

# GEBÄUDEENERGIEVERSORGUNG MIT WASSERSTOFF - SACKGASSE ODER REALISTISCHE ZUKUNFTSOPTION?

**Andreas Herrmann, Anne Mädlow, Hartmut Krause**

TU Bergakademie Freiberg, Institut für Wärmetechnik und Thermodynamik, Gustav-Zeuner-  
Straße 7, 09599 Freiberg, Tel.: +49 3731 39 4387, Fax: +49 3731 39 3942,  
E-Mail: [Andreas.Herrmann@iwtt.tu-freiberg.de](mailto:Andreas.Herrmann@iwtt.tu-freiberg.de), Web: [www.gwa.tu-freiberg.de](http://www.gwa.tu-freiberg.de)

## **Kurzfassung:**

Wasserstoffversorgte Gebäude sind eine vielversprechende Option für die zukünftige Energieversorgung durch erneuerbare Energieträger (insbesondere PV und Windkraft). Bei elektrischen Überkapazitäten wird durch Elektrolyse Wasserstoff erzeugt, welcher über ein vorhandenes Wasserstoffnetz transportiert werden kann. Dieser Wasserstoff soll dann möglichst effizient in Gebäuden genutzt werden.

Das Ziel von H2-Home ist die Entwicklung eines integrativen Systems zur effizienten Nutzung von elektrischer Energie, Wärme- und Kälteenergie, welche durch die Nutzung von 100% grünem Wasserstoff bereitgestellt wird. Auf Basis einer Gebäudesimulation für ein 4-stöckiges Mehrfamilienhaus mit der Simulationssoftware TRNSYS® wurden Benchmarks für den wirtschaftlichen Einsatz ermittelt. In der Analyse wird dabei zwischen grauem Wasserstoff, aus der Dampfreformierung fossiler Rohstoffe, und grünem Wasserstoff, aus windstromgespeister Wasserelektrolyse, unterschieden.

Die Wasserstoffnutzung zur Energieversorgung von Gebäuden stellt im Vergleich zu anderen Heizsystemen wie Erdgas-BHKWs, Holzpelletkessel, Wärmepumpen sowie Erdgaskessel mit Solarthermie eine aussichtsreiche Option dar, wenn ein Wasserstoff-Brennstoffzellen-BHKW mit hohen Wirkungsgraden ( $\eta_{el} > 50\%$ ;  $\eta_{ges} > 95\%$ ) verfügbar ist, ein Wasserstoffnetz mit Energiebezugskosten in Höhe von Erdgas anliegt, die produzierte Elektroenergie hauptsächlich selbstgenutzt wird und die Vollbenutzungsstunden des H2-BZ-BHKW über 5.000 Stunden liegen. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Wasserstoff unter bestimmten Voraussetzungen im Gebäudesektor wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

**Keywords:** Wasserstoff, Brennstoffzelle, BHKW, Anlagensimulation

## **1 Einleitung**

Wasserstoffversorgte Gebäude sind eine vielversprechende Option für die zukünftige Energieversorgung durch erneuerbare Energieträger (insbesondere PV und Windkraft). Bei elektrischen Überkapazitäten wird durch Elektrolyse Wasserstoff erzeugt, welcher über ein vorhandenes Wasserstoffnetz transportiert werden kann. Dieser Wasserstoff soll dann möglichst effizient in Gebäuden genutzt werden.

Der Aus- und Aufbau einer „grünen“ Wasserstoffwirtschaft im mitteldeutschen und ostdeutschen Raum ist das Hauptziel der Wasserstoff-Initiative Hydrogen Power Storage & Solutions East Germany (kurz HYPOS), die im Jahr 2013 gegründet wurde. Die Initiative identifizierte unter

