

# Netzmanagement und Integration von Brennstoffzellen

Prof. Dr.  
Jürgen Schmid  
ISET  
jschmid@iset.uni-kassel.de

Dr. Tim Meyer  
Fraunhofer ISE  
tim.meyer@ise.fraunhofer.de

Dr. Ludwig Jörissen  
ZSW  
ludwig.joerissen@zsw-bw.de

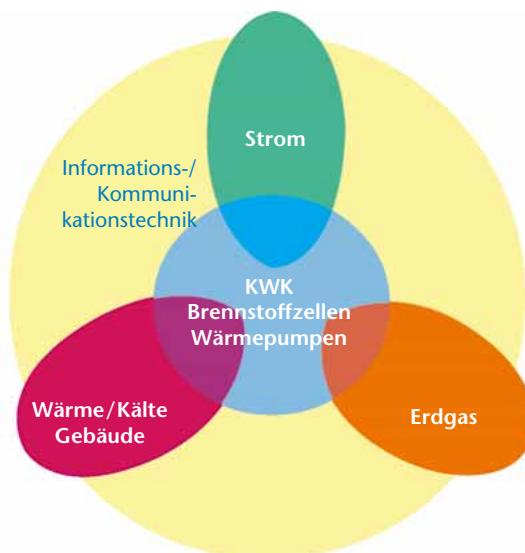
Auf dem Weg zu einer nachhaltigen also auch ökonomischen Energiewirtschaft steht neben dem effizienten Umgang mit Energie die Entwicklung und der zunehmende Einsatz regenerativer Energietechnologien im Mittelpunkt, wie beispielsweise Photovoltaik, Windenergie, Wasserkraft, Solar- und Geothermie oder auch die Nutzung von Biomasse. Es besteht die begründete Aussicht, dass sich mittel- bis langfristig ein Umbau unserer jetzigen Energiewirtschaft, die überwiegend auf fossilen Kohlenwasserstoffen basiert, hin zu einer solaren Stromwirtschaft vollzieht. Dabei kann sich in zunehmendem Maße die Brennstoffzellentechnologie insbesondere im Verkehr sowie in der dezentralen stationären Strom- und Wärmeerzeugung (auf Basis von Erdgas) entwickeln. Parallel dazu gewinnen Brennstoffzellensysteme im niedrigen Leistungsbereich für netzferne und portable Anwendungen an Bedeutung. Letztere auch als Wegbereiter von Systemen in höheren Leistungsklassen.

## Stationäre dezentrale Energiewandlung

Mit Brennstoffzellen können hohe Wirkungsgrade bei der Wandlung chemischer Energieträger wie Erdgas oder Wasserstoff in elektrischen Strom und Wärme erreicht werden. Dabei fallen bei Wasserstoff praktisch keine Schadstoff-Emissionen an. Aus einzelnen Zellen lassen sich leistungsangepasst Stapel zusammensetzen, mit denen kleinste Versorgungseinheiten für Geräte bis hin zu Systemen für die Hausversorgung oder für mobile Anwendungen aufgebaut werden können. Brennstoffzellensysteme bieten daher den großen Vorteil, dass sie sich der Versorgungsaufgabe anpassen und dezentral einsetzen lassen.

Für den stationären Einsatz zur kombinierten Stromerzeugung und Wärmebereitstellung in Gebäuden wird der Erfolg der Brennstoffzellentechnik insbesondere davon abhängen, wie gut und vor allem zuverlässig sich die neuen Versorgungsaggregate in bestehende Netz- und Gebäudeinfrastrukturen integrieren lassen. Dabei gilt es die spezifischen Randbedingungen für Gebäude, Gasversorgung und Stromnetz zu berücksichtigen und alle Schnittstellen über kostengünstige Informations- und Kommunikationstechniken für übergeordnete Handlungsstrukturen des zukünftigen Energiehandels verfügbar zu machen (Abb. 1).

Abbildung 1  
Vernetzung der  
Infrastrukturen zur  
Integration von Brennstoffzellensystemen  
in Gebäude  
(Quelle: Fraunhofer ISE)



## Integration in die Gebäude

Etwa ein Drittel der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland werden durch die Bereitstellung von Niedertemperaturwärme verursacht. Über 80% davon ist dem Raumwärmebedarf im Wohngebäudebestand zuzuordnen. Durch verschiedene Entwicklungen der rationellen Energienutzung lässt sich dieser deutlich senken (Abb. 2).

