

## **Simulationsbasierte Entwicklung von Regelungsstrategien zur optimierten Einbindung von erdgasbetriebenen netzgekoppelten Brennstoffzellen-BHKWs in teilsolare Energieversorgungssysteme von Gebäuden**

Dipl.-Ing. Matthias Vetter, Dr.-Ing. Christof Wittwer  
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Oltmannsstr.5, 79100 Freiburg  
e-mail: vetter@ise.fhg.de, Internet: <http://www.ise.fhg.de>

### **Abstract**

Fuel cell power station for domestic supply: This is a very efficient way to produce electricity and heat where it is consumed. This paper describes the combination of a fuel cell system powered by natural gas and a solar thermal system. Based on simulations realized with the simulation environment [ColSim] a predictive control strategy using the 'Fuzzy Logic' has been developed. Inputs like weather forecasts and specific load profiles are considered. To get reliable results, it is necessary to use characteristics of all active components such as pumps, ventilators, their controllers and their consumption. Therefore we realized a modular dynamic model of the fuel cell system in [ColSim]. The investigated facility is recommended as one possible configuration including a fuel cell power station and a solar thermal system. Using the energy data base of a 'Low Energy Consumption House', monitored by the German energy supply company EnBW, simulations have been carried out. Operation characteristics of a typical day in winter are shown and problems which occur in summer are finally discussed. A priority objective can be determined: Primary maximize solar gains and thereafter use fossil energy with a high performance ratio.

### **Motivation**

Durch die Verbindung von teilsolaren Energieversorgungssystemen mit erdgasbetriebenen netzgekoppelten Brennstoffzellen-BHKWs lassen sich zukünftig die Schadstoff- und  $CO_2$ -Emissionen von Gebäuden weiter reduzieren. Die in diesem Beitrag vorgestellte Variante beinhaltet die Kopplung einer solarthermischen Anlage mit einem Niedertemperatur-Brennstoffzellen-Stack. Dies impliziert externe Reformierungsstufen, um aus Methan, der Hauptkomponente des Erdgases, ein wasserstoffreiches Produktgas für den Niedertemperatur-Brennstoffzellentyp PEM (Polymere Electrolyte Membrane) bereit zu stellen. Wesentlicher Bestandteil für einen hohen Systemwirkungsgrad und einer damit verbundenen Primärenergieeinsparung einer solchen Anlage ist eine optimierte Systemregelung. Diese umfasst sowohl die Komponentenregelungen als auch die übergeordneten Regelungsstrategien. Durch die Vernetzung einer derartigen Anlage mit dem Internet stehen wichtige Führungsgrößen wie zum Beispiel die aktuelle Wetterprognose und die tageszeitabhängigen Gas- und Stromtarife zur Verfügung. Eine prädiktive Betriebsführung zur Regelung von elektrischer und thermischer Energie kann auf der Grundlage dieser Datenbasis realisiert werden. Weiterhin ist das individuelle Nutzerverhalten von Bedeutung und wird dem vorgestellten Betriebsführungskonzept als Prognose zur Verfügung gestellt. Die wesentlichen Zusammenhänge der einzelnen Energiequellen und Senken sind in Abbildung 1 in einem Blockschaltbild dargestellt.

### **Methodik und Simulationswerkzeug**

Mit Hilfe der am Fraunhofer ISE entwickelten modularen Simulationsumgebung [ColSim] können Energieversorgungsanlagen abgebildet, simuliert, optimiert und evaluiert werden. Dazu notwendig ist die Entwicklung von dynamischen Modellen der einzelnen Komponenten wie beispielsweise Brennstoffzelle, Reformier, Solarkollektor, Speicher, Pumpen, Gebläse und Regler. Eine modellbasierte Regelungsentwicklung wird durch diesen Ansatz möglich. Neben den übergeordneten Betriebsstrategien können auch untergeordnete Regelungsaufgaben untersucht werden. Es ist somit möglich, komplexe Energieversorgungsanlagen ganzheitlich bezüglich Energieeinsatz, Energieertrag

