

■ Integration Erneuerbarer Energien in die Wärmeversorgung

- Dezentrale Kraftwärmekopplung –
Konversionstechnologien und Einsatzmöglichkeiten
- Nahwärme im Gebäudebestand –
Anlagenaspekte und Umsetzung
- Energieversorgung im Niedrigstenergiebau

Dezentrale Kraftwärmekopplung – Konversionstechnologien und Einsatzmöglichkeiten

1. Einleitung

Neben aktiver und passiver Solarenergienutzung, die in modernen Passivgebäuden einen nahezu vollständigen Verzicht auf ein Heizungssystem erlaubt, ermöglichen unterschiedliche Technologien zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) die Integration erneuerbarer Energien in die Wärmeversorgung. Dabei werden verschiedene Brennstoffe in kleinen dezentralen Anlagen in thermischen oder elektrochemischen Verfahren zur Bereitstellung von elektrischer Energie, Warmwasser, Prozesswärme und zur Gebäudeheizung eingesetzt. Etablierte Technologien wie Verbrennungsmotoren als Blockheizkraftwerke, die mit Pflanzenölen oder Biogas betrieben werden, ermöglichen dies bereits heute. Bis zur Marktreife neuer Technologien wie z. B. Brennstoffzellen mit der zugehörigen Wasserstoffinfrastruktur ist es dagegen noch ein weiter Weg.

Ein prinzipieller Vorteil der dezentralen Versorgung liegt in der Vermeidung von Verteilungsverlusten, die z. B. in unserem elektrischen Netz zwischen 3 und 7% betragen. Entscheidender ist die Nutzung der „Abwärme“ bei der Stromerzeugung vor Ort. Dadurch können 80 bis 90% der eingesetzten Primärenergie genutzt werden. Im Vergleich zu einem zentralen Kraftwerk ohne Wärmenutzung ergeben sich dabei Primärenergieeinsparungen zwischen 20 und 30% und eine Reduktion klimaschädlicher Gase um bis zu 50% je nach betrachteter Technologie und Verdrängung von Strom aus dem öffentlichen Netz.

Die Wirtschaftlichkeit dezentraler KWK-Anlagen ist einerseits im Verhältnis zu zentralen Kraftwerken durch höhere spezifische Investitionskosten („economy of scales“) geprägt. Andererseits können durch die gute Brennstoffausnutzung, eine hohe Auslastung der Aggregate und die Fertigung hoher Stückzahlen

(„economy of sales“), dennoch niedrige spezifische Energiekosten erzielt werden. Wichtig ist dabei, dass möglichst die gesamte Wärme genutzt wird und nur wenig elektrische Energie in das öffentliche Stromnetz eingespeist wird. Für alle KWK-Technologien muss bei einer wirtschaftlichen Dimensionierung der Anlage ein Kompromiss zwischen einer hohen Ausnutzung - typisch sind mehr als 4000 Volllaststunden - und einer hohen Bedarfsdeckung gefunden werden. Darüber hinaus trägt auch die Reduktion von Spitzenlasten im elektrischen Netz zur Wirtschaftlichkeit bei. Allerdings ist durch den Preisdruck in Folge der Liberalisierung des Strommarktes neben dem Arbeits- (€/kWh) auch der Leistungspreis (€/kW) in den letzten Jahren gesunken. Dies hat in vielen Fällen zu einem unwirtschaftlichen Betrieb von KWK-Anlagen geführt. Zur Zeit wird eine neue gesetzliche Regelung (Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz, voraussichtlich zum 1.1.2002) diskutiert, die durch degressive Zuschläge von anfangs 1,5 ct bis 2,6 ct/kWh über maximal 10 Jahre einen wirtschaftlichen Betrieb gewährleisten soll. Beim Einsatz biogener Brennstoffe, die unter die Biomasseverordnung vom März 2001 fallen, erfolgt eine höhere Vergütung nach dem EEG.

Das Potenzial für KWK in Deutschland wird im industriellen und kommunalen Bereich auf etwa 14.000 MW_{el} bzw. 70.000 GWh_{el} geschätzt, was knapp 15% des Strombedarfs entspricht [1]. Zusätzlich wird erwartet, dass etwa 10% der privaten Haushalte langfristig mit Brennstoffzellen-BHKWs versorgt werden könnten [2].

Dipl.-Phys.
Jochen Bard
ISET
jbard@iset.uni-kassel.de

Prof. Dr.
Ludger Blum
FZJ
l.blum@fz-juelich.de

Dipl.-Ing.
Andreas Brinner
DLR-Stuttgart
andreas.brinner@dlr.de

2. Nutzung biogener Brennstoffe

Biogene Brennstoffe werden mit wenigen Ausnahmen aus pflanzlicher Biomasse gewonnen. Die energetische Nutzung von Biomasse aus Land- und Forstwirtschaft, Landschaft, Kommunen und Industrieabfällen kann einen Beitrag zwischen 10 und 20% zur Deckung des deutschen Energiebedarfs leisten. Eine direkte Verwertung fester Biomasse zur KWK ist nur bei externen thermischen Verfahren möglich (Stirlingmotor, Dampfmaschinen etc). Für alle anderen Technologien muss die Biomasse in flüssige oder gasförmige Brennstoffe umgewandelt werden. Weitere Prozesse, wie z. B. Reinigung und Konditionierung sind je nach Wandlungsprinzip der Brennstoffaufbereitung nachgeschaltet. Eine grobe Unterteilung der Brennstoffe kann nach den Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig erfolgen.