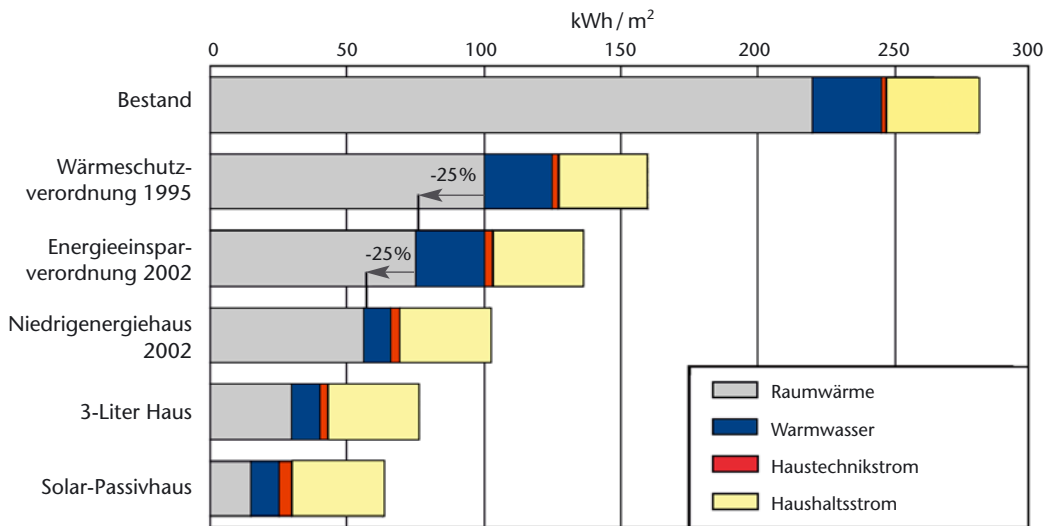


Abbildung 2  
Energiebedarf von Wohngebäuden: Endenergie in kWh/m<sup>2</sup>  
(Quelle: Fraunhofer ISE)

Während Niedrigenergiehäuser im Neubau mittlerweile zum Standard zählen, setzen sich auch weitreichende Maßnahmen wie 3-Liter- oder Passiv-Häuser hier und da durch. Eine besondere Herausforderung bei der rationellen Energienutzung sind Renovierungen im Gebäudebestand.

Der mittlere elektrische Leistungsbedarf eines durchschnittlichen Haushalts beträgt zwischen 500 und 1000 Watt. Ein darauf ausgelegtes Aggregat führt für Niedrigenergiehäuser ungefähr zu einer ausgeglichenen Energiebilanz. Höhere Leistungsanforderungen werden sich wirtschaftlich am günstigsten über das Stromnetz bereitstellen lassen. Für eine zusätzliche Wärmeversorgung müssen dann beispielsweise zusätzliche Spitzenlastkessel installiert werden.

## Systemstrukturen und Schnittstellen

Verfügbare Brennstoffzellenarten lassen sich grundsätzlich durch unterschiedliche Betriebstemperaturen von 80 bis 1000 °C unterscheiden, wobei der elektrische Wirkungsgrad mit der Temperatur steigt (Abb. 3). Der Betrieb mit Erdgas erfordert eine vorgelagerte Reformierung die bei Hochtemperatur-Brennstoffzellen teilweise in der Brennstoffzelle selbst abläuft. Die Komplexität des Gasprozesses zur Gewinnung von Wasserstoff aus Erd- oder Biogas und Beseitigung von systemschädigenden Bestandteilen wie beispielsweise Schwefel nimmt mit fallenden Betriebstemperaturen der Brennstoffzelle zu.

