

# „Brennstoffzelle und Wärmepumpe im Einfamilienhaus“

Dr. Helmut Mothes  
manufactive consulting  
[helmut.mothes@manufactive.com](mailto:helmut.mothes@manufactive.com)  
+49 1578 57270028

## Zusammenfassung:

Im Projekt werden durch die Kombination von Brennstoffzelle und Wärmepumpe effizient Strom und umweltfreundlich Wärme in einem Einfamilienhaus erzeugt.

Mit einem auf den Energiebedarf abgestimmten Design und einer vorausschauenden Prozessführung von Brennstoffzelle, Wärmepumpe und Fußbodenheizung lassen sich die Vorteile der effizienten Stromerzeugung (BZ) und ressourcenschonende Nutzung von Umweltwärme (WP) verknüpfen. Die intelligente Steuerung des Gesamtsystems wird durch ein Wärmemodell des Einfamilienhauses und eine internet-basierte Wetterprognose unterstützt.

Die Brennstoffzelle ermöglicht durch ein optimales Wärmemanagement Wirkungsgrade über 95%. Die intelligente Prozessführung sicherte eine hohe Jahresarbeitszahl für die Luft-Wasser-Wärmepumpe und minimierte den Zukauf teuren, schmutzigen Stroms. Der Primärenergieverbrauch für Heizung und Strom des Einfamilienhauses lässt sich um mehr als 70% reduzieren.

Brennstoffzelle und Wärmepumpe wurden inzwischen im Heizbetrieb (inkl. Brauchwasser) wie auch als Klimaanlage über ein Jahr erfolgreich betrieben.

## Beschreibung des Projektes:

Brennstoffzellen erzeugen Strom sehr effizient, während Wärmepumpen Umweltwärme nachhaltig zum Heizen nutzen. Die Kombination beider System zur integrierten Erzeugung von Strom und Wärme für ein Einfamilienhaus verspricht eine besonders ressourcenschonende Lösung, die den sehr effizient in der Brennstoffzelle hergestellten Strom zur Nutzung von Umweltwärme durch eine Wärmepumpe verwendet. Die Gesamtanlage bestehend aus Brennstoffzelle, Wärmepumpe, Speichertank (Warm-/ Heizwasser) sowie die Fußbodenheizung sind in Abb. 1 schematisch dargestellt.

Die eingesetzte Solid-Oxid Brennstoffzelle der Firma Solidpower besitzt eine Nennleistung von 1,5kW Strom und 0,7kW Wärme, die Luft-Wärmepumpe der Firma Viessmann liefert bei 1 kW Inputstrom ca. 4kW Wärme. Der zweigeteilte Speichertank der Fa. Capito hat eine Kapazität von 600l. Abb.2 zeigt die in einem kleinen Raum kompakt arrangierte Brennstoffzelle, Wärmepumpe und den Speichertank. Die Fußbodenheizung besitzt insgesamt 14 regelbare Kreisläufe, die sowohl zur Heizung als auch Kühlung des Hauses genutzt werden.

Die Stromerzeugung in der Brennstoffzelle muß optimal auf den Bedarf der Wärmepumpe abgestimmt werden. Zu diesem Zweck wird die Wärmecharakteristik des Einfamilienhauses bestimmt, die durch die Wärmekapazität und die Wärmeverluste gekennzeichnet wird.

Abb.3 zeigt den Heizbedarf des Hauses in Abhängigkeit von der Aussentemperatur. So liegt der Hauswärmebedarf bei einer Aussentemperatur von 0°C bei ca. 4kW.

