

## **DAS POWERHAUS - EIN EINFAMILIENHAUS ALS KÜHLTURM EINES HOCHEFFIZIENTEN STROMERZEUGERS**

Sebastian Stinner, Dirk Müller  
RWTH Aachen University, E.ON Energy Research Center  
Institute for Energy Efficient Buildings and Indoor Climate, Aachen, Deutschland  
Email: sstinner@eonerc.rwth-aachen.de

### KURZFASSUNG

Das Energiesystem in Deutschland ist in einem Wandel zu mehr Dezentralität. Für die Versorgung von Gebäuden können hierbei unter anderem Mikro-KWK-Anlagen eine Rolle spielen. Eine vielversprechende Technologie stellt dabei die Brennstoffzelle dar, da sie höhere Umwandlungseffizienzen als beispielsweise ein Verbrennungsmotor erzielen kann. Diese Anlagen sollten auf Grund ihrer technischen Beschaffenheit und auf Grund der Tatsache, dass sie einen sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60 % erreichen können, möglichst kontinuierlich im Nennpunkt betrieben werden. Eine solche möglichst durchgehende Betriebsweise in einem „Powerhaus“ wird in dieser Arbeit detaillierter untersucht. Speziell soll dabei die Möglichkeit der Abwärmenutzung und somit die Ersetzung von in einem Kessel erzeugter Wärme betrachtet werden. Auch die Auswirkungen verschiedener Konfigurationen auf die Stromversorgung des Gebäudes werden analysiert.

### ABSTRACT

The energy system in Germany is in a shift towards a distributed supply system. For the supply of buildings micro-CHP systems can have a growing impact. One promising technology in this case is the fuel cell, because it can reach higher conversion efficiencies than for example an internal combustion engine can achieve. These facilities should be operated continuously due to their nature and due to the fact that they can achieve a very high electrical efficiency of up to 60%. This continuous operation in a "powerhouse" is examined in more detail in this paper. Especially the possibility of using waste heat to replace boiler generated heat is considered in this paper. Also, the effects of different configurations on the power supply of the building will be analyzed.

### EINFÜHRUNG

Ca. 35 % der Endenergie wird in Deutschland in Gebäuden für Heizung und Warmwasser verbraucht (AG Energiebilanzen, 2011). Dies ist ein Grund, die Versorgung von Gebäuden mit Energie möglichst effizient zu gestalten.

Auf der anderen Seite erfährt das elektrische Netz eine zunehmende dezentrale Einbindung fluktuierender erneuerbarer Energien. Hier sollen Lösungen gefunden werden, die dafür sorgen, dass zu jeder Zeit die von den Nutzern benötigte Energie bereitgestellt werden kann.

Dafür werden einerseits Anlagen benötigt, die eine große Dynamik aufweisen und somit schnell regelbar elektrische Energie bereitstellen. Dies könnten beispielsweise Gasturbinen, Pumpspeicherkraftwerke oder auch verbrennungsmotorische Kraft-Wärme-Kopplungs (KWK)-Anlagen sein.

Über große Teile des Jahres wird es auch bei sehr stark fluktuierender Erzeugung durch die erneuerbaren Energien noch den Bedarf an einer elektrischen Grundlast-Deckung geben. Hierzu sollten aus energetischer Sicht möglichst Anlagen eingesetzt werden, die einen sehr hohen elektrischen Wirkungsgrad aufweisen.

Hierzu können auch Mikro-KWK-Anlagen auf Basis des Brennstoffzellenprozesses ihren Beitrag leisten. Diese Anlagen erzielen aktuell einen elektrischen Wirkungsgrad von bis zu 60 %. Dies ist vergleichbar mit den besten momentan vorhandenen zentralen Kraftwerken. Zusätzlich kann die Abwärme im Gebäude noch für die Beheizung oder Warmwasserbereitung genutzt werden.

Die Brennstoffzellen sind aufgrund der hohen Betriebstemperaturen nicht in kurzer Zeit ein- und ausschaltbar. Allerdings sind sie in einem gewissen Maße modulierbar. Somit können sich verschiedene Betriebsmodi ergeben. Im Rahmen dieser Arbeit sollen diese unterschiedlichen Modi untersucht werden.

Einer der betrachteten Modi ist der kontinuierliche Betrieb der Anlage über das ganze Jahr ohne Abschalten. Hier soll untersucht werden, wie die Abwärme der Anlage durch Speicherung genutzt werden kann und in welchem Maße eine Rückkühlung über das Abgas notwendig ist.