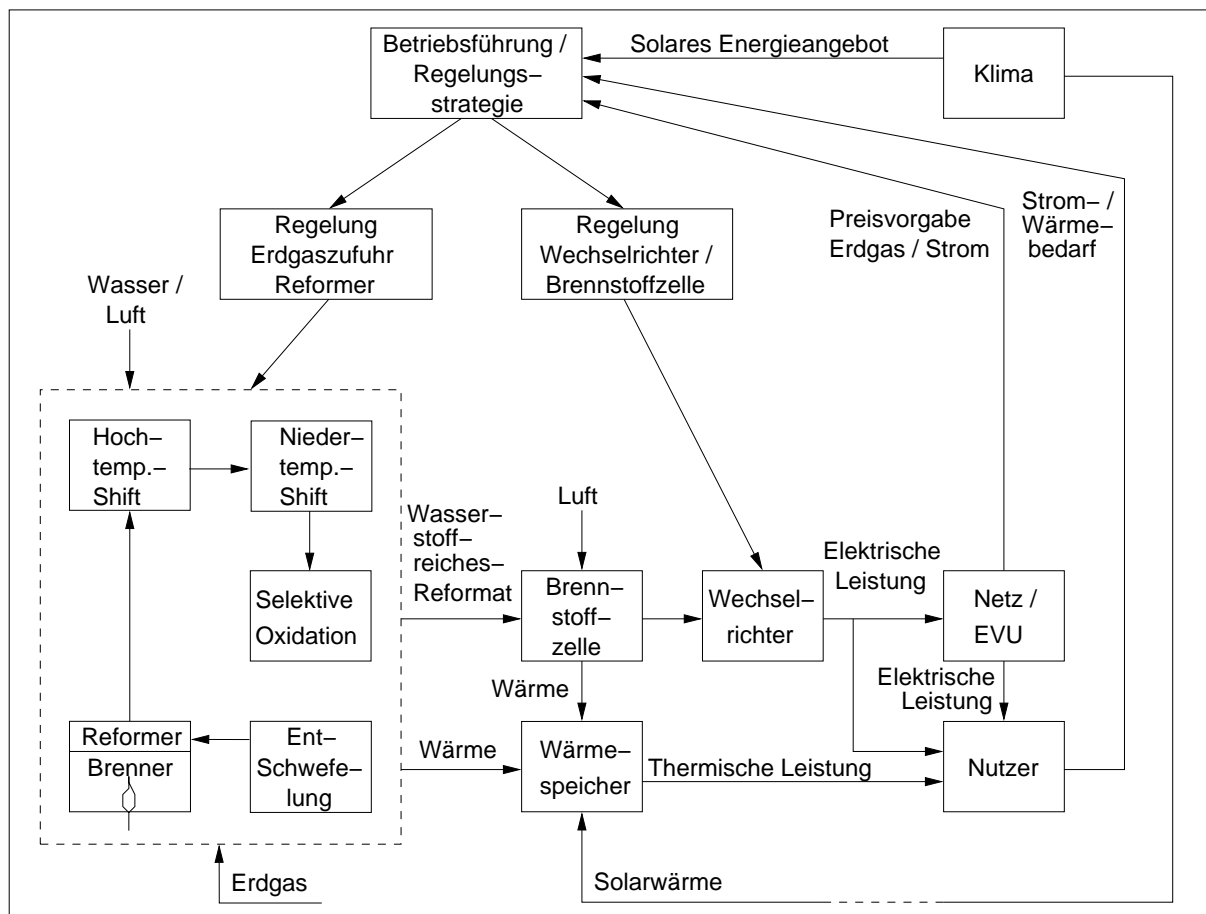


Abbildung 1: Einbindung des erdgasbetriebenen Niedertemperatur-Brennstoffzellen-BHKWs in das teil-solare Energieversorgungssystem eines Gebäudes. Inhalt der regelungstechnischen Untersuchung ist das Brennstoffzellen-BHKW.

und Eigenverbrauch von Aggregaten zu bewerten. Die in ANSI C entwickelten Regelungsalgorithmen können bei der Realisierung des gekoppelten Energieversorgungssystems direkt auf die Regelungsplattform portiert werden. Die Zielplattform stellt ein 'Embedded System' mit dem 'Multitasking-Betriebssystem' Linux dar, dessen Leistungsfähigkeit die prädiktiven Regelungsansätze sowie die Intranetvernetzung ermöglicht.