anderem den Auf- und Ausbau der Infrastruktur als Grundlage für eine flächendeckende grüne Wasserstoffwirtschaft. Dementsprechend sind die Pipelinennutzung zum Wasserstofftransport und der Aufbau von Großspeichern wesentliche Elemente des HYPOS-Ansatzes. Die in der Region bereits vorhandenen Infrastrukturen und Potenziale, wie z.B. Kavernenspeicher, bieten dazu beste Voraussetzungen. So soll, ausgehend von der HYPOS-Roadmap, 2026 die erste Salzkaverne zur dynamischen Wasserstoffspeicherung betriebsbereit zur Verfügung stehen und durch Wasserelektrolyse gespeist werden. Mittlerweile befinden sich insgesamt 12 Projekte in Umsetzung. Bis Mitte 2018 wird diese Zahl auf 24 Projekte ansteigen. Die Vorhaben verteilen sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette von der Wasserstoffproduktion über Transport & Speicherung bis hin zur Wasserstoffverwertung. Als projektübergreifendes Element soll das Pipelinennetz zum Einsatz kommen.

Das Projekt H2-Home (Dezentralisierte Energieversorgung durch Wasserstoffbrennstoffzellen) entwickelt ein System, welches zur hocheffizienten Versorgung mit elektrischer Energie, Wärmeenergie und Kühlenergie durch grünen Wasserstoff in häuslichen Anwendungen geeignet ist. Dieses System besteht aus einem Wasserstoff-Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk (H2-BZ-BHKW) auf Basis einer Niedertemperatur-PEM-Brennstoffzelle, einem mit Wasserstoff betriebenen Brennwertgerät und einem integrierten System zur Nutzung von Elektroenergie durch verschiedene Komponenten in einem AC- und DC-Netz. Der elektrische Wirkungsgrad des BHKW liegt über 50% und der Gesamtwirkungsgrad über 95%.

Im vorliegenden Artikel wird detailliert beschrieben, unter welchen Voraussetzungen dieses Konzept energetisch, wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll ist.

## **2 Beschreibung des H<sub>2</sub>-BZ-BHKW**

Durch den Wegfall des Reformers, der für marktübliche Erdgas-BZ-BHKW immer benötigt wird, können die Investitionskosten um ca. 1/3 reduziert und der elektrische Wirkungsgrad um ca. 1/3 erhöht werden. Die PEM-BZ eignet sich aufgrund der hohen technischen Reife hervorragend für die Verstromung von reinem Wasserstoff. Zudem liegen die erreichbaren elt. Wirkungsgrade von ca. 50% deutlich über denen von konventionellen KWK-Systemen.

Der Einsatz einer Brennstoffzelle zur Kraft Wärme Kopplung ist aufgrund des günstigen Verhältnisses von elektrischer zu thermischer Leistung besonders interessant. Somit ist eine Auslegung auf die Deckung der Gebäudegrundlast sowohl auf der elektrischen als auch auf der thermischen Seite möglich. Zur Deckung von Lastspitzen der Wärmelast wird ein wasserstoffbetriebener, zusätzlicher Spitzenlastbrenner vorgesehen. Damit ist kein zusätzlicher Anschluss des Gebäudes an das öffentliche Erdgasnetz notwendig. Ein Schema des Versorgungskonzeptes ist in Abbildung 1 dargestellt. Eine Kombination der Nutzung von Wasserstoff für die Gebäudeenergieversorgung in Kombination mit erneuerbaren Energien (PV und Windkraft) ist möglich.

