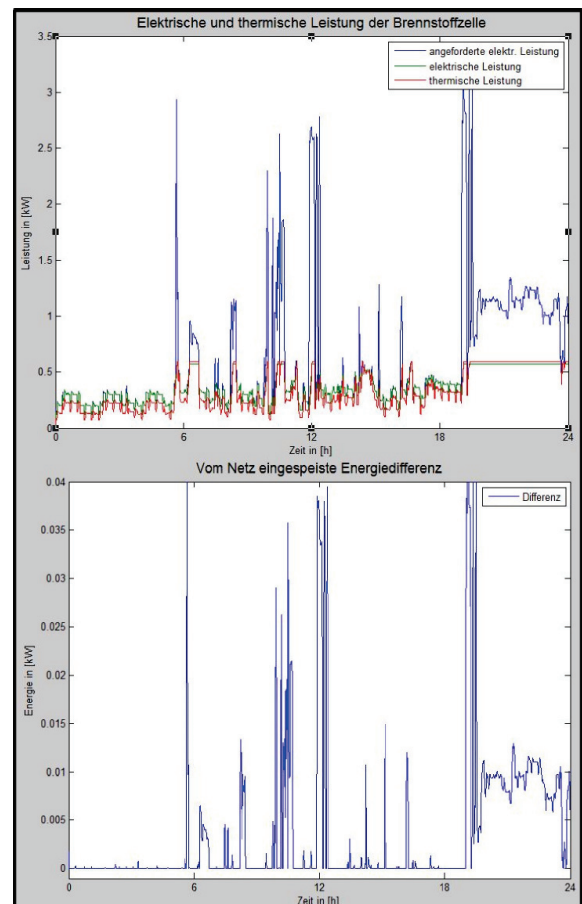


Abbildung 6. Simulationsergebnisse mit MATLAB



Zu den Einflussfaktoren zählen die elektrische Leistungsgrenze der Brennstoffzelle, sowie eine Verzögerung bei Lastwechseln. Als begrenzender Faktor des BZ- Systems erweist sich der Erdgas- Reformer, welcher in jedem Arbeitspunkt eine entsprechende Qualität und Quantität an Wasserstoff bereitstellen muss. Somit ist eine Veränderung des elektrischen Arbeitspunktes nur in wenigen Minuten möglich. Im Modell wird dies durch einen Verzögerungsfaktor berücksichtigt.[10], [12]

$$P_{el} = I_{SOLL}^2 \cdot \frac{m \cdot 1000}{A} + I_{SOLL} \cdot b \quad (1)$$

$$P_{therm} = \left\{ \begin{array}{l} \frac{R(273,15K+T)}{0,5 \cdot F} \cdot \ln \left( \frac{\frac{I}{A}}{I_{0,Kathode} \cdot p_{O_2}} \right) \\ + [U_0 - \left( \frac{I \cdot 1000}{A} + b \right)] \end{array} \right\} \cdot l \cdot n \quad (2)$$

$$I_{SOLL} = -\frac{b \cdot A}{2000 \cdot m} \pm \sqrt{\left( \frac{b \cdot A}{2000 \cdot m} \right)^2 + \frac{P_{el} \cdot A}{1000 \cdot m \cdot n}} \quad (3)$$

Zur Berechnung der elektrischen und thermischen Leistung gelten für den stromgeführten Betrieb im Betriebsbereich der Brennstoffzelle Formel (1) und (2). Die Parameter a und b sind von der Betriebstemperatur abhängig. Die nachfolgenden Ergebnisse und Messungen beziehen sich auf 60 °C.[10] Im heizwärmegeführten Betrieb ist der produzierte Strom vom Lastprofil des thermischen Speichers abhängig, somit ist der elektrische Tagesbedarf für die Berechnung nicht relevant. Die Führungsgröße, der Sollstrom, wird durch eine iterative Berechnungsformel bestimmt und zur Regelung der Speichertemperatur wird ein P-I- Regler verwendet.