Die Auslegung des Gesamtsystem erfolgte für eine maximale Wärmeerzeugung von 7kW und eine maximale Stromerzeugung von 1,5kW. Bei einer Aussentemperatur von 0°C stellt beispielsweise die Brennstoffzelle ca. 0,9kW Wärme direkt zur Verfügung, die Wärmepumpe ergänzt 3,1kW bei einem Stromeinsatz von 1,1kW. Da der durchschnittliche Strombedarf des Haushalts bei ca. 0,4kW liegt, kann auch bei 0°C Aussentemperatur mit dem von der Brennstoffzelle erzeugten Strom von 1,5kW der Wärme- und Strombedarf des Einfamilienhauses komplett abgedeckt werden. Im Temperaturbereich zwischen 0° und 15°C wird nur ein Teil des erzeugten Stroms für die Wärmeerzeugung in der Wärmepumpe benötigt, der Überschuss wird ins Netz eingespeist. Bei Temperaturen oberhalb von 15°C kann der Wärmebedarf (vorrangig Brauchwasser) vollständig durch die Abwärme der Brennstoffzelle bereitgestellt werden. Bei Temperaturen unterhalb von °C kann die Wärmepumpe die erforderliche Wärme mit zusätzlichem Netzstrom sicherstellen. Über den verfügbaren Eigenstrom hinausgehende Stromspitzen im Haushalt oder der Wärmepumpe bei extremer Kälte wird also aus dem Netz bezogen.

Grundsätzlich könnten durch in einer Batterie gespeicherten Eigenstrom diese Stromspitzen an kalten Tagen abgedeckt werden. Können diese Stromspitzen auch durch eine intelligente Prozessführung kostengünstig gehandhabt werden?

Eine deutlich kostengünstigere Lösung kann dadurch realisiert werden, dass überschüssiger Strom nicht ins Netz eingespeist, sondern als Wärme im Haus gespeichert wird, um für zukünftige Kältephasen den Heizaufwand mit entsprechenden Stromspitzen zu vermeiden. Zu diesem Zweck muss die Information zu Temperaturen der nächsten 24 – 48h aus dem Internet abgefragt, die gewünschten Raumtemperaturen vorab erhöht und die Heizkreisläufe der Fussbodenheizung entsprechend geöffnet werden. Die Dynamik der Wärmespeicherung im Haus kann durch das Wärmemodell des Einfamilienhauses abgeschätzt werden. Eine intelligente Prozessführung, die mittels RaspberryPi und Arduino-Microcontrollern erfolgt, hilft also den Heizbedarf zu vergleichmäßigen und Strombezug aus dem Netz zu vermeiden. Insbesondere ermöglicht eine intelligente Prozessführung, die Wärmepumpe zumeist im optimalen Arbeitsbereich zu betreiben. Sie reduziert desweiteren Temperaturschwankungen in den Räumen.

Während Wärmepumpen eine bewährte Technologie darstellen, repräsentieren Brennstoffzellen eine neue Technik. Kann eine Brennstoffzelle schon die hohen Erwartungen an Wirkungsgrad und Lebensdauer erfüllen?

Abb.4 zeigt den elektrischen Wirkungsgrad der Brennstoffzelle für die bisherige Betriebsdauer von 14000h, der von zunächst 61% auf 59,7% nur leicht gefallen ist. Da die Effizienz der Brennstromzelle nur noch langsam sinkt, sollte eine akzeptable Betriebsdauer resultieren.

Der thermische Wirkungsgrad hängt entscheidend von der Kühlwassertemperatur ab und lag zwischen 0,75kW bei 25°C und 0,3kW bei 45°C (Abb.5). Da das Kühlwasser aus dem Heizwasser des Speichers stammt, ist es vorteilhaft, den kalten Rücklauf der Fussbodenheizung zur Wärmerückgewinnung aus der Brennstoffzelle zu nutzen. Auch hier hilft eine intelligente Prozessführung, die die Kühltemperatur minimieren und somit höhere Wärmebeiträge der Brennstoffzelle ermöglicht.

Beim Betrieb strahlt die Brennstoffzelle Wärme von ca. 0,3kW ab. Da die Brennstoffzelle im Wohnhaus in einem Nebenraum installiert ist, kann diese Wärme im Haus zum Heizen genutzt werden. Im Winterheizbetrieb liefert die BZ neben den 0,75kW Abwärme noch 0,3kW Wärme. Diese Gesamtwärme von 1kW und die Stromleistung von 1,5kW bedeuten bei einem

Gaseinsatz von 2,55kW einen Wirkungsgrad von nahezu 100%. Kann die Abgaswärme der BZ auf 25°C begrenzt werden, kann eine optimal in die Fussbodenheizung integrierte Brennstoffzelle die Wirkungsgrade eines Gasbrennwertgeräts erreichen. Abb.6 verdeutlicht diesen Zusammenhang für die bisherige Laufzeit der Brennstoffzelle. Die unteren beiden Wirkungsgrade repräsentieren die gemessenen thermischen und elektrischen Wirkungsgrad, die addiert den Gesamtwirkungsgrad wie vom Hersteller benannt bei 85% ergeben. Mit der Abstrahlungswärme erhöht sich dieser Gesamtwirkungsgrad auf 95-99%. Im Sommer ergeben sich etwas niedere Werte, da mehr Wärme ungenutzt an die Umwelt abgegeben wird.