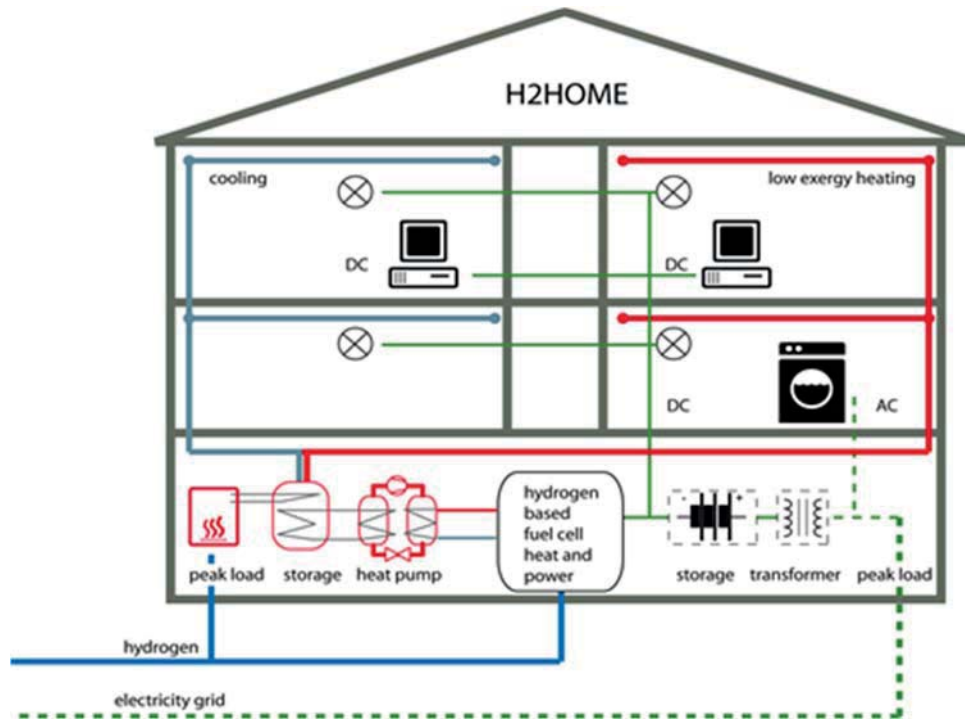


Abbildung 1: Schematischer Überblick des H2home Konzeptes

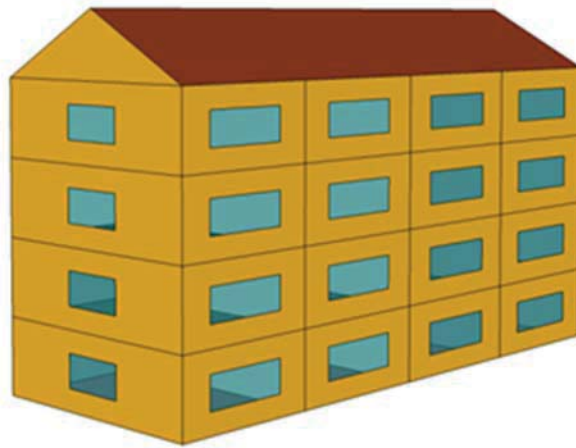
### 3 Energetisches und ökonomisches Modell

Insbesondere Mehrfamilienhäuser sind aufgrund günstiger Heizwärme- und elt. Profile gut für den Einsatz eines H2-BZ-BHKW geeignet.

Daher wurde zunächst der Einsatz eines H2-BZ-BHKW in einem repräsentativen Mehrfamilienhaus mit 4 Etagen und 16 Wohneinheiten untersucht. Auf jeder Etage befinden sich vier Wohneinheiten. Jede Wohneinheit wird durch eine Zone in der Simulation abgebildet. Daraus ergeben sich 17 simulierte Zonen (16 Wohneinheiten und Dachgeschoss). Abbildung 2 zeigt das Modell des Referenzgebäudes, anhand dessen die energetische Bilanzierung im Simulationsmodell vorgenommen wird. Die dafür relevanten Randbedingungen sind in Tabelle 1 dargestellt, welche sich an den Vorgaben der DIN V 18599 („Energetische Bewertung von Gebäuden“) orientieren.