Fest

Energiepflanzen (Raps, Sonnenblumen, Miscanthus etc.), Holz, Restbiomasse (Stroh, Mist, Waldrestholz, Grün- und Strauchsnitt), Bioabfälle, Treibsel (aus Gewässern)

Flüssig

Öle (Pflanzenöl, Pyrolyseöl), Alkohole (Biomethanol oder Bioethanol aus Vergärung)

Gasförmig

Biogas, Pyrolysegas, Synthesegas, Schwachgas, langfristig Wasserstoff aus Erneuerbaren Energien

Die wesentlichen Verfahren zur Verwertung und Umwandlung von Biomasse als Energieträger sind [3, 4]:

- **Direkte Verbrennung** von feuchter Biomasse mit einem Trockensubstanzgehalt von über 50% kann wie Braunkohle in Feuerungsanlagen verbrannt werden. Mittels Dampferzeugung ist die KWK in Dampfmaschinen oder -turbinen möglich.
- **Ölgewinnung** durch Abpressen von Ölsaaten für die direkte Nutzung oder nach Umesterung zu Methylester ("Biodiesel").
- **Pyrolyse** (thermochemische Verflüssigung) vorwiegend von Holz zu Pyrolyseöl (Holzteer, Methanol) und Pyrolysegas (vgl. Synthesegas) unter Sauerstoffausschluss.

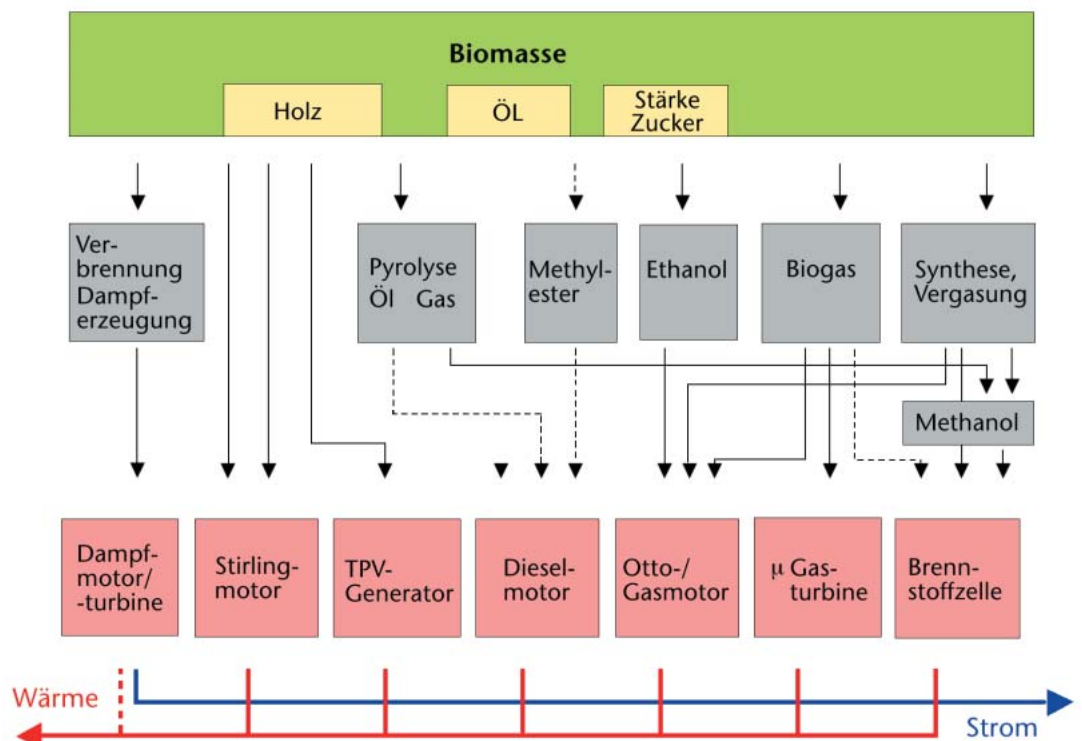


Abbildung 1
Übersicht zur
Biomassenutzung
für die Kraftwärmekopplung

- **Aerobe alkoholische Fermentation**
von zucker-, stärke- und cellulosehaltigen Pflanzen, Endprodukt: Ethanol
- **Biogasgewinnung** durch anaerobe Fermentation führt zu Gasen mit 50 bis 70% Methananteil (ca. $20 \text{ MJ}/\text{m}_N^3$). Dabei werden 50% des Energieinhalts der Biomasse genutzt.
- **Synthesegas** wird z. B. aus Kohle unter hohem Druck bei Sauerstoff- oder Dampfzufuhr erzeugt und besteht vorwiegend aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff (ca. $15 \text{ MJ}/\text{m}_N^3$) mit hohem Ausnutzungsgrad. Zur Verwendung in internen Verbrennungsmotoren ist eine aufwändige Gasreinigung erforderlich. Es ist ein Rohstoff für die Methanolsynthese.
- **niederkaloriges Gas** (sog. Schwachgas), mit hohen Stickstoffanteilen ($> 50\%$) und dem zufolge geringen Heizwerten um $5 \text{ MJ}/\text{m}_N^3$ entsteht bei der Vergasung von Biomasse mit Luft in unterschiedlichen Verfahren (vgl. Synthesegas) und als industrielles Abfallprodukt.