#### IV. VALIDIERUNG DES MODELLS

Zur Validierung des erstellten Modells werden Messungen am vorhandenen Teststand durchgeführt. Insgesamt gibt es drei Testmessungen über jeweils acht Stunden. Dem Teststand wird der Sollstrom des zu messenden Typtages aus dem Modell übergeben. Die Messbedingungen sind bei allen drei Messungen gleich und in Tabelle 1 aufgeführt. Exemplarisch werden die Messungen für die Referenzlastprofile der folgenden Tage von 6:00 Uhr bis 14:00 Uhr durchgeführt:

- ÜWH (Übergang/Werktag/heiter)
- SWX (Sommer/Werktag)
- WSH (Winter/Sonntag/heiter)

Tabelle I  
BETRIEBSPARAMETER

Stöchiometrie Anode	1,2
Stöchiometrie Kathode	2,0
Laststrom	40 A- 146 A
Temperatur Kühlung Stackeintritt	60 °C

In Abbildung 7 werden die Ergebnisse des Modells mit den realen Messwerten verglichen. Es zeigt sich, dass das erstellte Modell die Realität abbilden kann. Große Abweichungen zwischen Modell und Messergebnissen resultieren vor allem

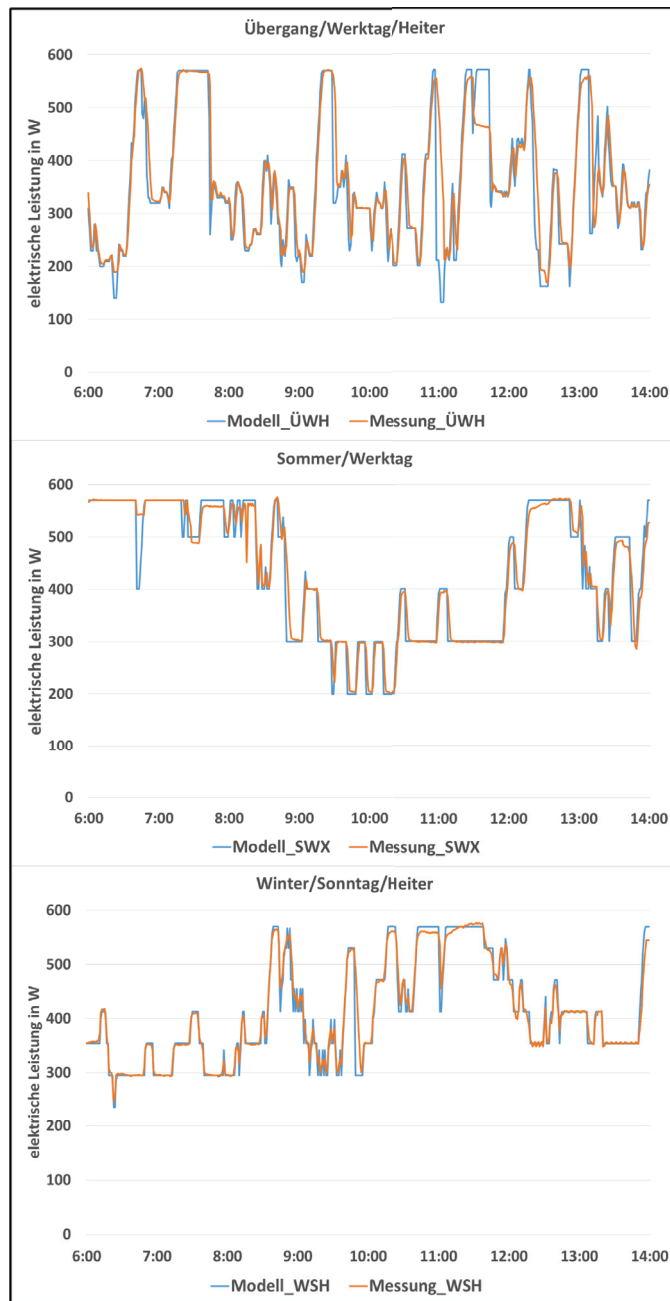


Abbildung 7. Vergleich der Messung und der Simulation

aus der Berücksichtigung des Reformers. Vor allem bei großen Lastwechseln führt dies zu einer Abweichung von Modell- und Messergebnissen. Bei einer realen Betriebsführung eines Brennstoffzellen- BHKWs würden solche starken Lastwechsel vermieden werden. Zur Validierung wird dieser Fehler nicht berücksichtigt, da die fehlende Systemdynamik allein auf den begrenzenden Faktor, den Reformer, zurückzuführen ist. Zur Fehlerberechnung wird diese Fehlerart nicht mit einbezogen. Insgesamt ergibt sich eine durchschnittliche Abweichung zum erwarteten Modellwert von knapp 3 %. Es zeigt sich, dass der Teststand durch das erstellte Modell innerhalb der gewählten

Grenzen funktioniert und zur Simulation verwendet werden kann.