Tabelle 1: Wichtige Nutzungsbedingungen des Referenzgebäudes gemäß DIN V 18599

Wert	Einheit	MFH
Tägliche Nutzungsdauer	-	00:00 – 24:00
Nutzungstage im Jahr	D	365
Raumtemperatur (Heizen)	°C	20
Raumtemperatur (Kühlen)	°C	25
Tägliche Betriebszeit (Heizung)	-	06:00 – 23:00
Luftwechselrate	1/h	0,6



**Abbildung 2:** Prinzipdarstellung des Referenzgebäudes

Die Simulationen der Energie- und Stoffströme im Rahmen dieser Arbeit wurden mit dem Programm TRNSYS® (Solar Energy Laboratory of the University of Wisconsin) durchgeführt. Durch die Möglichkeit dreidimensionale Gebäudestrukturen im Modell zu integrieren, Randbedingungen einzubinden und komplexe Systeme, wie z.B. ein H<sub>2</sub>-BZ-BHKW, abzubilden, ist TRNSYS® eine geeignete Simulationsumgebung.

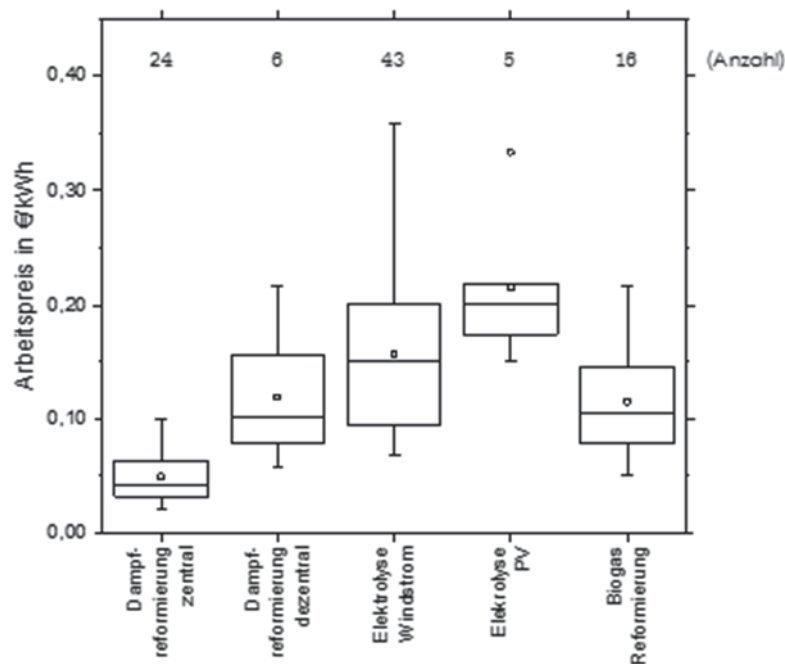
Die Ergebnisse des energetischen Modells dienen als Grundlage zur ökonomischen Bewertung des Versorgungssystems entsprechend der dynamischen Annuitätenmethoden. Gemäß VDI 2067 („Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“) wird innerhalb der Investitionsrechnung in Zahlungen und Erlöse unterschieden. Zahlungen bestehen aus einmaligen Zahlungen und regelmäßigen Zahlungen. Es wird weiterhin in kapitalgebundene Kosten, betriebsgebundene Kosten und bedarfsgebundene Kosten unterschieden.

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Einfluss der Wasserstoffkosten**

Zur Herstellung von Wasserstoff wird zwischen verschiedenen Erzeugungspfaden unterschieden. Der größte Anteil des genutzten Wasserstoffs wird derzeit durch Dampfreformierung in großen industriellen Anlagen erzeugt. Weiterhin sind Elektrolýsetechnologien am Markt verfügbar, welche mittels elektrischer Energie aus PV, Windenergieanlagen, Wasserkraftwerken oder fossilen Rohstoffen (Erdgas, Kohle) Wasserstoff generieren.

Die Kosten der verschiedenen Technologien zur Wasserstoffproduktion wurden in der Literatur detailliert untersucht [1-14]. Abbildung 3 zeigt einen zusammenfassenden Vergleich der Kosten der verschiedenen Herstellungspfade aus 14 Literaturquellen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die verschiedenen Studien auf unterschiedlichen Annahmen bezüglich der Randbedingungen (z.B. Investitionskosten, betriebsgebundene Kosten, bedarfsgebundene Kosten, Anlagengröße etc.) beruhen.