Die Brennstoffzelle nutzt im Winter den Energieinhalt des Erdgases zu fast 100%. Die Wärmepumpe läuft abhängig von der Aussentemperatur mit COP-Werten zwischen 2,8 und 4,5 und einer Jahresarbeitszahl über 3,5.

Was bedeutet dies für den Primärenergieverbrauchs eines kombinierten Systems?

In Abb.7 wird der Primärenergiebedarf des Brennstoffzelle-Wärmepumpen-Systems dargestellt, wobei der Primärenergieeinsatz einer Gastherme als Basis (100%) herangezogen wird. Der Primärenergieeinsatz des kombinierten BZ-WP-Systems liegt abhängig von der Aussentemperatur bei nur 10 bis 40% eines konventionell mit Erdgas betriebenen Gasbrennwertgerätes für das Heizen des Einfamilienhauses.

Zum Vergleich ist auch eine mit Strom der aktuellen Zusammensetzung (Kohle/Gas, Kernkraft, Erneuerbare) aus dem Netz versorgte Wärmepumpe eingetragen. Aufgrund der Verluste der fossilen Kraftwerke sind die Primärenergie-Einsparpotentiale für mit Netzstrom betriebene Wärmepumpen insbesondere bei geringen Temperaturen deutlich geringer.

Eine mit erneuerbaren Energien betriebene Wärmepumpe könnte den Einsatz von Primärenergie komplett vermeiden, steht aber im Winterzeitraum mit dem großen Heizbedarf entweder wie Sonnenenergie nicht ausreichend oder wie Windkraft nicht zuverlässig zur Verfügung.

Das Brennstoffzelle-Wärmepumpe-System liefert aber nicht nur umweltschonend Wärme für die Beheizung des Einfamilienhauses, sondern deckt auch den Strombedarf des Hauses (4500kWh/a) und exportiert vor allem im Sommer Strom ins Netz (5500kWh/a). Auch dieser Strom benötigt einen deutlich geringeren Primärenergieeinsatz als der konventionell erzeugte Strom..

Die Kombination aus Brennstoffzelle und Wärmepumpe stellt damit eine Technologiealternative dar, um mittelfristig den CO<sub>2</sub>-Ausstoß für Strom und Wärme im privaten Bereich im Haushaltbereich zu senken und vor allem auch im Wärmesektor die Energiewende einzuleiten.

Die inzwischen vorliegenden betriebswirtschaftlichen Daten weisen darauf hin, dass mit zunehmenden Stückzahlen die Investitionskosten soweit reduziert werden können, dass diese Technologiekombination wirtschaftlich wird und im Wettbewerb bestehen sollte. Darüber hinaus kann die Kombination von Brennstoffzelle und Wärmepumpe den Übergang in eine von erneuerbaren Energie dominierte Zukunft erleichtern.

Das BZ-WP-Projekt wurde von EU und BAFA gefördert.