3. Konversionstechnologien

Die unterschiedlichen Technologien zur Umwandlung von chemischer Energie aus Brennstoffen in elektrische Energie und thermische Energie lassen sich grob unterteilen in **thermische Verfahren** mit interner oder externer Verbrennung und **elektrochemische Verfahren**, denen die verschiedenen Brennstoffzellentypen zuzuordnen sind.

Verbrennungsmotoren

Die dominierende Technologie zur dezentralen KWK ist heute der Verbrennungsmotor mit einem Otto- oder Dieselprozess, so genannte Blockheizkraftwerke, die gasförmige oder flüssige Brennstoffe nutzen. Es existieren Varianten mit Dreiwegekatalysator, als Mager- oder als Zündstrahlmotor. Der thermische Wirkungsgrad, der im Wesentlichen durch das Kompressionsverhältnis bestimmt wird, liegt beim Dieselmotor höher als beim Ottomotor. Der Motor treibt einen elektrischen Generator an. Das Kühlwasser und die heißen Motorabgase dienen zur

Bereitstellung von Wärmeenergie.

Der elektrische Wirkungsgrad liegt bei 30 bis 40%, der Gesamtnutzungsgrad erreicht Werte bis 90%. Typische Leistungsbereiche liegen zwischen ca. 20 kW_{el} bis 1000 kW_{el} . Eine separate Gruppe stellen die Klein-BHKWs mit dem Leistungsbereich von 5 bis 15 kW_{el} dar.

Heißluftmotor (Stirling)

Die externe Verbrennung ermöglicht die Nutzung nahezu beliebiger Brennstoffe für Stirlingmotoren. Technisch schwierig ist eine effiziente und rasche Wärmeübertragung. Der thermische Wirkungsgrad des Stirlingprozesses entspricht dem Carnot-Wirkungsgrad. Die heißen Abgase des Brenners werden genutzt. Trotz der guten thermodynamischen Voraussetzungen wurden bisher nur wenige Stirlingmotoren bis zur Produktreife entwickelt. Technische Probleme bestehen häufig noch beim Erhitzer und der Dichtigkeit des Kolbenraums. Elektrische Wirkungsgrade zwischen 20 und 30% werden erreicht. Weitere Vorteile, die bei entsprechendem Stand der Technik erwartet werden, sind niedrige Wartungskosten und geringe Geräusch- und Abgasemissionen. Systeme mit 1 bis etwa 10 kW_{el} kommen derzeit auf den Markt, Praxistests sind angelaufen. Größere Einheiten befinden sich noch in der Entwicklung. Als Brennstoffe werden zur Zeit (Bio-)Gas und Holz favorisiert.

Dampfmotoren

Mit dem heißen Rauchgas aus der Verbrennung wird in einem Kessel Wasserdampf mit hohem Druck erzeugt. Im Dampfkolbenmotor wird der Dampf entspannt, wodurch er mechanische Kolbenarbeit leistet und über eine Kurbelwelle einen elektrischen Generator antreibt. Erst in Kombination mit einem Abdampfkessel, z. B. zur Heiz- oder Prozessdampferzeugung, wird aus der Kessel-Dampfmotorkombination eine KWK-Anlage mit hohem Brennstoffnutzungsgrad. Die getrennte Verbrennung in einem geeigneten Kessel ermöglicht die Verwendung beliebiger Brennstoffe aus Biomasse. Typische Brennstoffe sind Rest- und Abfallholz sowie Abfälle aus der

Lebensmittelindustrie. Dampfkolbenmotoren werden heute in einem Leistungsbereich von 20 kW bis über 1 MW angeboten. Nachteilig ist, dass Dampfmotoren nur relativ niedrige elektrische Wirkungsgrade von etwa 20% haben. In Kombinationen mit Turbinen lassen sich aber auch höhere Systemwirkungsgrade erzielen.