### Modellierung und Betriebsführung des erdgasbetriebenen Brennstoffzellen-BHKWs

Für die Simulationsstudien und die modellbasierte Regelungsentwicklung sind in [ColSim] neben dem Brennstoffzellen-Stack, dem Reformer und dem Wechselrichter sämtliche energetisch relevanten Aggregate inklusive ihrer Regler abgebildet. Die Regelungsaufgaben des BHKWs werden von der in Abbildung 2 dargestellten UNIT 'BHKW\_control' wahrgenommen. Der Sollwert der Leistung wird von der übergeordneten UNIT 'predictor' vorgegeben. Als Entscheidungsgrundlage dienen Wetterprognosen und das aus der 'Vergangenheit' generierte Nutzerprofil.

Prinzipiell kann bei einem Blockheizkraftwerk zwischen einer strom- und wärmegeführten Betriebsweise unterschieden werden. Die in diesem Beitrag vorgestellte Variante stellt eine Kombination aus beiden Ansätzen dar. Als übergeordnete Zielvorgabe wird die Deckung des Wärmebedarfes des zu versorgenden Gebäudes definiert. Der untergeordnete stromgeführte Betrieb muss durch die Verfügbarkeit eines Speichers die über den Zeitraum eines Tages kumulierte Wärmemenge des Heiz- und Warmwasserbedarfes liefern.