## Abbildungsverzeichnis:

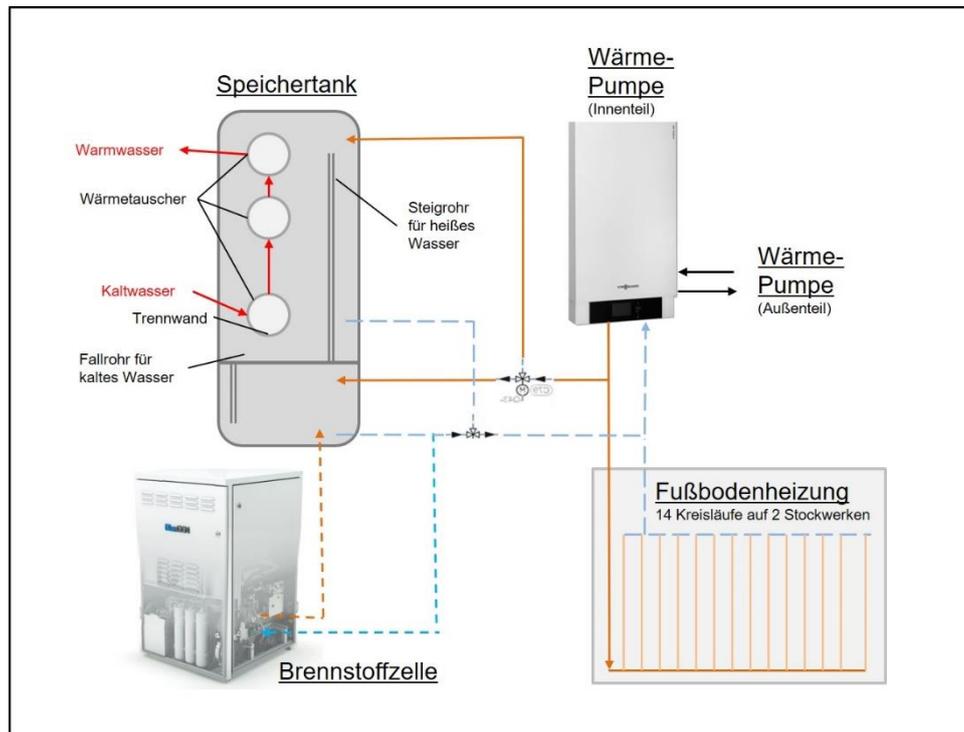


Abb. 1: Schema der Brennstoffzelle, Wärmepumpe, Speichertank und Fussbodenheizung