Abbildung 2
Mikro-Gasturbine im
Teststand des ISET in
Hanau

Mikro-Gasturbinen

Kleine schnelllaufende Gasturbinen mit relativ geringen Brennkammerdrücken und -temperaturen werden als Mikro-Gasturbinen bezeichnet. Die zu Kühlzwecken über den Generator zugeführte Verbrennungsluft wird zunächst verdichtet und zur Erzielung guter Wirkungsgrade im Rekuperator¹ vorgewärmt. In der Brennkammer wird der gasförmige oder flüssige Brennstoff zugeführt und gezündet. Die vom Turboladerprinzip abgeleitete Entspannungsturbine treibt den Radialverdichter und einen direkt an die schnelle Welle gekoppelten Generator an. Die hohen Drehzahlen von bis zu 100.000 U/min erfordern spezielle Lager. Hier wurden technische Erfahrungen von Stromgeneratoren der Antriebsturbinentechnologie für Flugzeuge genutzt. Über einen Frequenzumrichter wird der elektrische Strom ins Netz eingespeist. Prinzipielle Vorteile dieser Technologie liegen in der kompakten Bauform, im vibrationsarmen Betrieb, in weiten Wartungsintervallen (8000 h) und entsprechend niedrigen Wartungskosten sowie in den deutlich geringeren Emissionen von CO und NO_x im Vergleich zu Gasmotoren.

Derzeit werden Systeme mit elektrischen Leistungen zwischen 30 und 200 kW_{el} angeboten. Anlagen höherer Leistungen befinden sich in der Entwicklung. Die Abgastemperatur beträgt bei Verwendung eines Rekuperators noch ca. 200 bis 300 °C. Dies favorisiert Mikro-Gasturbinen für den KWK-Einsatz in einem industriellen oder gewerblichen Umfeld, wo Dampf oder hohe Prozesswärmepemperaturen erforderlich sind und genutzt werden können. Prinzipiell lassen sich Mikro-Gasturbinen auch mit Biogas oder niederkalorigen Gasen betreiben. Die zur Zeit angebotenen Systeme sind

aber zunächst auf Erdgasbetrieb ausgelegt. [5] Vorteile bietet auch die Kombination mit Hochtemperaturbrennstoffzellen.



Thermophotovoltaik-Generatoren

Das Funktionsprinzip beruht auf der direkten Umwandlung von thermischer Energie in elektrische Energie. Ein Thermophotovoltaik (TPV)-System besteht im Wesentlichen aus einem Strahlungsbrenner und einem Photovoltaikgenerator. Im Strahlungsbrenner wird die chemische Energie des Brennstoffes in Strahlungsenergie eines Hochtemperaturmittlers mit einer Temperatur von ca. 1200°C umgewandelt. Der PV-Generator erzeugt aus der Wärmestrahlungsenergie direkt elektrische Energie nach dem gleichen Prinzip wie Sonnenlicht in Solarzellen. Infolge der stationären Verbrennungsverhältnisse treten auch im TPV-Generator geringere Schadstoffemissionen auf als bei einem Verbrennungsmotor. Die Brennluft wird in einem Gegenstromwärmeübertrager vorgewärmt.

Die physikalischen Wirkungsgradgrenzen für die thermophotovoltaische Energiekonversion sind von der Qualität der spektralen Anpassung zwischen Strahler und Photovoltaikzelle bzw. der Temperatur des Strahlers abhängig. Beim aktuellen Entwicklungsstand wären etwa 10% Wirkungsgrad erreichbar. Langfristig kann durch eine verbesserte Technik eine erhebliche Effektivitätssteigerung erwartet werden. Theoretisch sind maximal etwa 40% Systemwirkungsgrad möglich. Diese Technologie beinhaltet daher das Potenzial für eine

¹ Wärmetauscher der die Abwärme des Abgases zur Prozessgasvorwärmung nutzt

leise, schadstoffarme und zuverlässige Stromerzeugung. Mit einer elektrischen Leistung ab etwa 1 kW sind TPV-Generatoren auch für KWK z. B. in Hausheizungen interessant. Die Wärmeauskopplung erfolgt über das Kühlsystem und aus der Abwärme des Brenners. Ein TPV-Generator kann wegen des externen Brenners ähnlich wie Stirlingmotoren auf nahezu beliebige Brennstoffe zurückgreifen. Er erscheint damit insbesondere für die Konversion von Biomasse geeignet.

Brennstoffzellen

In einer Brennstoffzelle reagiert Wasserstoff mit Sauerstoff in einer exothermen elektrochemischen Reaktion bestehend aus zwei Teilreaktionen (Redox-Reaktion) an zwei separaten Elektroden zu Wasser. Wegen der nur Ionen leitenden Membran zwischen den Elektroden fließen die Elektronen über einen äußeren elektrischen Stromkreis. Eine Brennstoffzelle erzeugt gleichzeitig Wärme und Strom. Es existiert eine Reihe von Brennstoffzellentypen, die nach Temperaturniveau, Trennmembran-/Elektrolytmaterial, Art der transportierten Ionen und anodischer oder kathodischer Wassererzeugung eingeordnet werden. Für die Namensgebung der Zelltypen ist der Elektrolyt ausschlaggebend.