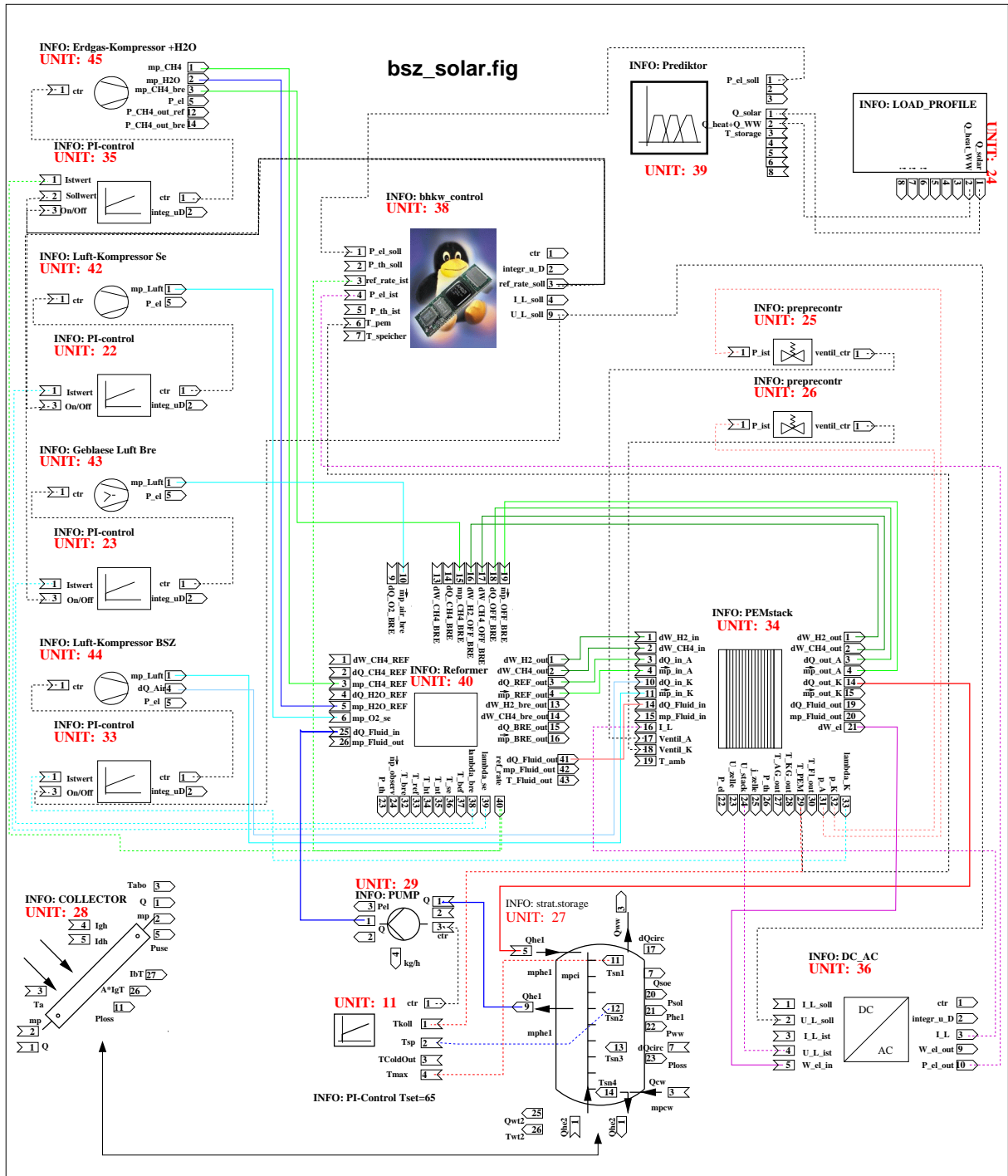


Abbildung 2: Regelungstechnische Modellierung des teilsolaren Energieversorgungssystems bestehend aus einer solarthermischen Anlage und einem erdgasbetriebenen Niedertemperatur-Brennstoffzellen-BHKW.

Ein Brennstoffzellen-BHKW besitzt nach dem heutigen Stand der Technik\* (vgl. Abbildung 3) im Nennbetriebspunkt den höchsten Primärenergieausnutzungsgrad (elektrisch und thermisch). Wird das Brennstoffzellen-BHKW zu elektrischen Spitzenlastzeiten (vgl. [EnBW-2]) im Vollastbetrieb

\*Als Grundlage dienen die Kenndaten einer 'nicht-optimierten' Demonstrationsanlage. Der elektrische Wirkungsgrad lässt sich unter anderem durch ein optimiertes Stack-Design und durch die Weiterentwicklung der Hilfsaggregate verbessern.

gefahren, so stellt dies nicht nur eine ökologische sondern auch aufgrund einer höheren Einspeisevergütung eine ökonomische Betriebsführung dar.

Im Teillastbetrieb wird durch den besseren elektrischen Wirkungsgrad des Brennstoffzellen-Stacks weniger Abwärme erzeugt. Der höhere elektrische Brutto-Ertrag wird jedoch durch das schlechte Teillastverhalten der Hilfsaggregate kompensiert, so dass der elektrische Netto-Ertrag und damit auch die Primärenergieausnutzung absinkt.

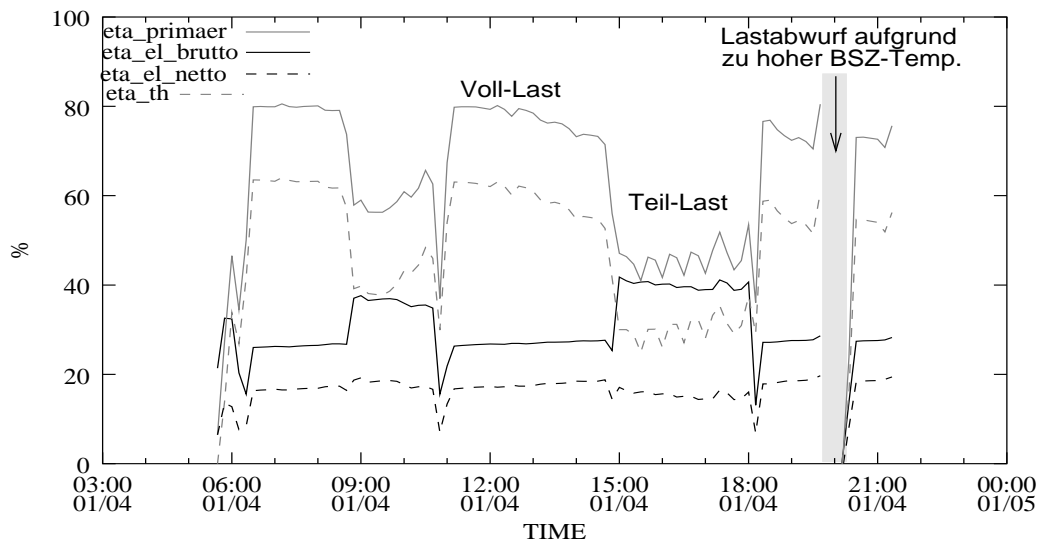


Abbildung 3: Elektrischer beziehungsweise thermischer Wirkungsgrad und Primärenergieausnutzung des erdgasbetriebenen Brennstoffzellen-BHKWs.