Ein weiterer zu betrachtender Modus ist das Abschalten der Anlage in den Sommermonaten, da hier zum einen der Wärmebedarf des Gebäudes

zurückgeht und zum anderen auch die Einspeisung fluktuierender Photovoltaikanlagen höher sein wird.

Die verschiedenen Betriebsmodi und Konfigurationen werden im Gesamtsystem aus Anlage, Speicher, Spitzenlastkessel und Gebäude dynamisch untersucht und es wird eine primärenergetische Bewertung vorgenommen.

Neben dieser primärenergetischen Betrachtung sollen auch der Gasbedarf für einen Zusatzkessel und die Eigenstromnutzung im Gebäude analysiert werden.

## SIMULATIONSMODELLE

### **Dynamische Modellierung**

Gebäudeenergiesysteme sehen sich vielfältigen dynamischen Randbedingungen gegenüber. Dies ist zum einen auf äußere Einflüsse wie beispielsweise das Wetter zurückzuführen, aber auch der Nutzer durch sein Verhalten führt zu dynamischem Verhalten des gesamten Systems. Das Wetter hat seine größten Einflüsse über die Temperatur und die solare Einstrahlung. Der Nutzer wirkt zum einen durch seine Anwesenheit im Gebäude (Wärmeabgabe des Menschen selbst und durch Geräte, die verwendet werden) und auch durch Lüftungsverhalten und Warmwasserzapfung dynamisch auf das Gebäudeenergiesystem ein.

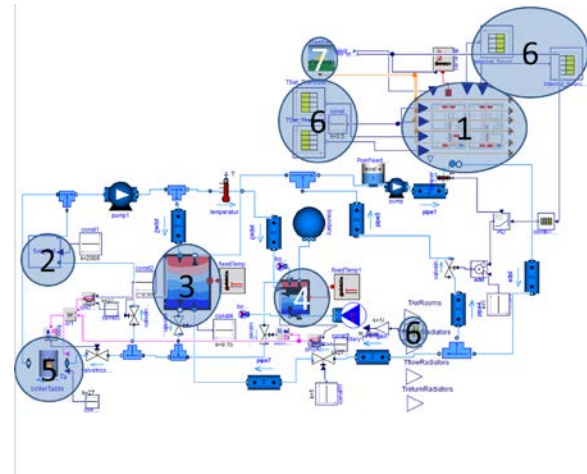
Um diese Dynamik vollständig abzubilden, wird der Ansatz der Modellierung mit der Modellierungssprache Modelica verwendet. Hier wird ein gleichungsbasierter Ansatz verwendet. Dadurch ist eine Modellierung aus Ingenieursperspektive möglich. Die Lösung des resultierenden Gesamtsystems wird durch die Oberfläche Dymola mit einem C-Compiler vorgenommen.

### **Modellierung des Gesamtsystems**

Das Gesamtsystem, abgebildet in Modelica, ist in Abbildung 1 zu sehen. Es besteht aus mehreren Komponenten.

Zum einen wird das Gebäude physikalisch abgebildet (Abbildung 1, Nummer 1). Dies beinhaltet vor allem die thermischen Verluste über die Gebäudehülle durch die wärmeübertragenden Bauteile, aber auch die Wärmespeicherkapazität der verwendeten Materialien. Die Wände sind hierzu in einem Schichtensystem modelliert. Innerhalb des Gebäudemodells sind die Heizkörper inklusive Ventilen hydraulisch sowie thermisch modelliert. So wird sichergestellt, dass bei einer bestimmten erreichten Raumtemperatur die Wärmezufuhr in das Gebäude gestoppt wird. Die Heizkörper sind auf die verschiedenen Räume verteilt, so dass

unterschiedliche Verhältnisse in unterschiedlichen Räumen berücksichtigt werden.