Alkalische Brennstoffzellen (alkaline fuel cell, **AFC**) wurden schon in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts entwickelt. Sie enthalten flüssige Kalilauge (30% KOH) als Elektrolyt. Polymer Elektrolyt Brennstoffzellen (polymer electrolyte membran fuel cell, **PEFC** oder **PEM**) besitzen eine Protonen leitende Membran. An dieser Variante wird zur Zeit intensiv in allen Anwendungsbereichen geforscht. Zu diesem Typ zählt auch die Direktmethanolbrennstoffzelle (**DMFC**), die es erlauben wird, aus Biomasse synthetisiertes Methanol ohne weitere Aufbereitungsprozesse zu nutzen. Die Phosphorsäure Brennstoffzelle (phosphoric acid fuel cell, **PAFC**) wird bereits seit Jahren in mehr als 200 Einheiten als KWK-Modul eingesetzt. Schmelzkarbonat Brennstoffzellen (molten carbonate fuel cell, **MCFC**) und Festoxid Brennstoffzellen (solid oxide fuel cell, **SOFC**) zählen zu den so genannte Hochtemperatur-

zellen, mit Betriebstemperaturen zwischen 600 und 1000 °C, von denen seit wenigen Jahren einige Einheiten in der Größenordnung von 250kW_{el} und 100kW_{el} getestet werden. Alle Brennstoffzellensysteme erreichen elektrische Wirkungsgrade von 50% und mehr bei Verwendung von Wasserstoff als Brennstoff. Je nach Anbindung des KWK-Moduls an den Verbrauchern werden dabei Brennstoffnutzungsgrade von über 90% erzielt. Die energieaufwändige externe Reformierung von Kohlenwasserstoffen reduziert bei den Niedertemperaturzellen (AFC, PEFC, DMFC) den Wirkungsgrad auf 30 bis 40%.

Brennstoffzellen stellen je nach Typ sehr unterschiedliche Anforderungen an die Gasreinheit. Dies beeinflusst stark ihre Eignung für biogene Brennstoffe. Alkalische Brennstoffzellen vertragen kein CO₂, PEFC-Brennstoffzellen werden durch CO "vergiftet", alle Brennstoffzellentypen müssen vor Schwefel- und Chlorverbindungen geschützt werden. Stickstoff, häufiger Bestandteil biogener Brennstoffe, ist für alle Brennstoffzellentypen mit Ausnahme der PAFC ein inertes Gas. Hochtemperaturbrennstoffzellen sind wegen der internen Vorreformierung von Kohlenstoffverbindungen vielversprechende Anwärter für eine KWK auf der Basis biogener Brennstoffe. Die langfristige Perspektive der wasserstoffbetriebenen Technologien beruht auf der Einführung einer solaren Wasserstoffwirtschaft.

PEFC-BHKWs für die Hausenergieversorgung

In Deutschland werden über 50% der Endenergie in privaten Haushalten verbraucht, davon ca. 60% für Raumheizung und Warmwasser. Für diesen Energiesektor besteht ein kommerzielles Interesse an der Entwicklung von Klein-BHKWs zum Einsatz in Ein- und Mehrfamilienhäusern. Der elektrische Wirkungsgrad dieser Kleinanlagen liegt im Bereich von 35 - 40% bei einem Gesamtnutzungsgrad bis über 80%. Eingebunden werden diese Systeme wärmetechnisch in das Heizungsnetz im Austausch gegen den normalen Gasbrenner, der dann als Brennstoffzellensystem zusätzlich zur Wärme Strom produziert.