### Dimensionierung der Anlage

Die Energieversorgungsanlage ist für ein existierendes Niedrigenergiehaus, das bezüglich des Energieverbrauches vom Energiedienstleister EnBW [EnBW-1] messtechnisch erfasst wird, konzipiert. In den Simulationsrechnungen wird ein Energiekonzept benutzt, bei dem ein Brennstoffzellen-BHKW und eine solarthermische Anlage zur Deckung des Wärmebedarfes (Heizung und Warmwasser) zur Verfügung stehen. Um thermische Lastspitzen decken zu können, wird ein verhältnismäßig großer Speicher eingesetzt:

- Brennstoffzellen-BHKW:  $P_{el} = 2 \text{ kW}$ ,  $P_{th} = 6 \text{ kW}$
- Solarkollektor-Anlage:  $A = 6 \text{ m}^2$
- Schichtspeicher:  $V = 1000 \text{ l}$
- Max. therm. Last NE-Haus :  $Q_{th} = 80 \text{ kWh/d}$

### Prädiktive Regelungsstrategie

Die wichtigsten Einflussgrößen für die vorausschauende Regelungsstrategie sind in einem teilsolaren Energieversorgungssystem der zu erwartende solare Energieertrag und die vom Verbraucher angeforderte thermische Energie. Mit Hilfe dieser Größen wird der zeitabhängige elektrische Sollwert ermittelt. Als Basis dient das standardisierte elektrische Lastprofil [EnBW-2]. Dabei wird vorausgesetzt, dass zu Spitzenlastzeiten eine gegenüber Normallastzeiten gesteigerte Einspeisevergütung gewährt wird. Dieses Lastprofil wird von der Anlage adaptiert. Die Amplitude der elektrischen Leistung und damit verbunden der thermische Energieertrag wird von der übergeordneten Betriebsführung vorgegeben. Der dazugehörige Prädiktor ist in diesem Beitrag als 'Fuzzy-Ansatz' realisiert. Die Eingangsgröße 'Prognostizierter Solarer Energieertrag' wird aus der aktuellen Wetterprognose ermittelt, während der 'Prognostizierte Thermische Verbrauch' aus der näheren 'Vergangenheit' gewonnen wird (vgl. Abbildung 4).

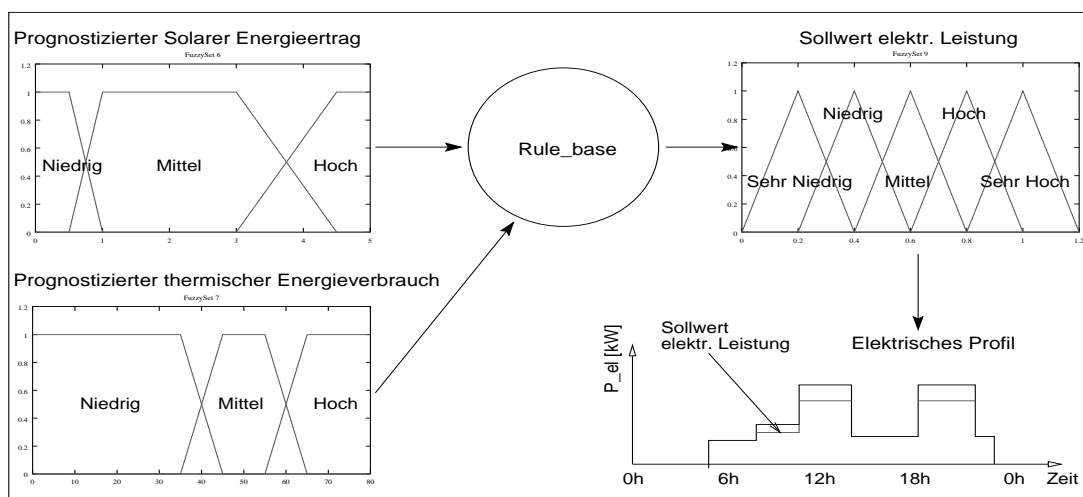


Abbildung 4: 'Fuzzy-Ansatz' zur Ermittlung der Stellgröße 'elektrische Leistung' des Brennstoffzellen-Stacks mit Hilfe der Eingangsgrößen 'Prognostizierter Solarer Energieertrag' und 'Prognostizierter thermischer Energieverbrauch'.