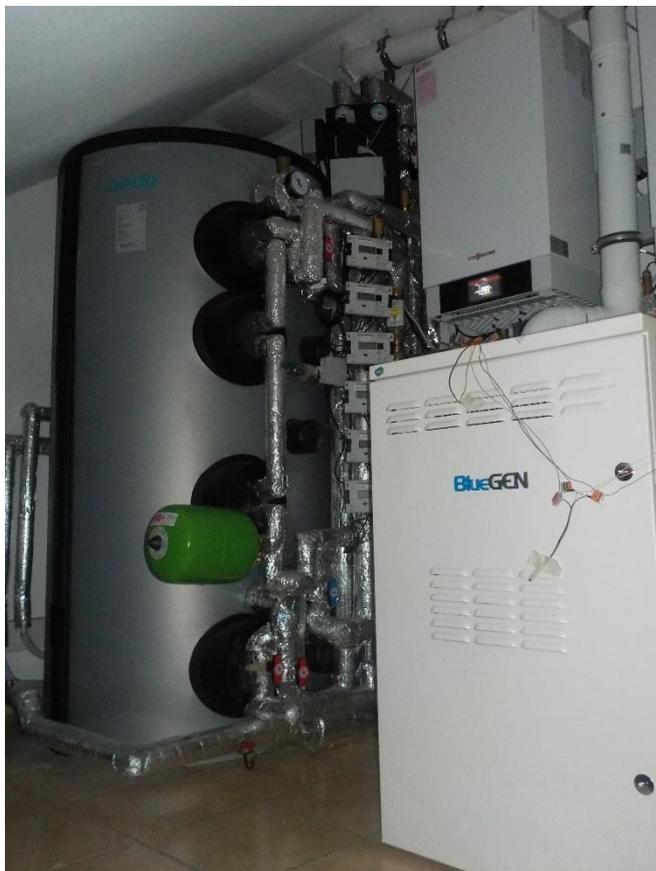
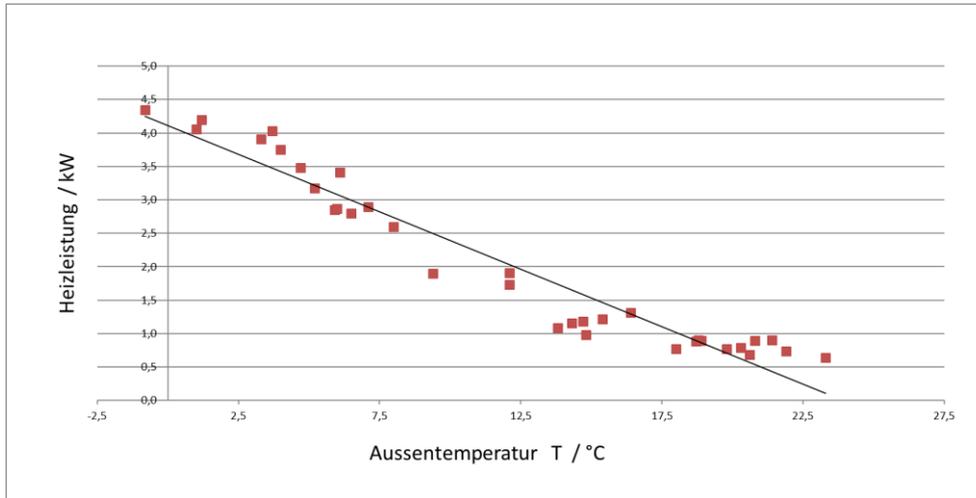
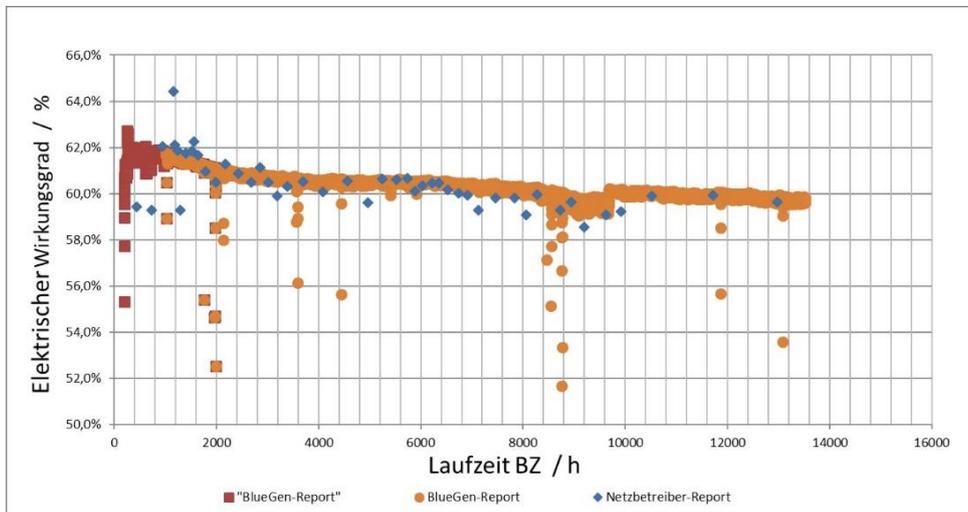