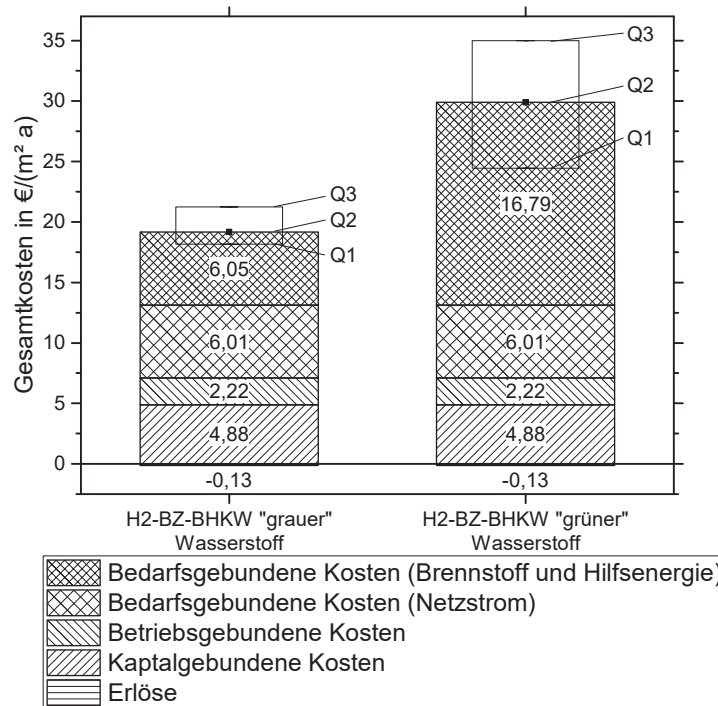
**Abbildung 3:** Wasserstoffherstellungskosten verschiedener Technologien (Auswertung von Literaturwerten) [1-14]

Im Vergleich mit anderen Energieträgern (Erdgas, Öl, Elektroenergie, Holzpellets) variieren die Produktionskosten für Wasserstoff sehr stark. Deshalb werden für die Ermittlung der Gesamtkosten die zahlreichen unterschiedlichen Literaturwerte statistisch ausgewertet (unteres Quartil, Median, oberes Quartil) und entsprechend weiter verwendet.

Für die folgenden Auswertungen wurden zwei besonders aussichtsreiche Herstellungspfade der Wasserstoffproduktion berücksichtigt:

- Herstellung von Wasserstoff aus Erdgas mittels Dampfreformierung (unteres Quartil Q1: 0,032 €/kWh; Median Q2: 0,042 €/kWh; oberes Quartil Q3: 0,063 €/kWh)
- Herstellung von „grünem“ Wasserstoff mittels Elektrolyse aus Elektroenergie von Windenergieanlagen (unteres Quartil Q1: 0,095 €/kWh; Median Q2: 0,150 €/kWh; oberes Quartil Q3: 0,201 €/kWh)

Abbildung 4 zeigt die Gesamtkosten der Energieversorgung mit Wärme und Elektroenergie. Es sind deutlich die großen Unterschiede der Wasserstoffherstellungskosten erkennbar. Die Kosten werden als spezifische jährliche Kosten (bezogen auf die Nutzfläche) dargestellt. Die Bezugskosten von „grünem“ Wasserstoff betragen ca. das Dreifache der Kosten von „grauem“ Wasserstoff aus Dampfreformierungsanlagen (vergleiche Abbildung 3). Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die Kosten von „grünem“ Wasserstoff in Zukunft deutlich reduzieren lassen und diese sich den Kosten von „grauem“ Wasserstoff annähern werden. Den größten Einfluss auf die Gesamtkosten weisen die Bezugskosten für Wasserstoff auf.