*Abbildung 1: Gesamtmodell für die Simulation in Modelica*

Neben der Modellierung des Gebäudes wird auch das Versorgungssystem detailliert abgebildet. Die beiden zentralen Elemente des hier vorgestellten Powerhaus-Konzeptes sind zum einen die hocheffiziente Brennstoffzelle (Abbildung 1, Nummer 2) und zum anderen der thermische Warmwasserspeicher. Die Brennstoffzelle erzeugt nach dem Prinzip der Kraft-Wärme-Kopplung neben dem erzeugten elektrischen Strom auch Wärme für die Versorgung des Gebäudes mit Heizungs- und Trinkwarmwasser. Die Anlage wird mit einem tabellenbasierten Modell abgebildet. Dies bedeutet, dass eine elektrische Leistung vorgegeben wird, die die Anlage liefern soll. Diese wird dann auch geliefert. Anhand von Tabellendaten wird der zugehörige Wirkungsgrad ermittelt und somit die zugehörige Brennstoffleistung errechnet. Die thermische Leistung kann als Maximalleistung aus der Tabelle entnommen werden. Welche thermische Leistung letztendlich in das Heiznetz übergeben wird, wird durch das Temperaturniveau des Vorlaufs zur Brennstoffzelle maßgeblich bestimmt. Je höher dieses Temperaturniveau ist, desto weniger der Wärme kann aus der Brennstoffzelle ausgekoppelt werden. Um dies sicherzustellen, wird eine maximale Temperatur angenommen, die das Wasser erreichen kann. Würde mit der aus der Tabelle entnommenen thermischen Leistung dieses Temperaturniveau überschritten, so wird der Rest der Abwärme mit dem Abgas abgeführt.

Das zweite zentrale Element des Energiesystems sind der Heizungsspeicher (Abbildung 1, Nummer 3) und der Trinkwarmwasserspeicher (Abbildung 1, Nummer 4). Diese werden dazu genutzt, die durchgehend erzeugte thermische Energie in möglichst großer Menge zu speichern. Der Heizungsspeicher ist als Schichtenspeicher

modelliert, um so zum einen in jedem Beladungszustand die Versorgung des Gebäudes mit Heizungswasser auf der gewünschten Temperatur bereitzustellen. Ebenso wird so eine möglichst geringe Vorlauftemperatur zur Brennstoffzelle gewährleistet, die für eine höhere Wärmeausbeute der Brennstoffzelle sorgt. Der Trinkwarmwasserspeicher ist ebenfalls als Schichtenspeicher ausgeführt und mit einem Wärmeübertrager versehen, um die Trennung zwischen Heizmedium und Warmwasser zu gewährleisten. Die Wärmeverluste der Speicher werden durch einen physikalischen Wärmeübergang berücksichtigt. Die Umgebungstemperatur des Speichers wird als konstant angenommen.

Um zum einen der vergleichsweise geringen Wärmeauskopplung aus der Brennstoffzelle zu begegnen und zum anderen auch eine Versorgungssicherheit zu gewährleisten, wird in das System ein Brennwertkessel als Spitzenlastkessel (Abbildung 1, Nummer 5) integriert. Dieser ist als idealer Kessel realisiert und soll auch bei Unterdeckung in den Heizungsspeicher einspeisen. Wenn die Temperatur im Trinkwarmwasserspeicher oder im Heizungsspeicher zu gering wird, wird der Kessel zugeschaltet, da dies der Anhaltspunkt für eine nicht mehr gegebene Wärmeversorgung durch die Brennstoffzelle ist.

Neben den technischen Anlagen spielt das Nutzerverhalten (Abbildung 1, Nummer 6) eine Rolle bei der Bewertung des Systems. Für die hier vorgestellte Modellierung wird für die internen Lasten im Gebäude ein konstanter Wert angenommen. Ebenso wird für den Luftwechsel ein konstanter Wert angenommen. Für den Warmwasserbedarf wird ein zeitlich aufgelöstes, an das Nutzerverhalten angepasstes, Zapfprofil verwendet.

Auch die Wettereinflüsse werden berücksichtigt (Abbildung 1, Nummer 7). Hier sind vor allem die Außentemperatur, die solare Einstrahlung und die Windgeschwindigkeiten zu nennen.

### Simulationsparameter und untersuchte Varianten

Für die Untersuchungen wird ein Haus gewählt, das nach der Energieeinsparverordnung 2009 errichtet wurde. Dies ist damit zu begründen, dass der Wärmebedarf in einem solchen Haus vergleichsweise gering ist und somit der Anteil der Wärme aus der Brennstoffzelle möglichst hoch sein kann. Des Weiteren sind die Vorlauftemperaturen für das Heizsystem vergleichsweise gering. Somit können an dieser Art des Hauses die Potenziale und möglichen Einsparungen gut dargestellt werden.

Im Bereich der Speicher sollen zwei Varianten untersucht werden. Dies ist zum einen eine Konstellation aus einem 1000-Liter-Speicher für die Heizung und einem 300-Liter-Speicher für die

Warmwasserbereitung (Variante A). Zum anderen ist dies eine kleinere Auslegung mit einem 500-Liter-Speicher für die Heizung und einem 300-Liter-Speicher für die Warmwasserbereitung (Variante B). Die Speicher sind mit einer Dämmung von 120 mm (Heizungsspeicher) bzw. 50 mm (Warmwasserspeicher) versehen. Die angenommene konstante Umgebungstemperatur liegt bei 15 °C.