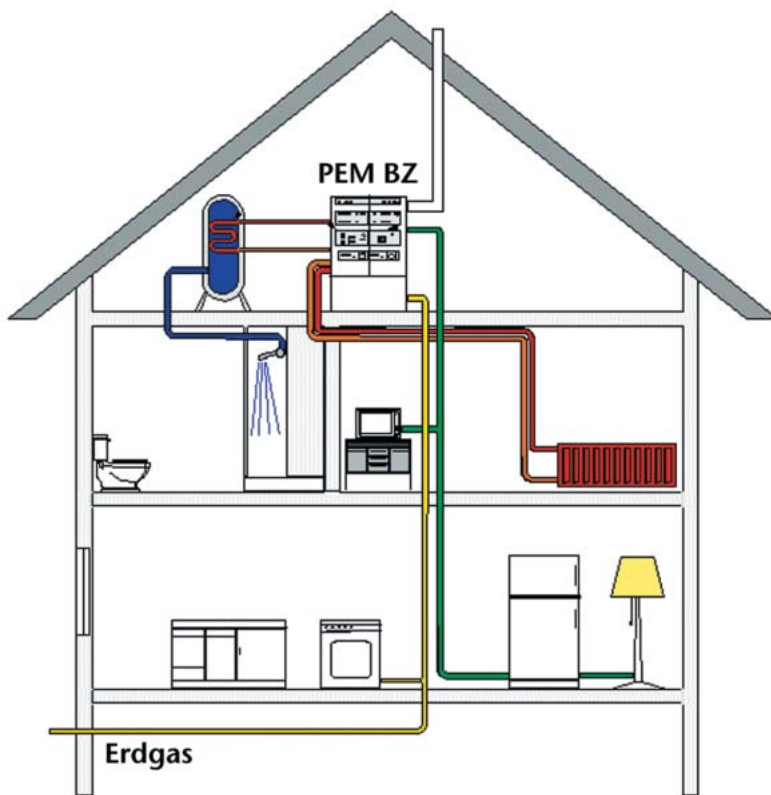


Abbildung 3
Brennstoffzellen-
BHKW zur Haus-
energieversorgung

Die Vorteile der Brennstoffzelle für diese Anwendung im Vergleich zu konventionellen Anlagen liegen neben dem höheren elektrischen Wirkungsgrad, im guten Teillastverhalten, in der Geräusch- und Vibrationsarmut und im geringeren Wartungsaufwand. Allerdings muss noch ein weiter Weg zurückgelegt werden, bis solche Anlagen zu konkurrenzfähigen Preisen angeboten werden können. Die aktuellen Kosten für Laboranlagen bzw. Prototypen liegen über 25.000 €/kW und müssen für die Hausenergieversorgung auf unter 1500 €/kW reduziert werden. Das wird nach Aussage des Heizungsherstellers Vaillant ab einer kumulierten Fertigungsmenge von 100.000 Stück zu erreichen sein. Favorisiert werden zunächst Anlagen für den Einsatz in Mehrfamilienhäusern mit einer elektrischen Leistung von ca. 5 kW_{el}, bei einer thermischen Leistung bis 50 kW_{th}, die über Spitzenlastkessel abgedeckt wird.

Für diese Anwendung werden von verschiedenen Firmen (Vaillant, Buderus, Vissmann, Hamburger Gas Consult (HGC), u. a.) die Niedertemperatur-Brennstoffzellen vom Typ PEFC favorisiert.

Diese Brennstoffzellen werden bei 60 bis 80°C betrieben und erfordern reinen Wasserstoff als Brenngas. Deshalb ist die Brenngasaufbereitung der dominierende Teil der Anlage. Zunächst werden dem Reformier Erdgas, Wasserdampf und Luft unter Druck zugeführt und dort zu wasserstoffreichem Gas reformiert. In einer zweiten Stufe wird das zusätzlich entstandene Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid oxidiert. Nach einer Prozessgasbefeuchtung strömt das Reformat an die Anoden der einzelnen Brennstoffzellen. Da die Brennstoffzelle nicht das gesamte zugeführte Brenngas umsetzt, wird der Restwasserstoff im PEFC-Abgas in einem katalytischen Nachbrenner vollständig nachverbrannt. Die Wärme dieses Abgasstromes wird in einem Wärmeübertrager zum Beheizen der Eingangsstoffströme in den Reformier verwendet. Die restliche Wärme wird über den Brennstoffzellenkühlkreislauf an den Heizkreis abgegeben.

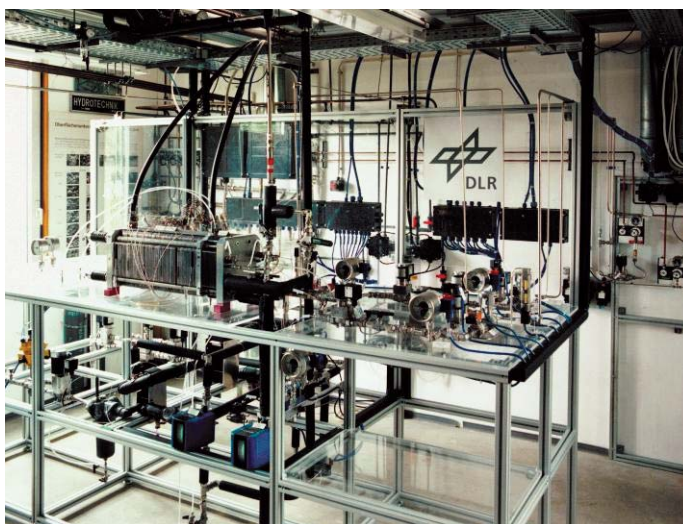
Hochtemperatur- brennstoffzelle SOFC

Für gewerbliche und industrielle Anwendungen eignen sich besonders die Hochtemperaturbrennstoffzellen wegen der geringen Aufwendungen für die Brennstoffaufbereitung und des hohen Temperaturniveaus der Abwärme. Die SOFC besitzt das höchste Wirkungsgradpotenzial für die direkte Verstromung von Kohlenwasserstoffen (Erdgas, Biogas etc.) in dezentralen Stromerzeugungsanlagen. Bereits kleine Anlagen können einen elektrischen Wirkungsgrad deutlich über 40% erreichen und oberhalb von 50 kW_{el} sind 50% und mehr möglich. In größeren Leistungseinheiten ist bei optimaler Ausnutzung der thermodynamischen Möglichkeiten in Kombination mit einer Gas- und Dampfturbine (GUD) ein elektrischer Wirkungsgrad bis zu 70% erreichbar. Bei Nutzung der Abwärme kann die SOFC einen Gesamtnutzungsgrad von über 90% erreichen. Somit hat die SOFC sowohl im Bereich der Kraft-Wärmekopplung als auch in der dezentralen Stromversorgung gute Marktchancen. Ein weiterer Vorteil der SOFC sind die geringen schädlichen Emissionen, was die Installation von SOFC-Anlagen in Ballungsräumen und Wohngebieten besonders unterstützen wird.