**Abbildung 4:** Spezifische Jahresgesamtkosten der Energieversorgung unter Nutzung verschiedener Wasserstofferzeugungspfade (Bezugsgröße: m<sup>2</sup> Nutzfläche)

Bei Berücksichtigung von evtl. zukünftigen Verpflichtungen zum Erwerb von CO<sub>2</sub>-Zertifikaten, auch im Gebäudebereich, ist aufgrund der geringen Kosten für die CO<sub>2</sub>-Zertifikate der Einfluss auf die Gesamtkosten (Summe aus bedarfsgebundenen, kapitalgebundenen und betriebsgebundenen Kosten) nur gering. Prinzipiell lassen sich die Gesamtkosten bei überwiegender Eigennutzung bei entsprechenden geringen Wasserstoffkosten deutlich reduzieren.

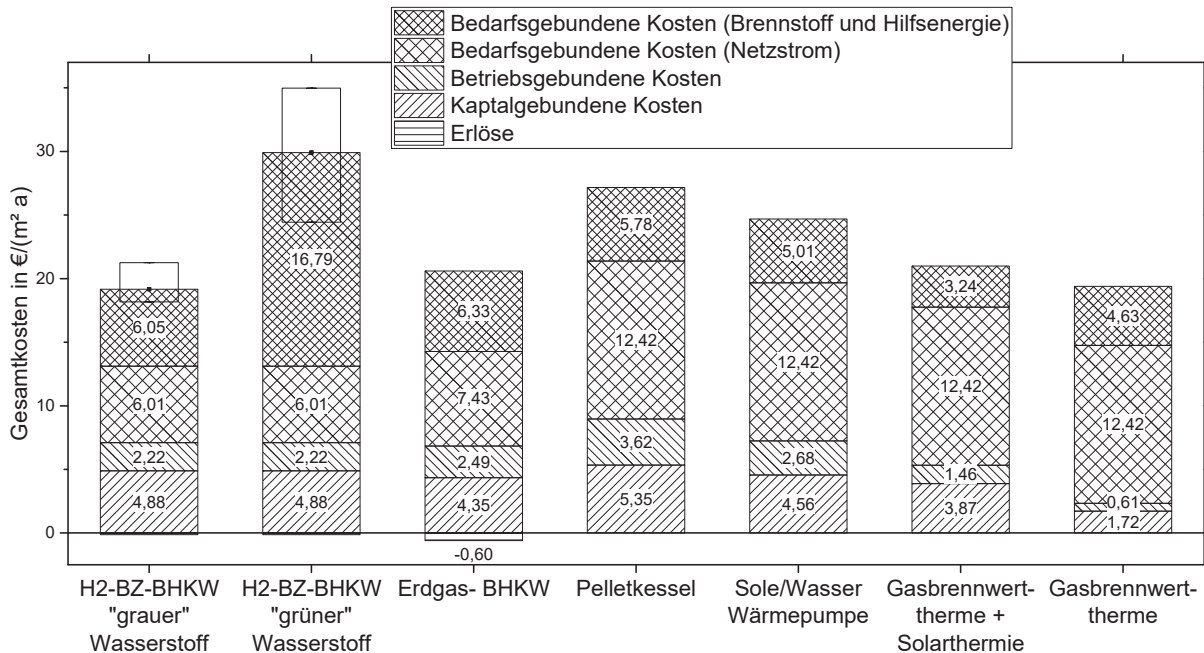
## 4.2 Vergleich mit anderen Gebäudeenergieversorgungskonzepten

Weiterhin erfolgte ein Vergleich von dem entwickelten H<sub>2</sub>-BZ-BHKW mit anderen typischen Heizsystemen (vergleiche Abbildung 5). Für die Ermittlung der Gesamtkosten werden zusätzliche Nebenkosten (Kosten für den Transport vom Erzeuger zum Gebäude) in Höhe von 0,015 €/kWh berücksichtigt [15]. Die energetische Bilanzierung der alternativen Gebäudeenergieversorgungskonzepte erfolgt nach DIN V 18599 („Energetische Bewertung von Gebäuden“) mit der Software Hottgenroth®. Die Unterschiede zwischen den verwendeten Anlagenkonzepten sind moderat. Die geringsten Gesamtkosten besitzen der Gasbrennwertkessel und das H<sub>2</sub>-BZ-BHKW, wenn „grauer“ Wasserstoff (zentrale Dampfreformierung) eingesetzt wird. Bei Verwendung von „grünem“ Wasserstoff sind die Kosten etwas höher als beim Holzpelletkessel oder den Wärmepumpen.