Das Nutzerverhalten wird mit einem konstanten Wert für die internen Lasten mit 2,56 W/m<sup>2</sup> berücksichtigt. Der Luftwechsel wird mit 0,5 1/h angesetzt. Diese beiden Werte entstammen der Norm DIN V 18599, der Berechnungsgrundlage der Energieeinsparverordnung (Deutsches Institut für Normung, 2007). Ebenfalls nach dieser Norm werden die Wärmebrücken mit 0,05 W/m<sup>2</sup><sub>Bauteil</sub> angesetzt. Die Warmwasserzapfprofile werden mit der Software DHWCalc berechnet (Jordan et al., 2005).

Für die Modellierung des Wetters wird auf die Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes zurückgegriffen (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2011), die in einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde Wetterdaten wie die Temperatur, die solare Einstrahlung oder die Windgeschwindigkeiten bereitstellen.

Neben einem durchgängigen Betrieb der Brennstoffzelle auf einem Niveau, wird zum anderen eine Betriebsvariante mit einem saisonalen Unterschied betrachtet. Hier wird eine andere Fahrweise für die Monate Mai bis September vorgesehen, da hier allein der Wärmebedarf durch Warmwasserbereitung vorhanden ist und zum anderen auch die zu erwartenden Mengen an Photovoltaikstrom deutlich höher sind als die Mengen im Winter. In Tabelle 1 sind die untersuchten Betriebsmodi aufgelistet.

*Tabelle 1  
Leistungen der untersuchten Betriebsvarianten*

VARIANTE	P <sub>EL</sub> WINTER (W)	P <sub>EL</sub> SOMMER (W)
0	Nur Kessel	Nur Kessel
1	2000	2000
2	2000	0
3	1500	1500
4	1500	0
5	2000	500
6	1500	500
7	2000	1500
8	4000	4000
9	3000	3000
10	4000	1000

11	3000	1000
12	4000	3000

Es gibt bereits eine am Markt verfügbare Brennstoffzelle, an die die hier modellierte angelehnt wird. Diese kann jedoch im Dauerbetrieb mit maximal 1,5 kW<sub>el</sub> betrieben werden. Um jedoch die vor allem für die Wärmeversorgung interessante höhere Wärmeausbeute beim Betrieb mit 2 kW<sub>el</sub> zu untersuchen, soll diese Variante ebenfalls betrachtet werden. Des Weiteren wird ein Betrieb der Anlage mit der doppelten Leistung analysiert. Die Verfügbarkeit einer solchen Anlage ist zwar noch nicht gegeben, aber auf Grund der modularen Bauweise von Brennstoffzellen sollte es technisch kein Problem darstellen, eine Anlage mit der doppelten Leistung zu entwickeln und zu bauen. Die in dieser Arbeit berücksichtigten Zusammenhänge zwischen elektrischer und thermischer Leistung sind in Tabelle 2 zu sehen.

*Tabelle 2*  
*Zuordnung von elektrischer zu maximaler*  
*thermischer Leistung der betrachteten Anlagen sowie*  
*dem elektrischen Wirkungsgrad*

P <sub>EL</sub> (W)	P <sub>MAX,TH</sub> (W)	EL. WIRKUNGSGRAD
500	350	40 %
1500	560	60 %
2000	1000	58 %
1000	700	40 %
3000	1120	60 %
4000	2000	58 %

Die thermischen Leistungen für die Varianten mit 1000 W, 3000 W und 4000 W bezeichnen jeweils die Werte, die bei einer Anlage mit der doppelten Leistung der momentan verfügbaren Anlage erreicht werden können. Somit ist bei einer Verdopplung der elektrischen Leistung auch eine Verdopplung der thermischen Leistung die Folge. Dies führt dazu, dass die doppelte Anlage mit einer elektrischen Leistung von 1000 W eine höhere thermische Leistung liefert als die einfache Anlage mit einer elektrischen Leistung von 1500 W. Es ist außerdem zu sehen, dass die thermische Leistung im Leistungsbereich zwischen 1500 W und 2000 W elektrischer Leistung nochmals stark ansteigt, was einen Betrieb bei 2000 W elektrischer Leistung für die Wärmeversorgung erstrebenswert werden lässt, da der elektrische Wirkungsgrad nicht signifikant absinkt. Dieser Betriebspunkt wird bei der aktuell verfügbaren Anlage aber nicht empfohlen, da der Brennstoffzellenstack dann sehr schnell degradiert,

was zu Problemen mit der Kühlung führt und letztendlich einen schnellen Austausch des Stacks nach sich ziehen wird.