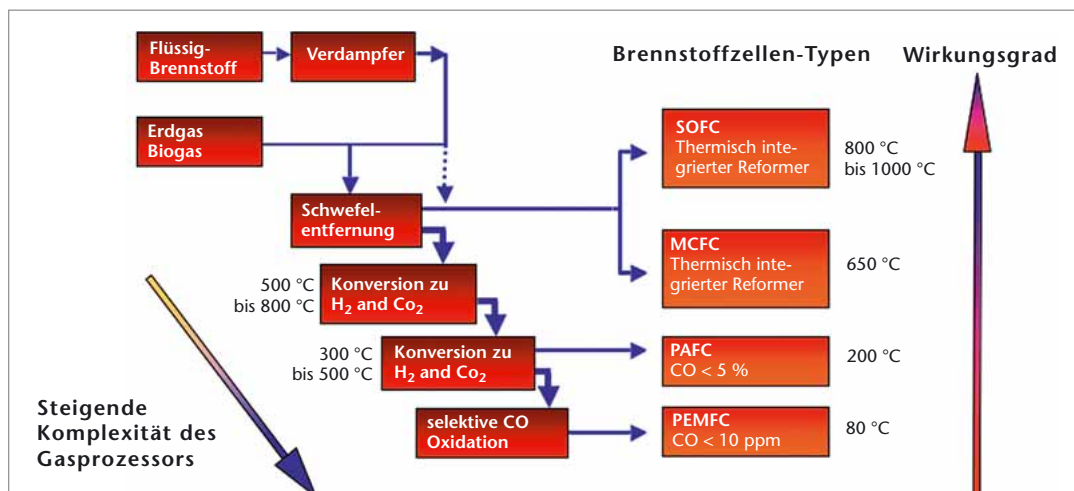


Abbildung 3  
Grundlegende Zusammenhänge verschiedener Brennstoffzellentypen und der erforderlichen Gasprozessortechnik  
(Quelle: ZSW) [1]

In einem kompletten Niedertemperatursystem sind einer PEM-Brennstoffzelle ein Verdichter, ein Reformer, ein zum Teil zweistufiger Shiftreaktor sowie eine Feinreinigung zur CO-Entfernung vorgelagert (Abb. 4). Über einen oder mehrere Wärmetauscher wird die Nutzwärme ausgekoppelt und das thermische Management realisiert.

Der Anschluss an das Stromnetz erfolgt über Wechselrichter, die die Gleichspannung und den Gleichstrom in die üblichen Wechselgrößen des Versorgungsnetzes umwandeln.

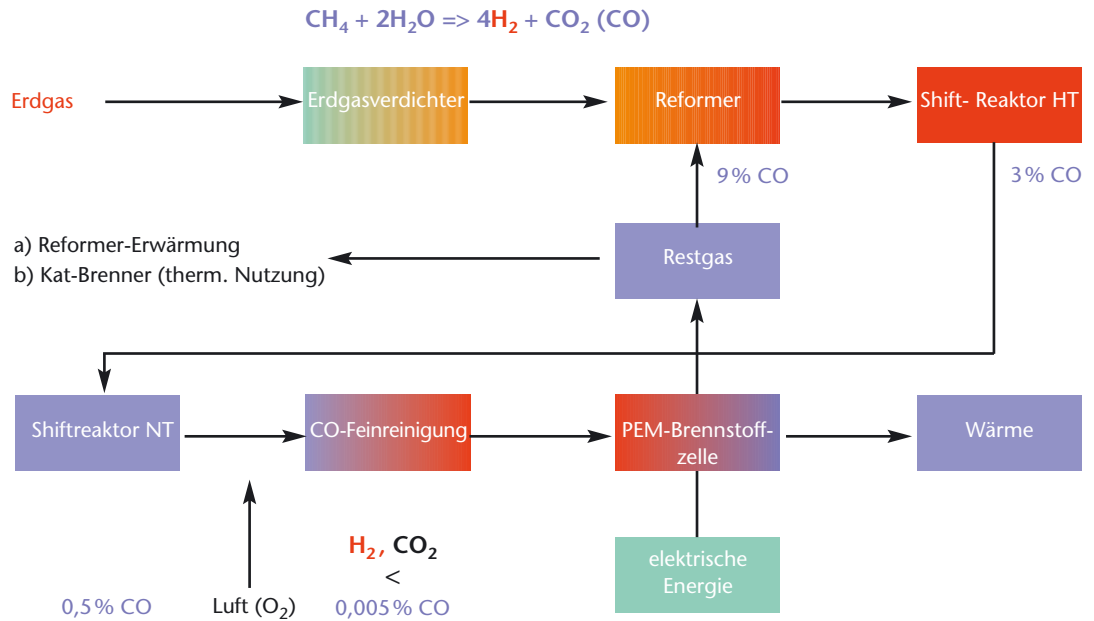


Abbildung 4 Systemstruktur und Schnittstellen eines Niedertemperatur-Brennstoffzellensystems einschließlich Gasprozessor (Quelle: ZSW)