Im Bereich Kleinanlagen für die Hausenergieversorgung ist die Firma Sulzer Hexis AG bislang der einzige Anbieter von SOFC-Anlagen. Sie setzt den Schwerpunkt ihrer Aktivitäten auf den Bereich von 1 kW elektrischer Leistung. Bereits seit 1997 laufen verschiedene Feldtests bei potenziellen Kunden unter realen Betriebsbedingungen. Bislang wurden mit einigen Anlagen mehrere tausend Betriebsstunden erreicht und damit viel Erfahrung für die weitere Optimierung des Systems gesammelt. Auch andere SOFC-Entwickler haben inzwischen erkannt, dass in dieser Leistungsklasse ein interessanter Einstiegsmarkt vorhanden ist. Deshalb gibt es ein verstärktes Interesse an der Entwicklung von kleinen SOFC-Anlagen.

Betrieb und Versuchsergebnisse der PEFC-KWK-Versuchsanlage PEMA

Im Rahmen eines PEFC-Block-Untersuchungsprogramms an der DLR-PEFC-Versuchsanlage PEMA wurde ein simulierter KWK-Betrieb über 600 Stunden mit einem 3 kW_{el}-Block des italienischen Herstellers Nuvera durchgeführt. Für den Betrieb wurden als Leitgrößen die standardisierten Elektro- und Wärmeenergiebedarfsprofile eines Einfamilienhauses genutzt. Zur Standardisierung wurden die Daten eines Hauses mit 100 m² Wohnfläche, zwei Stockwerken und voller Unterkellerung, gebaut nach der deutschen Wärmeschutzverordnung von 1995 (WschVO95), herangezogen. Die Versuchsanlage PEMA ist ein System mit offener Betriebsarchitektur, das den Betrieb von PEFC-Brennstoffzellenblöcken in den Leistungsbereichen 0,5 bis 16 kW_{el} und 1 bis 20 kW_{th} ermöglicht. Die Anlage besteht aus den Hauptkreisläufen Brennstoffversorgung mit Wasserstoff oder wasserstoffreichem Reformergas, Luftversorgung mit verschiedenen zuschaltbaren Stufen der Reinigung, Wasserkreislauf für Befeuchtung und Kühlung, Abwärmenutzung mit zwei verschiedenen Lasten, einem dynamischen Außenkühler und einer Hallenheizung für ein Laborgebäude, schnelle elektronische Last und vollautomatischer Anlagenbetriebsführung für PEFC-System und Wärme-Rückgewinnungsanlage TERP (Thermal Energy Recovery Plant).

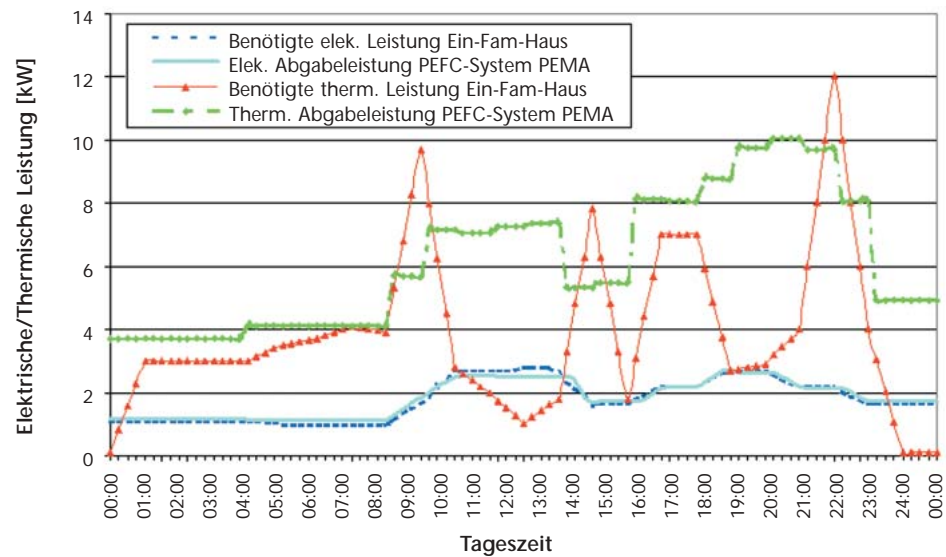


Das Wärmerückgewinnungssystem arbeitet mit dem Clausius-Rankine-Kreisprozess und erlaubt durch flexible Temperaturanpassung an die Nutzeranforderung und Rückgewinnung aller Abwärmemengen außer den PEFC-Block-Konvektionsverlusten zusammen mit der PEMA-Elektroenergieabgabe eine nahezu hundertprozentige Brennstoffnutzung.