Jede der verschiedenen Betriebsvarianten wird mit beiden Speichervarianten simuliert, um hier neben dem Vergleich der verschiedenen Betriebsvarianten eine Einschätzung zu bekommen, welchen Einfluss die Speichergröße auf den Betrieb und den Energiebedarf hat.

Als Referenzvariante wird noch eine Variante, die nur mit Kessel betrieben wird, gewählt. Diese Betrachtung wird ohne Pufferspeicher vorgenommen und nur ein Trinkwarmwasserspeicher mit einem Volumen von 300 Litern berücksichtigt.

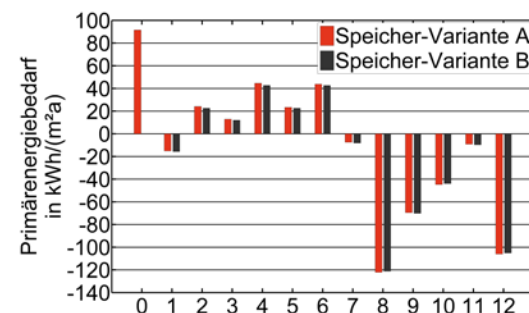
## ERGEBNISSE

### Primärenergetische Bewertung

Die primärenergetische Bewertung wird nach folgender Gleichung vorgenommen.

$$(1) \quad W_{PE} = (W_{Gas,Kessel} + W_{Gas,BZ}) \cdot f_{PE,Gas} - W_{el} \cdot f_{PE,el}$$

Hierbei bezeichnet W<sub>PE</sub> den Primärenergiebedarf, W<sub>Gas,Kessel</sub> den Bedarf an Gas, der noch für den Zusatzheizkessel besteht, W<sub>Gas,BZ</sub> den Bedarf an Gas für die Brennstoffzelle, W<sub>el</sub> den erzeugten elektrischen Strom und f<sub>PE,Gas</sub> und f<sub>PE,el</sub> die Primärenergiefaktoren von Erdgas bzw. elektrischem Strom. Der Primärenergiefaktor von Strom wird mit 2,6 angenommen und der Primärenergiefaktor von Erdgas mit 1,1.



*Abbildung 2: Primärenergiebedarf für die betrachteten Varianten*

In Abbildung 1 ist der Primärenergiebedarf für verschiedene Varianten dargestellt. Es ist zu sehen, dass je nach Variante ein negativer Primärenergiebedarf ermittelt werden kann. Dies ist insbesondere der Fall für alle Varianten mit vergrößerter Leistung gegenüber der aktuell verfügbaren Anlage (Varianten 8-12). Aber auch die Anlagenkonfigurationen 1 und 7 weisen einen negativen Primärenergiebedarf auf. Dies sind die beiden Varianten, in denen die Anlage mit einer Leistung von 2 kW<sub>el</sub> im Winter und zusätzlich im

Sommer mit 2 kW<sub>el</sub> bzw. 1,5 kW<sub>el</sub> betrieben werden. Dies zeigt, dass ein Betrieb der Anlage mit 2 kW<sub>el</sub> primärenergetisch deutliche Vorteile bringt. Für die momentan bereits verfügbare Anlage in diesem Leistungsbereich wird der Betrieb mit 2 kW<sub>el</sub> aber wie bereits beschrieben vom Hersteller nicht empfohlen. Daher müssen die Varianten mit diesem Betrieb gesondert betrachtet werden.

Generell ist anzumerken, dass alle Varianten mit Betrieb im Sommer primärenergetisch den Varianten mit Abschaltung im Sommer überlegen sind. Es sollten also Konzepte entwickelt werden, wie der eventuell nicht benötigte Strom effizient genutzt werden kann, anstatt die Anlagen für bestimmte Zeiträume auszuschalten.

Die Untersuchung mit verschiedenen Größen für den Wärmespeicher ergibt, dass die Speichergröße keinen entscheidenden Einfluss auf den Primärenergiebedarf hat. Der größere Speicher ist jedoch nur für die Varianten 8, 10 und 12 die bessere Variante. Dies sind die Varianten, bei denen die Anlage zumindest im Winter mit 4 kW<sub>el</sub> betrieben wird. Die Unterschiede im Primärenergiebedarf sind aber in allen 12 Varianten sehr gering.