### Simulationsergebnisse

Als Grundlage für die Simulation wurde der Datensatz eines Niedrigenergiehauses [EnBW-1] herangezogen. Das mit Hilfe von [ColSim] konzipierte Energieversorgungssystem besteht aus einer solarthermischen Anlage, einem Brennstoffzellen-BHKW und einem Schichtspeicher (vgl. Abbildung 2). Weitere thermische Energiequellen sind bisher nicht vorgesehen. Aus diesem Grund kann die Regelung des BHKWs dem Sollwert nur folgen, wenn die minimale Speichertemperatur nicht unterschritten wird. Im Falle einer thermischen Überversorgung muss bei einer zu hohen Temperatur im Brennstoffzellen-Stack ebenfalls eine Abweichung von der Sollvorgabe toleriert werden, im 'worst case' führt dies zum Abschalten der Anlage. In Abbildung 5 ist ein Tagesverlauf der Soll- und Istwerte dargestellt. Das Zeitfenster ist dem der Abbildung 3 entsprechend. Es wird deutlich, dass nicht zu jedem Zeitpunkt der Sollwertvorgabe des Prädiktors gefolgt werden kann. Die untergeordnete Anlagenregelung hat somit die Aufgabe die Versorgungssicherheit des Gebäudes zu gewährleisten und das Energieversorgungssystem vor kritischen Betriebszuständen zu schützen.

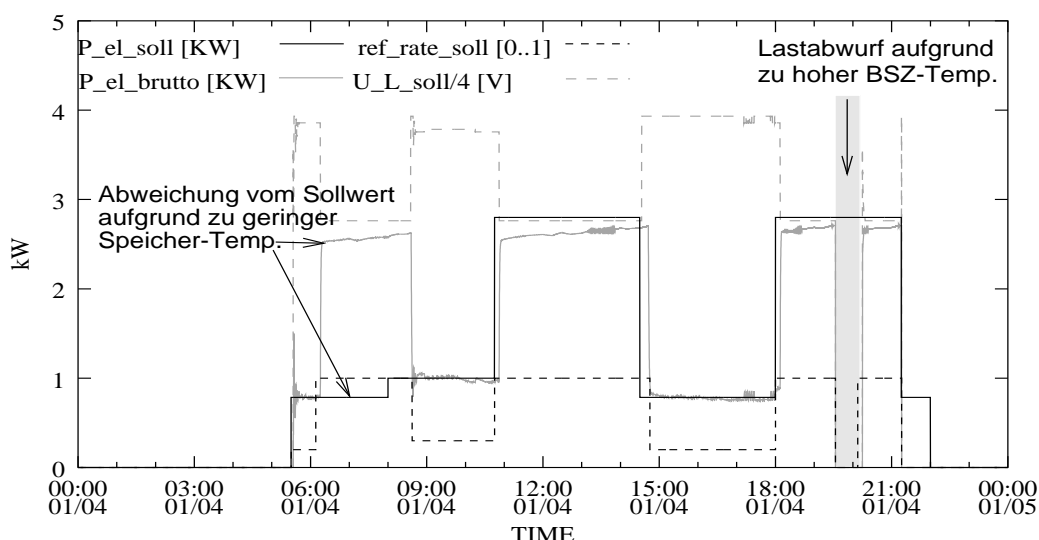


Abbildung 5: Soll- und Istwerte der elektrischen Brutto-Leistung und die dazugehörigen Stellgrößen für Reformer 'ref\_rate\_soll' und Wechselrichter 'U\_L\_soll'.

In Abbildung 6 sind die kumulierten Energieverläufe der Energieversorgungsanlage und die kumulierten Lastgänge des Niedrigenergiehauses für den Zeitraum von 24 Stunden dargestellt. Die mit einer elektrischen Leistung von 2 kW dimensionierte Anlage kann zu den Spitzenlastzeiten des Nutzers nicht alle elektrischen Peaks abfangen, der Bedarf eines Tages kann jedoch gedeckt beziehungsweise entstehender Überschuss ins Netz des EVUs eingespeist werden. Die zur Versorgung des Niedrigenergiehauses benötigte Wärme (Heizung und Warmwasser) wird von dem Brennstoffzellen-BHKW und der solarthermischen Anlage bereitgestellt.