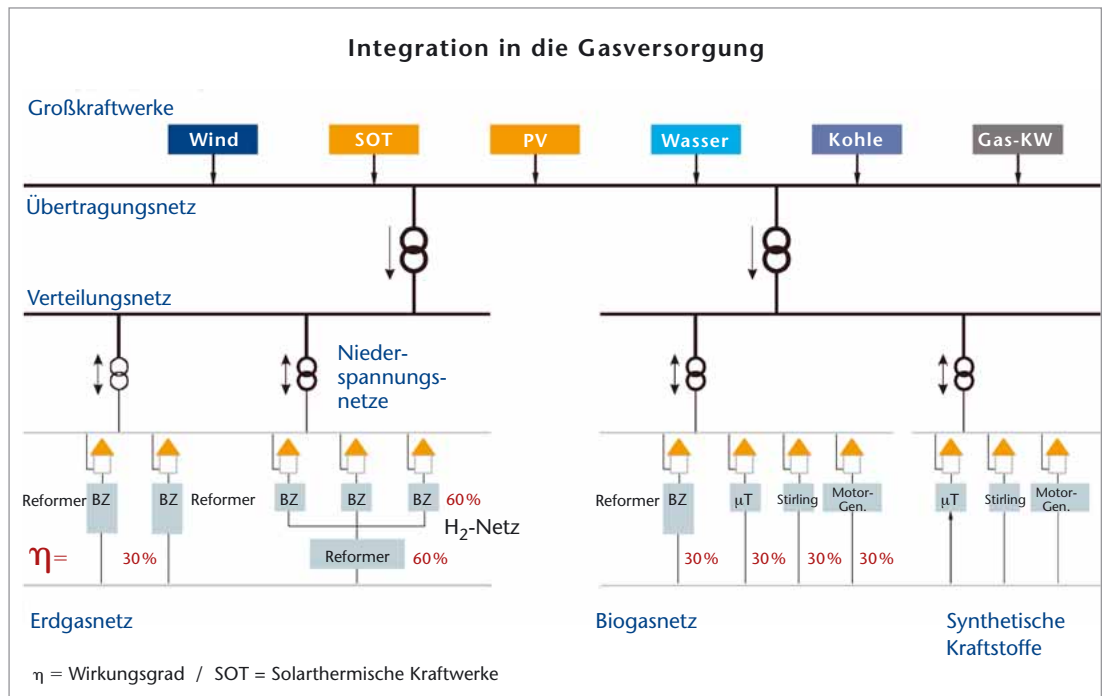


Abbildung 5 Vernetzungsoptionen auf Strom- und Gas-ebene mit zentralen Kraftwerken und dezentralen Einheiten wie Brennstoffzellen (BZ) und anderen Kraft-Wärme-Kopplungsaggregaten (Motor-Generatoren, Mikrogasturbinen ( $\mu T$ ), Stirlingmotoren) (Quelle: ISET)