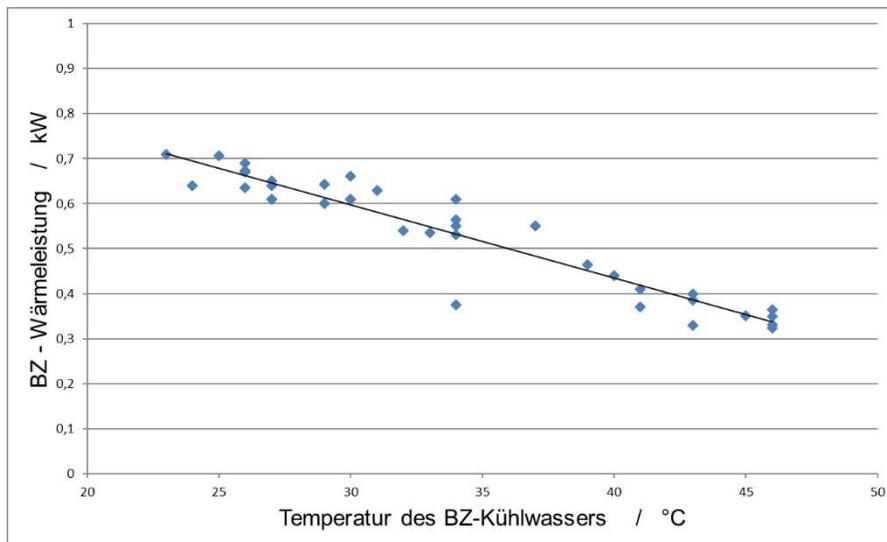
Abb. 2: Bilder der kompakten Anlage



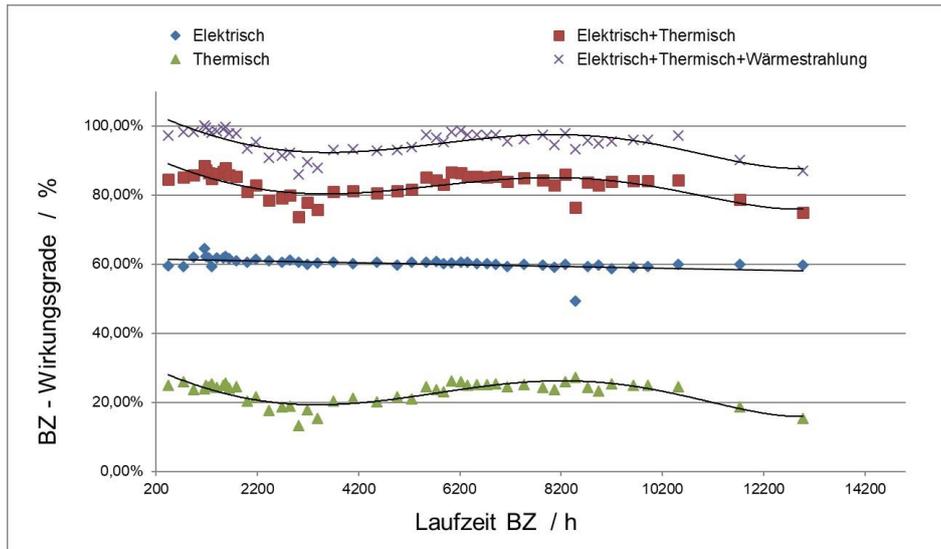
**Abb. 3:** Wärmecharakteristik des Einfamilienhauses



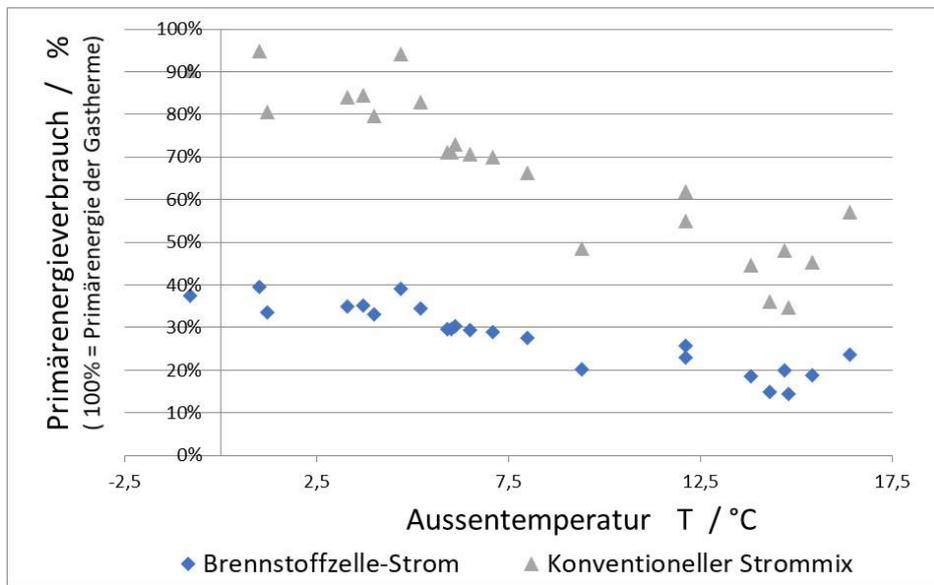
**Abb. 4:** Elektrischer Wirkungsgrad der Brennstoffzelle



**Abb. 5:** Wärmeerzeugung der Brennstoffzelle



**Abb. 6:** Elektrischer, thermischer und kumulierter Wirkungsgrad



**Abb. 7:** Vergleich des Primärenergieverbrauchs von Wärmepumpe betrieben mit Netzstrom (aktueller Strommix) und Brennstoffzelle-Strom (Basis: Primärenergieverbrauch der Gastherme = 100%)