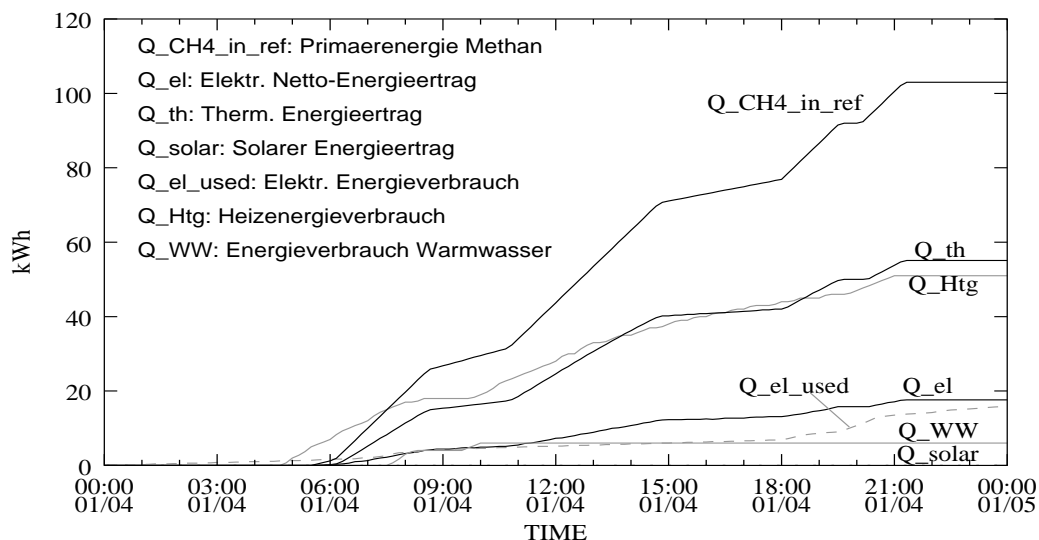


Abbildung 6: Kumulierte Energieverläufe des Brennstoffzellen-BHKWs, der solarthermischen Anlage und die kumulierten Lastgänge des betrachteten Niedrigenergiehauses an einem kalten Wintertag.

### Ausblick

Im vorgestellten Ansatz wird die Energieversorgung eines Niedrigenergiehauses mit einer solarthermischen Anlage und einem erdgasbetriebenen Brennstoffzellen-BHKW realisiert. Aufgrund fehlender Zusatzheizthermen wird die Anlagengröße für den Winter ausgelegt. Dies impliziert jedoch eine Überdimensionierung für den Sommerfall. Um die Gesamtemission an  $CO_2$  mit Hilfe der solarthermischen Anlage zu minimieren, sollte das BHKW im Sommer nur zur Kompensation eines möglichen thermischen Defizits in Betrieb genommen werden. Ausschließlich die elektrische Energie zu nutzen, ist bei den derzeitigen elektrischen Wirkungsgraden (vgl. Abbildung 3) nicht sinnvoll. Eine Photovoltaik-Anlage dagegen könnte das vorgestellte Konzept vervollständigen und den elektrischen Bedarf im Sommer decken. Dabei können Komponenten wie beispielsweise der Wechselrichter für die Photovoltaik-Anlage und den Brennstoffzellen-Stack gemeinsam genutzt werden.

### Literatur

- [AMPHLETT] J.C. Amphlett, R.M. Baumert, R.F. Mann, B.A. Peppley, P.R. Roberge. Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell. I. Mechanistic Model Development, J. Electrochemical Soc., 142 (1995), No. 1, S.1-8. II. Empirical Model Development, J. Electrochemical Soc., 142 (1995), No. 1, S. 9-15.
- [C.WITTEWER] C. Wittwer. ColSim - Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen. Dissertation Universität Karlsruhe (TH) 1999. <http://www.ubka.uni-karlsruhe.de>.
- [EnBW-1] Verbrauchsdaten Niedrigenergie-Doppelhaushälfte, NEGEV-Projekttreffen, Stuttgart, 7.12.2000.
- [EnBW-2] VDE-Lastprofil, NEGEV-Projekttreffen, Stuttgart, 7.12.2000.
- [NGUYEN] T.V. Nguyen, R.E. White. A Water and Heat Management Model of Proton-Exchange-Membrane Fuel Cells. J. Electrochemical Soc., 140 (1993), No. 8, S. 2178-2186.