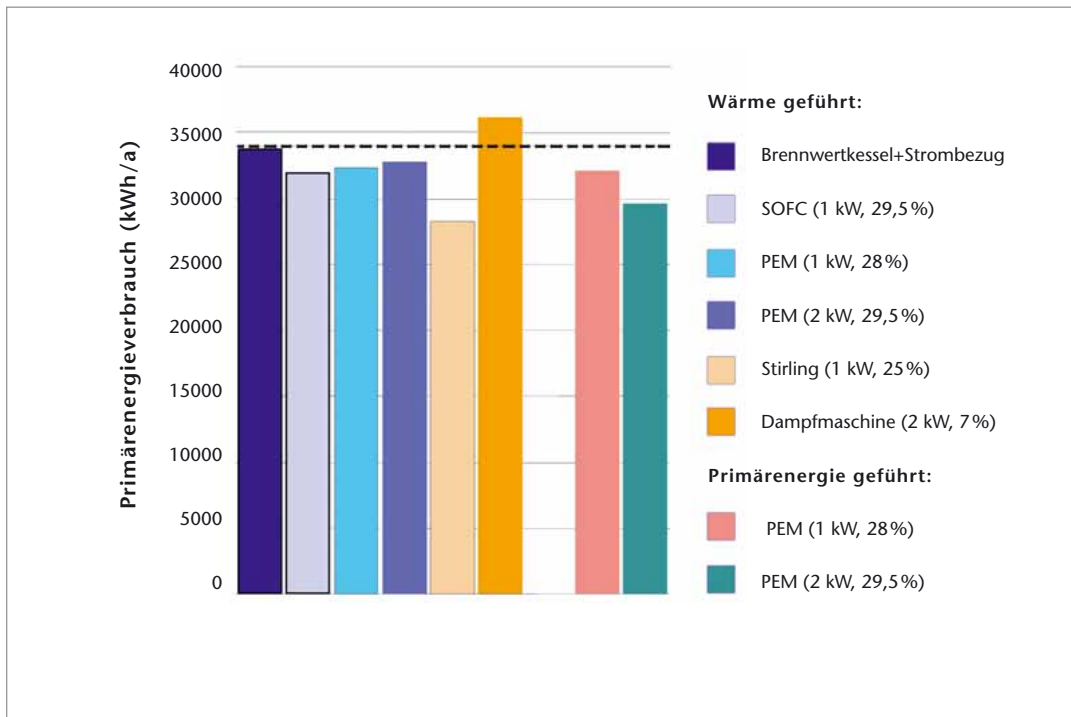


Abbildung 6  
Exemplarischer  
Systemvergleich  
verschiedener KWK-  
Aggregate am  
Beispiel eines  
Einfamilienhauses  
(Quelle: Fraunhofer ISE)

## Integration in die Gasversorgung

Brennstoffzellen benötigen ein wasserstoffhaltiges Gas, das in der heutigen Infrastruktur zur Gebäudeversorgung nicht direkt verfügbar ist. Während für Hochtemperatur-Brennstoffzellen Methan und CO zulässig und nutzbar ist, wirkt in Niedertemperatur-Brennstoffzellenzellen CO als Katalysatorgift und Methan lässt sich darin nicht direkt nutzen.

Aus Erdgas kann Wasserstoff durch die bereits angesprochene Reformierung von Kohlenwasserstoffen gewonnen werden. Dezentrale Reformer, die sich direkt am Brennstoffzellenaggregat befinden, müssen auch thermisch in das Gesamtsystem eingekoppelt sein. Jedoch senkt der Energiebedarf für solche integrierte Kleinstreformer den elektrischen Wirkungsgrad des Gesamtsystems auf etwa 30% (Abb. 5). Damit müssen sich Brennstoffzellensysteme gegen andere teilweise bereits etablierte Kraft-Wärme-Kopplungstechniken durchsetzen, die ähnliche Stromeffizienzen aufweisen [2].

Eine interessante Option sind große Reformer mit höheren Wandlungsgraden (geringere Wärmeverluste), denen ein sogenanntes Mikro-Wasserstoffnetz nachgelagert ist. Darin werden dann mehrere Aggregate betrieben. Der bessere Gesamtwirkungsgrad ist aber nur gewährleistet, wenn die Abwärme des Reformers weitgehend genutzt wird, z. B. als Prozesswärme oder über Absorptions-Kältemaschinen.

Ohne Ankopplung an Leitungsnetze lässt sich Wasserstoff vor Ort in Druckspeichern oder Flüssigwasserstofftanks bereit halten.

## Systemvergleich

Ein Vergleich verschiedener Kraft-Wärme-Kopplungs-Aggregate für Einfamilienhäuser (Abb. 6) belegt, dass der Primärenergieeinsatz gegenüber dem klassischen Strombezug aus dem Netz und die Wärmebereitstellung über einen modernen Brennwertkessel nicht unbedingt geringer ausfällt. Bei zu geringen elektrischen Wirkungsgraden kann er sogar darüber liegen. Neben einer grundlegenden Verbesserung der Technik können hier neue primärenergiegeführte Regelungskonzepte Vorteile bringen.