Für heute bereits vorhandene Brennstoffzellensysteme, die im angegebenen Betriebspunkt betrieben werden, kann mit dieser Anlagenkonfiguration im Idealfall (Variante 3) ein Primärenergiebedarf von 13 kWh/(m<sup>2</sup>a) erreicht werden. Wenn man davon ausgeht, dass die Anlage dupliziert werden kann, ohne dass eine weitere technische Entwicklung notwendig ist, kann mit den betrachteten Varianten im Idealfall (Variante 9) ein Primärenergiebedarf von -70 kWh/(m<sup>2</sup>a) erreicht werden. Das bedeutet, dass prinzipiell mit bereits jetzt vorhandener Technik ein deutlich negativer Primärenergiebedarf ausgewiesen werden kann.

### Kesselnutzung

Neben der reinen primärenergetischen Bewertung soll nun analysiert werden, inwiefern durch die vorgestellte Lösung der Einsatz eines Zusatzkessels/Zusatzbrenners heruntergefahren werden kann. Dies ist neben der rein bilanziellen primärenergetischen Betrachtung der entscheidende Aspekt zur energetischen Beurteilung des Systems. Die Abwärmenutzung aus dem hocheffizienten stromerzeugenden Prozess sollte so viel Wärme wie möglich aus einer konventionellen Wärmeerzeugung ersetzen. Daher soll nun untersucht werden, welchen Beitrag ein Kessel noch zur Versorgung des Gebäudes mit Wärme beitragen muss.

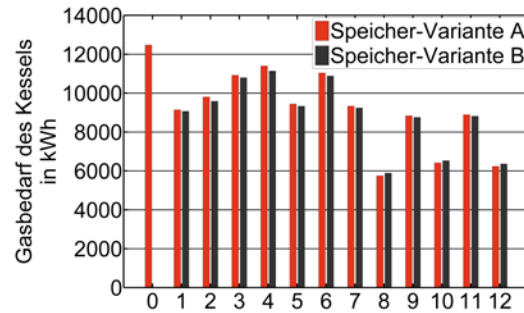


Abbildung 3: Gasbedarf des Zusatzkessels

Abbildung 2 zeigt die Gasmenge, die über das Jahr noch zusätzlich für die Verwendung des Kessels benötigt wird. Es ist zu sehen, dass die Varianten, die primärenergetisch am besten zu bewerten waren (Varianten 8, 10 und 12), auch die geringste Menge an zusätzlichem Erdgas benötigen. Der Bedarf sinkt hier für die beste Konstellation (Variante 8) auf einen Bedarf von ca. 5750 kWh. Dies würde eine Reduktion um 54 % bedeuten. Wie bereits erwähnt, sind nicht alle Varianten und speziell die genannten 8, 10 und 12 momentan technisch noch nicht im Dauerbetrieb umsetzbar. Daher müssen die anderen Varianten genauer betrachtet werden und hier schneidet die Variante 9 am besten ab. Das bedeutet, dass auch für einen möglichst weit reduzierten Kesseleinsatz die Variante mit einer kontinuierlich betriebenen Brennstoffzelle mit 3 kW<sub>el</sub> gewählt werden sollte. Der Gasbedarf liegt dann bei 8750 kWh. Dies sind ungefähr 70 % des Bedarfs, den das Haus ohne die KWK-Versorgung hätte. Somit können mit dieser Konstellation ca. 30 % an Erdgas eingespart werden. Allerdings ist dies im Vergleich zum Potential, dass die Varianten 8, 10 und 12 bieten würden, vergleichsweise wenig. Dies ist vor allem auf die geringere thermische Leistung der Anlage im Betrieb mit 3 kW<sub>el</sub> gegenüber dem Betrieb mit 4 kW<sub>el</sub> zurückzuführen.

Dass die Gasmenge, die noch im Spitzenlastkessel genutzt werden muss, bei allen betrachteten Varianten noch immer auf einem hohen Niveau liegt, ist auf die Nicht-Nutzbarkeit der thermischen Energie in der Brennstoffzelle durch zu hohe Vorlauftemperaturen zur Brennstoffzelle zurückzuführen. Auch die thermischen Verluste in beiden Speichern führen dazu, dass trotz der Wärmeauskopplung aus der durchlaufenden Brennstoffzelle noch ein signifikanter Anteil an Kesselfeuerung beibehalten werden muss.