Abbildung 5 zeigt, dass die Kosten für Elektrizität aus dem Netz (Netzbezugskosten) bei Systemen ohne Eigenstromnutzung 12,42 €/m<sup>2</sup> a) und damit ca. 50% der Gesamtkosten betragen. Durch den Einsatz eines H<sub>2</sub>-BZ-BHKW lassen sich diese auf 6,01 €/m<sup>2</sup> a), d.h. um ca. 50% reduzieren. Aufgrund des geringeren elektrischen Wirkungsgrades ist bei Einsatz eines Erdgas-BHKW eine Reduktion um lediglich 40% möglich.



Die ermittelten Kosten der verschiedenen Versorgungskonzepte werden durch einen Vergleich mit Werten aus der Literatur prinzipiell bestätigt [16, 17, 18].



**Abbildung 5:** Vergleich des H2-BZ-BHKW mit anderen typischen Energieversorgungskonzepten in Gebäuden

Derzeit weist das H2-BZ-BHKW mit „grünem“ Wasserstoff ähnlich hohe Gesamtkosten wie ein Pelletkessel auf. Unter Berücksichtigung der typischen Kosten für Biomethan (z.B. aus Biogasanlagen) von 0,1 €/kWh [19], würden anderen Energieversorgungssysteme wie das Erdgas-BHKW, der Gasbrennwertkessel in Kombination mit Solarthermie oder der Gasbrennwertkessel ähnlich hohe Gesamtkosten aufweisen wie das H2-BZ-BHKW mit „grünem“ Wasserstoff.

## 5 Fazit

Die Energieversorgung von Gebäuden mit Wasserstoff ist unter folgenden Voraussetzungen eine vielversprechende Option, um die Bundesziele zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors zu erreichen:

- Es wird ein H2-BZ-BHKW mit hohem elektrischen Wirkungsgrad (ca. 50%), hohem Gesamtwirkungsgrad und geringen spezifischen Investitionskosten eingesetzt. Dies wird innerhalb des H2Home-Projektes umgesetzt.
- Der Wasserstoff liegt netzgebunden vor, d.h. ein Wasserstoffnetz ist vorhanden. Die H2 Kosten liegen im Bereich der Kosten für andere Endenergieträger.
- Der erzeugte Strom wird weitgehend im Objekt genutzt, d.h. der Eigennutzungsanteil sollte über 70% liegen.
- Das H2-BZ-BHKW weist eine hohe Auslastung von wenigstens 5.000 Vollbetriebsstunden auf.
- Die politischen Rahmenbedingungen für die Erzeugung von „grünem“ Wasserstoff werden an die aktuellen Gegebenheiten angepasst.

Unter den aufgezeigten Rahmenbedingungen sind Wasserstoffversorgte Gebäude für die Gebäudeenergieversorgung eine realistische Zukunftsoption und energetisch, wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll.

Derzeit erfolgt der Bau des H<sub>2</sub>-BZ-BHKW. Dieses wird zunächst im KWK-Demonstrationszentrum des Deutschen Brennstoffinstitutes getestet. In der nächsten Projektphase ist der Betrieb in einem Wasserstoffdorf vorgesehen.

Parallel werden fortführende, theoretische Untersuchungen durchgeführt, um weitere Anwendungsfelder für diese Technologie zu identifizieren.

## 6 Danksagung

Das Vorhaben „H<sub>2</sub>home“ wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 03ZZ0709C im Förderbereich Zwanzig20 – Unternehmen Region – HYPOS gefördert. Die Autoren danken für die finanzielle Unterstützung.