## Integration in die Stromverteilungsnetze

Brennstoffzellensysteme werden über den Hausanschluss in das öffentliche Wechselspannungsnetz (400V/230V, 50Hz) eingebunden. Moderne Wechselrichter formen aus Gleichstrom durch hochfrequentes modulierte Ein- und Ausschalten von Leistungstransistoren sinusförmige Ausgangsspannungen und Ströme. Zur Anpassung der geringen Eingangsspannungen sind zusätzlich Transformatoren erforderlich. Die Qualität der Netzgrößen bleibt dabei erhalten. Mit entsprechenden Regelverfahren lässt sich sogar eine Steigerung der Netzqualität erreichen.

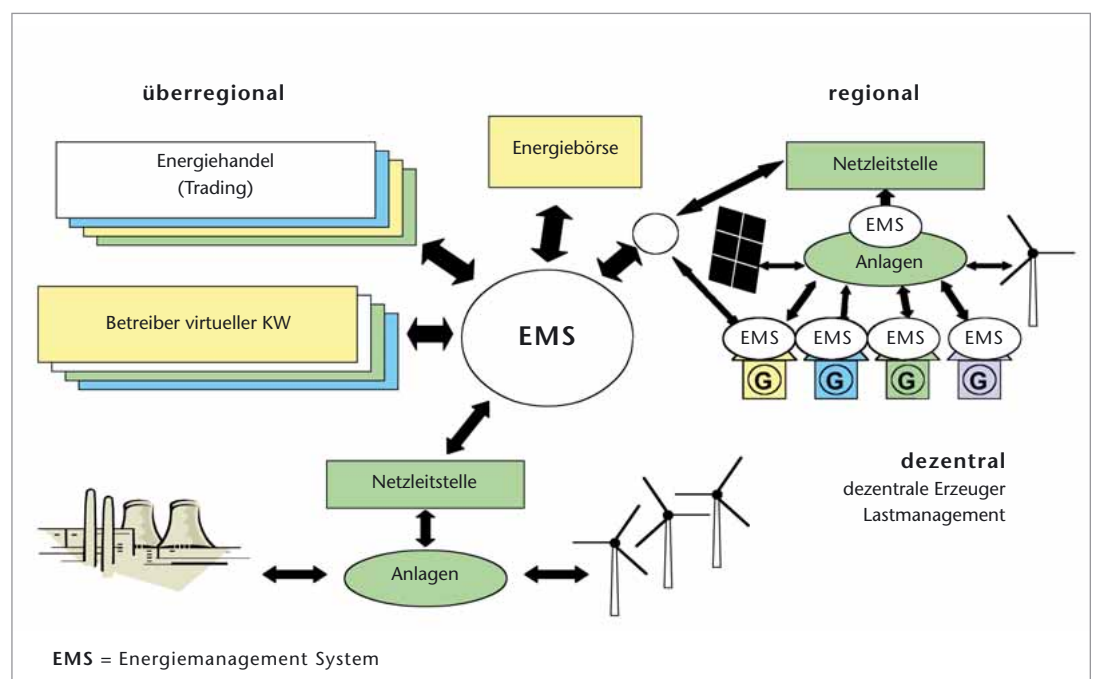
Eine interessante Option ist, einen kleinen elektrochemischen Speicher in das Wechselrichtersystem zu integrieren. Zusätzliche Steuerungs- und Regelungsfunktionen würden damit den Inselbetrieb und so die zusätzliche Dienstleistung eines Ersatzbetriebes bei Netzausfällen für die wichtigsten Verbraucher ermöglichen.

In der historisch gewachsenen Infrastruktur der Stromversorgung wird die in großen zentralen Kraftwerken erzeugte Energie über Hochspannungstrassen in die Verbrauchsregionen über-

tragen. Über Mittel- und Niederspannungsnetze gelangt der Strom schließlich in die Niederspannungsverteilungsnetze der Verbraucherebene. Der Strom wird in diesem Netz im Prinzip von oben nach unten verteilt [3].