### Eigenstromnutzung und Einspeisung von elektrischer Energie in das Niederspannungsnetz

In diesem Abschnitt soll analysiert werden, welche Menge an elektrischem Strom in das Netz eingespeist und welche Menge der Haushalt noch aus dem elektrischen Netz beziehen muss. Dies ist vor allem

im Hinblick auf die zukünftige Struktur der Übertragungsnetze von Bedeutung. Zeitlich aufgelöste Strombedarfsprofile werden mit Hilfe von Profilen aus Großbritannien erstellt (Richardson et al., 2010). Da die Nutzung des Stroms nicht direkt mit der thermischen Verwendung gekoppelt ist, sind hier auch die einzelnen Varianten nur einfach zu betrachten.

In Abbildung 3 ist zu sehen, dass die Menge an eingespeister elektrischer Energie sehr stark variiert. Dies ist dadurch zu erklären, dass zum einen Betriebsvarianten mit und ohne Abschaltung betrachtet wurden und zum anderen auch unterschiedliche Größen an Anlagen genutzt werden. Die größte Menge an eingespeistem elektrischem Strom weist die Variante 8 auf, bei der insgesamt ca. 31000 kWh an elektrischem Strom in das elektrische Netz eingespeist werden. Demgegenüber werden bei Variante 4 nur insgesamt 5650 kWh in das elektrische Netz eingespeist. Dies hängt zum einen damit zusammen, dass die Anlage statt bei einer Maximalleistung von  $4 \text{ kW}_{\text{el}}$  mit einer Maximalleistung von  $1,5 \text{ kW}_{\text{el}}$  betrieben wird und zum anderen auch damit, dass diese Anlage im Sommer ausgeschaltet wird. Je weniger elektrische Energie eingespeist wird, desto weniger Möglichkeiten für eine weitere Nutzung wie beispielsweise durch Wärmepumpen können genutzt werden. Bereits mit der Menge von 5650 kWh eingespeistem elektrischem Strom könnte bei einer Jahresarbeitszahl von ca. 3 ein Haus, mit einem ähnlichen Wärmebedarf wie dem betrachteten, in die Größenordnung der Wärmedeckung kommen. Bei dieser Betrachtung wäre allerdings noch keine jahreszeitliche Unterscheidung berücksichtigt, wodurch sich die Berechnungen noch verschieben können.

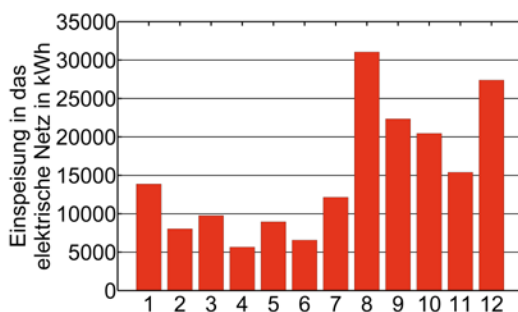


Abbildung 4: Eingespeiste elektrische Energie

Neben der Menge an eingespeistem elektrischem Strom ist auch die Menge an von außen bezogenem elektrischem Strom von Bedeutung. Diese ist für das betrachtete Haus in Abbildung 5 zu sehen.

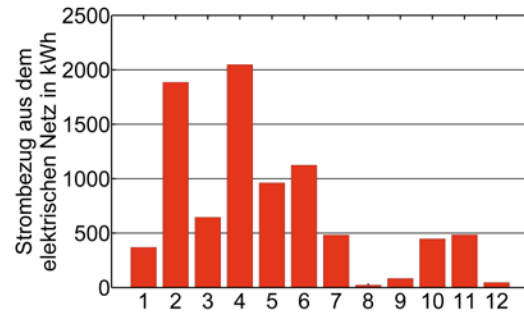


Abbildung 5: Strombezug aus dem elektrischen Netz

Durch die teilweise sehr hohen elektrischen Leistungen können einige Varianten fast komplett ohne Strombezug aus dem elektrischen Netz auskommen. Die Varianten 8, 9 und 12 weisen Strombezüge aus dem Netz von jeweils unter 100 kWh auf, wobei Variante 8 den geringsten Bedarf mit 23 kWh erreicht. Das zeigt, dass ein solches Gebäude mit der richtigen Ausstattung als fast reiner Stromlieferant für andere Applikationen dienen kann. Die Kopplung des Gebäudes an das elektrische Netz wird aber natürlich trotzdem benötigt, um Lastspitzen abzufangen und auch eine Versorgungssicherheit zu gewährleisten.