Die Wärmepumpe des TERP-Systems wird mit einer kommerziellen Öl-Mischung betrieben. In diesen Kühlkreislauf werden alle Abwärmemengen des Brennstoffzellensystems sowie aller Pumpen- und Lüftermotoren eingekoppelt. Das Betriebsziel des Untersuchungsprogramms war die simulierte autonome Elektro- und Wärmeenergieversorgung eines einzeln stehenden Einfamilienhauses durch ein PEFC-System. Für die Untersuchung wurde ein Standard-Betriebsprofil genutzt, dem ein jährlicher Elektroenergiebedarf von 5,3 MWh und 22,4 MWh thermisch für Heizung und Warmwasser zugrunde gelegt wurde. Der elektrische Spitzenbedarf betrug über Mittag 5,2 kW. Das thermische Profil wies drei Bedarfsspitzen um 6:00 Uhr mit 9,7 kW, um 14:00 Uhr mit 7,9 kW und um 21:00 Uhr mit 12 kW auf. Die Auswertung der Betriebsergebnisse hat ergeben, dass die elektrische Nettoleistungsabgabe des PEFC-Systems an das Hausnetz von 5,2 kW eine Gesamt-Leistungserzeugung von 9,36 kW durch das PEFC-System erforderlich macht, um den system-internen Bedarf von 4,16 kW zu decken. Bezogen auf den verwendeten PEFC-Block mit 60 Zellen bei gleichem elektrischem Abgabestrom würde dies einen

Abbildung 4
PEMA Versuchsanlage
der DLR

Abbildung 5
Betriebsergebnisse
der PEM-Anlage,
hochgerechnet auf ein
Einfamilienhaus



Block von 180 Zellen oder zwei Blöcke mit je 90 Zellen erfordern. Die Erfahrung mit PEFC-Blöcken hat jedoch gezeigt, dass zur Kompensation von Blockalterung und Ausgleichseffekten in großen Blöcken, der Block mit 185 Zellen ausgerüstet werden müsste. Es wäre weiterhin erforderlich, die hohen Startströme von Motoren, Lüftern etc. durch den Einbau eines 0,5 - 0,7 kWh großen Akkuspeichers zu kompensieren, dessen Ladung ebenfalls vom PEFC-System übernommen werden muss, um das Haus komplett vom Allgmeinnetz abkoppeln zu können. Das TERP-System mit einer 12 kW_{th}-Wärmepumpe und einem 10 kW_{th} Hallenheizer liefert im stromgesteuerten Betrieb des PEFC-Systems eine tägliche thermische Energiemenge von 180 kWh, der ein täglicher Bedarf von 94 kWh im Winter gegenübersteht. Im Sommer ist der thermische Bedarf sogar noch erheblich geringer. Um jedoch bei Stoßlüftung z. B. um 9:00 und um 21:00 Uhr die Temperaturabsenkung in kurzer Zeit zu kompensieren, ist zusätzlich der Einbau eines 30-Liter-Speicherbehälters notwendig.

Auf dem aktuellen Stand der Brennstoffzellentechnik mit einem elektrischen Netto-Wirkungsgrad von etwa 40% sollte ein Haus mit Netzankopplung betrieben werden. Trotzdem kann im Prinzip zwischen zwei Auslegungsextremata für ein PEFC-System gewählt werden:

1. Auslegung des PEFC-Systems nach dem elektrischen Energiebedarf und, folglich, Wärmeverlust speziell im Sommer sowie reduzierter Brennstoffnutzungsgrad.
2. Netzkopplungsbetrieb und Deckung des thermischen Energiebedarfs mit einem kleineren PEFC-System und entsprechend großem thermischen Speicher.

Das für die Versuchsanlage PEMA ausgewählte Prinzip der Wärmerückgewinnung ist eine preiswerte und zuverlässige Lösung, die zudem den Vorteil hat, im Sommer durch Verschaltungsänderung des Kreislaufs auch für Kühlzwecke eingesetzt werden zu können. Der Kühlmittel-Luft-Wärmeübertrager muss nur mit Hilfe von Ventilen einmal vor dem Kühlmittel-Entspannungsventil zur Heizung oder nach dem Ventil für Kühlung betrieben werden.

Literatur

- [1] Gailfuß 1998: Daten des BHKW Infozentrum Rastatt, im Internet unter www.bhkw-infozentrum.de, M. Gailfuß, Rastatt, 1998
- [2] TAB-Studie 2000: Brennstoffzellen-Technologie. Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, Deutscher Bundestag, Drucksache 14/5054, Berlin, 2001
- [3] Scheffer 2000: Biomasse – gespeicherte Sonnenenergie aus der Vielfalt der Pflanzenarten – Potenziale, Bereitstellung, Konversion, K. Scheffer in Themenheft 2000: Sonne - Die Energie des 21. Jahrhunderts, FVS (Hrsg.), Berlin, 2000
- [4] Rösch 1998: Energetische Nutzung von Biomasse mit Brennstoffzellen – Grundlagen und Systeme. Ch. Rösch in Gülzower Fachgespräche, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Gülzow, 1998
- [5] Dielmann 2000: Mikrogasturbine, Entwicklungsstand, Vorteile und Markteinführung. K. Dielmann in: Bayerngas-Symposium 2000, München, 2000
- [6] Brinner 2001: Experimental Operation of a PEFC-System as a Co-Generation Plant for the Energy Supply of a Single-Family-House. Brinner, Philipps, Urbano, Fuel Cell, 2001, Luzern 2001