Dezentrale Mikrokraftwerke, die es in Form der Windenergieanlagen, Blockheizkraftwerken und Photovoltaikanlagen seit einigen Jahren immer häufiger gibt, ersetzen mehr und mehr Anteile der Energieerzeugung konventioneller Kraftwerke. Messtechnisch werden sie daher als „negative Last“ registriert. Viele Energieversorgungsunternehmen (EVU) sehen daher in der Stromspeisung eine zusätzliche Erzeugung, die das bestehende ausgeklügelte System der Bereitstellung von Energie stören könnte. Sie argumentieren mit der fluktuierenden Einspeiseleistung. Da nicht einplanbar sei, wann die Sonne scheint oder der Wind weht, müssten von den Netzbetreibern teure Regelleistungen bereitgestellt werden. Doch mit den heute verfügbaren leistungsfähigen Wetter-Prognosesystemen, die das ISET entwickelt hat, lassen sich derartige Probleme lösen oder zumindest stark minimieren. Hinzu kommt, dass elektrische Stromnetze heute mit Hilfe von Informationstechnologien so gemanagt werden können, dass ihre Stabilität absolut gewährleistet bleibt. Dies wird im Folgenden beschrieben:

Abbildung 7  
Mögliche zukünftige Kommunikations- und Handelsstrukturen im Bereich elektrischer Energie  
(Quelle: RWEnet, EUS)

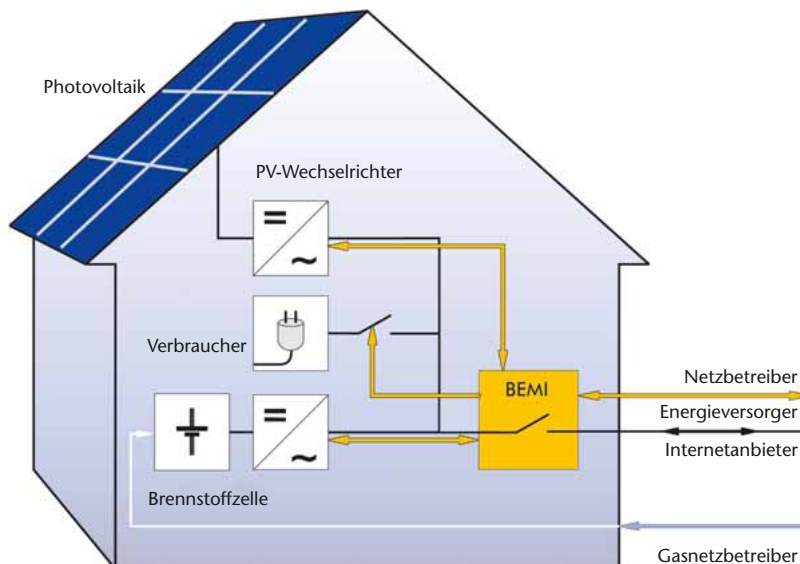


## Netzmanagement und Energiehandel

Hausbesitzer werden künftig verstärkt auch Erzeuger von Strom sein und EVUs werden Strom von ihnen kaufen. Die Rollen, von Erzeuger und Abnehmer von Strom, Kunden und Produzenten werden zukünftig flexibler. Denn immer mehr Kleinstkraftwerke, wie z. B. KWK-Aggregate mit Brennstoffzellen, speisen Energie ins Netz ein. Deshalb ist es erforderlich, alle Beteiligten mit einem Kommunikationssystem zu verknüpfen, damit Anbieter und Nachfrager in ein Handelsgeschäft eintreten können und Energiebörsen neue Freiheitsgrade gewinnen (Abb. 7).