## FAZIT

Mit den hier analysierten Gesamtsystemen kann gezeigt werden, dass Mikro-KWK-Anlagen auf Brennstoffzellenbasis einen Beitrag zur Reduktion des Verbrauchs von fossilen Energieträgern beitragen können. Das hier vorgestellte System weist einen maximalen elektrischen Wirkungsgrad auf, der mit den besten konventionellen Großkraftwerken konkurrieren kann. Somit ist jede Nutzung der Abwärme zusätzlich zu dieser hohen elektrischen Ausbeute wünschenswert. Aufgrund der jahreszeitlichen Schwankungen im Wärmebedarf sind bei den Anlagen, die die besten primärenergetischen Werte aufweisen, auch die höchsten thermischen Verluste zu verzeichnen. Die primärenergetisch am besten bewerteten Systeme haben auch die größte elektrische sowie thermische Leistung und haben dadurch auch die größten thermischen Verluste. Trotz des Einsatzes größerer Anlagen ist so der Bedarf an Zusatzheizungen trotz der großen möglichen Wärmeauskopplung noch groß.

Neben der primärenergetischen Betrachtung muss somit auch das Potential zur Reduktion des Einsatzes eines Zusatzheizkessels beachtet werden, da dies neben der rein bilanziellen Berechnung auch berücksichtigt, welche Menge des fossilen Energieträgers Erdgas bei der Beheizung durch diese Anlage eingespart werden kann. Hier können mit heute bereits verfügbaren Systemen bereits Einsparungen von ca. 30 % erreicht werden. Allerdings ist aufgrund der insgesamt geringen

thermischen Auskopplung hier noch weiteres Potential, die Verluste zu minimieren und somit auch den Kesseleinsatz zu verringern.

In den energetischen Betrachtungen zeigt sich, dass eine Anlage mit einem solch hohen elektrischen Wirkungsgrad kontinuierlich betrieben werden sollte. Dies wirkt sich sowohl positiv auf die Primärenergiebilanz aus als auch positiv auf das benötigte Erdgas im Zusatzkessel. Zusätzlich kann so der Bezug an Strom aus dem elektrischen Netz verringert werden, was das Haus bei einer entsprechenden Dimensionierung dann zu einem fast reinen Stromexporteur machen kann.

### AUSBLICK

Um die Dynamik des vorgestellten Systems weitergehend zu betrachten, sollten die verwendeten Anlagensimulationsmodelle mit Messdaten abgeglichen werden, um so die Berechnungsgenauigkeit weiter zu verbessern. Die Berechnung ist zwar nach Herstellerangaben geschehen, die Anpassung des Modells auf verschiedene Rücklauftemperaturen bedarf allerdings noch weiterer Validierungen.

Des Weiteren sollte das Verhalten der Anlagen in Rückkopplung mit dem elektrischen Netz betrachtet werden. Hier sollte vor allem der bereits im Text erwähnte Aspekt der Nutzung von überschüssigem Strom in einem zweiten oder in manchen Fällen auch dritten Gebäude gleicher Art betrachtet werden. Hierbei können dann auch in anderen Gebäuden beispielsweise elektrisch betriebene Wärmepumpen im Rahmen eines Demand Side Managements eingebunden werden.

Auch die Einbindung größerer Mengen an regenerativen Quellen sollte einbezogen werden, um zu untersuchen, welchen Beitrag die Anlagen zu einem zukünftigen effizienten Energiesystem leisten können.

Es sollten auch andere Typen von Gebäuden betrachtet werden, vor allem solche, die im Rahmen der weiter fortschreitenden Gesetzgebung im Bereich der Energieeffizienz für Gebäude strengere Kriterien erfüllen müssen als das hier betrachtete. Dies würde zu einem weiter sinkenden Wärmebedarf für die Heizung führen und könnte ein solches System verbessern, vor allem im Hinblick auf die benötigten Erdgasmengen zur Zusatzheizung.

Neben den reinen technischen Aspekten sollte in zukünftigen Betrachtungen auch untersucht werden, wie sich ein unterschiedliches Nutzerverhalten im Gebäude auf die Effizienz des Gebäudes auswirkt.

### LITERATUR

AG Energiebilanzen e.V. 2011 Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2009 und 2010

Jordan, U., Vajen, K. 2005. DHWcalc: Program to generate domestic hot water profiles with statistical means for user defined conditions., Proc. ISES Solar World Congress, Orlando (US)

Deutsches Institut für Normung 2007: DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung.

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung 2011: Aktualisierte und erweiterte Testreferenzjahre (TRY) von Deutschland für mittlere und extreme Witterungsverhältnisse.

Richardson, I. et al. 2010: Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model, Energy and Buildings