## 7 Referenzen

- [1] Albrecht, U.; Altmann, M.; Barth, F.; Bünger, U.; Fraile, D.; Lanoix, J.; Pschorr-Schoberer, E.; Vanhoudt, W.; Weindorf, W.; Zerta, M.; Zittel, W.: Study on hydrogen from renewable resources in the EU. Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH (LBST) und Hincio S.A.. 2015.
- [2] Ajanovic, A.; Haas, R.; Nakicenovic, N.: Wirtschaftliche Aspekte von Öko-Wasserstoff. Technische Universität Wien. 2005.
- [3] Bartels, Jeffrey R.; Pate, Michael B.; Olson Norman K.: An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. In: International Journal of Hydrogen Energy, 35 (2010) 8371–8384..
- [4] Bettgenhäuser, K.; Boermans, T.: Umwelteinwirkung von Heizsystemen in Deutschland. Studie im Auftrag des Umweltbundesamts. 2011.
- [5] Bertuccioli, L.; Chan, A.; Hart, D.; Lehner, F.; Madden, B.; Standen, E.: Study on development of water electrolysis in the EU. E4tech Sàrl and element energy. 2014.
- [6] Doetsch, C.; Grevé A.; Hochloff, P.; Appen, J.; Trost, T.; Gerhardt, N.; Puchta, M.; Jentsch, M.; Schreiber, M.; Rohrig, K.; Meyer, B.; Wendorff, M.; Hashemi, A.; Kanngießner, A.: Metastudie Energiespeicher. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) und Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES). 2014.
- [7] Lemus, R.; Duarte, J.: Updated hydrogen production costs and parities for conventional and renewable technologies. In: International Journal of Hydrogen Energy. 35 (2010) 3929–3936.



- [8] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH: Study on hydrogen from renewable resources in the EU. Studie im Auftrag von Fuel Cells und Hydrogen Joint Undertaking. 2015.
- [9] Montenegro Camacho, Y.; Bensaid, S.; Piras, G.; Antonini, M.: Techno-economic analysis of green hydrogen production from biogas autothermal reforming. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2017.
- [10] Müller-Langer, F.; Tzimas, E.; Kaltschmitt, M.; Peteves, S.: Technoeconomic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term. In: International Journal of Hydrogen Energy, 32 (2007) 3797–3810.
- [11] Pregger, T.; Graf, D.; Krewitt, W.; Sattler, C.; Möller, S.: Perspektiven solarthermischer Verfahren zur Wasserstoffherstellung. Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt e.V. Stuttgart. 2008.
- [12] Pregger, T.; Graf, D.; Krewitt, W.; Sattler, C.; Roeb, M.; Möller, S.: Prospects of solar thermal hydrogen production processes. In: International Journal of Hydrogen energy. 34 (2009) 4256–4267.
- [13] Smolinka, T.; Günther, M.; Garcke, J.: NOW-Studie „Stand und Entwicklungspotential der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien. Fraunhofer ISE und FCBAT. 2010.
- [14] Töpler, J.; Lehmann, J.: Wasserstoff und Brennstoffzellen – Technologien und Marktperspektiven. Berlin, Heidelberg. Springer Verlag. 2014.
- [15] Nitsch, J.: Potentiale der Wasserstoffwirtschaft. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg. 2003.
- [16] BDEW - Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.: BDEW-Heizkostenvergleich Neubau. 2016.
- [17] Ingenieurbüro Prof. Dr. Hauser GmbH: EnEV 2017 - Vorbereitende Untersuchungen. Studie im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR). Kassel. 2016.
- [18] Leipziger Institut für Energie GmbH: Vollkostenvergleich von Heizsystemen - Mehrfamilienhaus Bestand. Studie für BHKW-Systeme GmbH. 2011.
- [19] NaturStromHandel GmbH:  
<https://www.naturstrom.de/privatkunden/gas/antragsformular/> (abgerufen am 30.05.2017).