Der Strompreis wird sich auch in Zukunft an Angebot und Nachfrage orientieren. In der Grundlast kostet der Strom heute 1,5 bis 3 Cent je Kilowattstunde (ohne Kosten für Verteilung und Handel), während er in Kalifornien während der Energiekrise in Zeiten der Spitzenbelastung auf bis zu 12 Dollar je Kilowattstunde hochschnellte. Die Preisunterschiede können Verbraucher für sich nutzen. Beispielsweise können Kühlgeräte mit guter Wärmedämmung längere Zeiten zwischen den Einschaltprozessen des Kompressors überbrücken. Über ein neues bidirektionales Energie-Management-Interface (Abb. 8) kann ein Kühlschrank dann via Internet (zum Beispiel aus der Steckdose über eine Powerline-Kommunikation) oder andere Kommunikationswege den aktuellen Strompreis abfragen und mit seiner Kältereserve abgleichen, um im richtigen Moment zu einem attraktiven Preis Energie einzukaufen, in Kälte zu verwandeln und zu speichern. Das Potenzial allein für solche Maßnahmen des Demand-Side-Managements bei Kühlsystem im Lebensmittelhandel sowie bei Heizungspumpen wird in Deutschland insgesamt auf 10 bis 15% des Verbrauchs geschätzt.

Wenn der Strombedarf steigt, ist es denkbar, dass Stromanbieter nicht ein Spitzenlastkraftwerk wie eine Gasturbine oder ein Pumpspeicherkraftwerk anfahren, sondern dass sie beispielsweise aus Blockheizkraftwerken in Wohnhäusern Strom kaufen [4]. Die dabei anfallende Wärme kann wesentlich einfacher und kostengünstiger als Strom gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar gemacht werden.



## Zusammenfassung und Ausblick

Für den wirtschaftlichen Betrieb von stationären Brennstoffzellensystemen ist neben einem hohen elektrischen Wirkungsgrad ein hoher Wärmenutzungsgrad von entscheidender Bedeutung. Auch andere innovative Wandlungsaggregate auf der Basis von Mikrogasturbinen, Dampfmaschinen oder Stirlingmotoren haben gute Marktchancen.

Mittelfristig werden stationäre Brennstoffzellen nicht direkt mit Wasserstoff, sondern über Erdgas versorgt. Erst wenn der Strom zu über zwei Dritteln aus erneuerbaren Energien kommt, alle Potenziale der Anlagen- und Lastbetriebsführung ausgeschöpft und andere dezentrale Speichertechnologien ausgeschöpft sind, wird die Speicherung von Strom in Wasserstoff in Betracht kommen. Denn bei diesen Umwandlungsprozessen gehen mit heutigen Technologien fast noch 2/3 der Energie verloren.

Welche Anteile Brennstoffzellen im Bereich der stationären dezentralen Strom- und Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern, Büros, Handwerksbetrieben und der Industrie erreichen werden, hängt neben den Faktoren Wirtschaftlichkeit, Qualität und Zuverlässigkeit insbesondere von der sorgfältigen und verlässlichen Integration in die Gebäudesystemtechnik ab.

Abbildung 8  
Bidirektionales Energie-Management-Interface (BEMI) als zukünftiger Ersatz für den heutigen Hausanschlusskasten  
(Quelle: ISET)

Eine weitere Optimierung komplexer Teilsysteme der Gas-, Strom- und Wärmeversorgung kann die Entwicklung deutlich beschleunigen.

Mit Hilfe neuer, digitaler Informationstechnik und aufgrund eines liberalisierten Marktes mit eigenständig agierenden Anbietern und Abnehmern werden die neuen Energieerzeuger zukünftig in das Stromnetz integriert. Das Stromnetz, welches bisher einer Einbahnstraße glich, wird zu einem Energiemarkt, auf dem bisherige Abnehmer auch zu Anbietern und bisherige Produzenten auch zu Nachfragenden werden können.

## Literatur

- [1] B.C.H. Steel, Natur 1999
- [2] Vetter, M.; Wittwer, C.; Dynamic modeling and investigation of residential fuel cell cogeneration systems, 16. Internationales Kolloquium über Anwendungen der Informatik und der Mathematik in Architektur und Bauwesen, Bauhaus Universität Weimar, 2003
- [3] Degner, T.; Engler, A.; Schmid, J.; Strauß, P.; Viotto, M.; Meyer, T.; Erge, T.; Integration Erneuerbarer Energien in Versorgungsstrukturen - Inhalte Europäischer Forschungsprojekte, 18. Symposium Photovoltaische Solarenergie, Staffelstein, 2003
- [4] Bendel, C.; Die Rolle der Photovoltaik im Strommanagement, Die Zukunft der Photovoltaik, Dornbirn, Juni 2004