#### V. WEITERE VORGEHENSWEISE

Im weiteren Verlauf des Projektes soll das vorgestellte Modell erweitert werden. Im nächsten Schritt werden der Warmwasserspeicher und die Peripheriekomponenten sowie der Eigenverbrauch dieser in das vorhandene Modell mit eingebunden. Damit wird eine vollständige Abbildung des Teststandes inklusive des BHKW- Simulators möglich. Nach erfolgreicher Modellbildung kann die Betriebsführung einer Brennstoffzelle untersucht und optimiert werden. Langfristig soll eine beobachterbasierte Steuerung für Brennstoffzellen-BHKWs für den Einsatz zur Gebäudeenergieversorgung in Smart Cities entstehen.

#### LITERATUR

- [1] KARL, Jürgen: *Dezentrale Energiesysteme: Neue Technologie im liberalisierten Energiemarkt*, 3rd ed. München. Oldenbourg, 2012
- [2] KURZWEIL, Peter: *Brennstoffzellentechnik: Grundlagen Komponenten, Systeme, Anwendungen*, 2nd ed. Springer Vieweg, 2013
- [3] LOEHN, Helmut: *Leistungsvergleich von Nieder- und Hochtemperatur-Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzellen: Experimentelle Untersuchungen, Modellierung und numerische Simulation*. 2010
- [4] O'HAYRE, R.P.: *Fuel Cell Fundamentals*. John Wiley & Sons, Inc., 2006
- [5] BALZAREK, Stefanie: *Vorplanung eines autarken Wasserstoffsystems zur Elektroenergieversorgung des Solarhauses im Klimapark Rietberg*. Fachhochschule Bielefeld, 2013
- [6] HAUBROCK, Jens: *Parametrierung elektrischer Äquivalentschaltbilder von PEM Brennstoffzellen*. Univ, Fak. für Elektrotechnik und Informationstechnik Magdeburg, 2008
- [7] KREWITT, Wolfram: *Beiträge zur Umweltgestaltung: Brennstoffzellen in der Kraft-Wärme-Kopplung/ Ökobilanzen Szenarien, Marktpotenziale*. Schmidt, 2004
- [8] GUMMERT, Guido: *Stationäre Brennstoffzellen: Technik und Markt*. Müller, 2006
- [9] KRÖGER, Kersten: *Analytische Messungen zum Temperatur- Verhalten eines NT- PEM- Brennstoffzellenmoduls*. PESS 2014, 2014
- [10] WOLF, R.: *Entwicklung eines Matlabmodells für NT- PEM Brennstoffzellen im BHKW- Einsatz zur Abbildung elektrischer und thermischer Referenzlastprofile*. Fachhochschule Bielefeld, 2014
- [11] VDI: *Referenzlastprofile von Ein- und Mehrfamilienhäusern für den Einsatz von KWK- Anlagen*. VDI 4655, 2008
- [12] VETTER, Matthias: *Modellbildung und Regelstrategien für erdgasbetriebene Brennstoffzellen- Blockheizkraftwerke*. Fraunhofer IRB Verlag, 2005