

KRAFT-WÄRME-KÄLTE-KOPPLUNG MIT BRENNSTOFFZELLE ZUR VERSORGUNG DES MALTESER-KRANKENHAUSES IN KAMENZ

Dr.-Ing. Karin Rühling, Technische Universität Dresden, Institut für Energietechnik, 01062 Dresden
Dipl.-Ing. Peter Seifert, DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH, Halsbrücker Str. 34, 09599 Freiberg

1 Ziel des Vorhabens

Brennstoffzellen gehören inzwischen zu den Zukunftsoptionen einer modernen Energieversorgung. Heute noch vorwiegend erdgasbetrieben, können perspektivisch regenerativ erzeugter Wasserstoff oder Methanol als Brennstoff zum Einsatz kommen. Um aus der Zukunftsoption Realität werden zu lassen ist es nicht nur erforderlich, daß eine breitere Palette an preiswerten Serien - Brennstoffzellen zur Verfügung steht, sondern daß Systemkonzepte erprobt werden, die eine optimale Nutzung sowohl des erzeugten Stroms als auch die ganzjährige Nutzung der anfallenden Wärme sicherstellen.

Deshalb arbeitet seit 1997 ein Konsortium bestehend aus der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Leipzig, Außenstelle Freiberg, der GASTEC N.V. Apeldoorn (Niederlande) und der Technischen Universität Dresden an der Konzeption und Realisierung der innovativen Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage mit Brennstoffzelle des Malteser-Krankenhauses in Kamenz (Bild 1). Das Projekt wird gefördert durch:

- die Europäische Union
- den Freistaat Sachsen
- die Verbundnetz Gas AG
- die Thyssengas GmbH
- die Gasversorgung Sachsen Ost GmbH

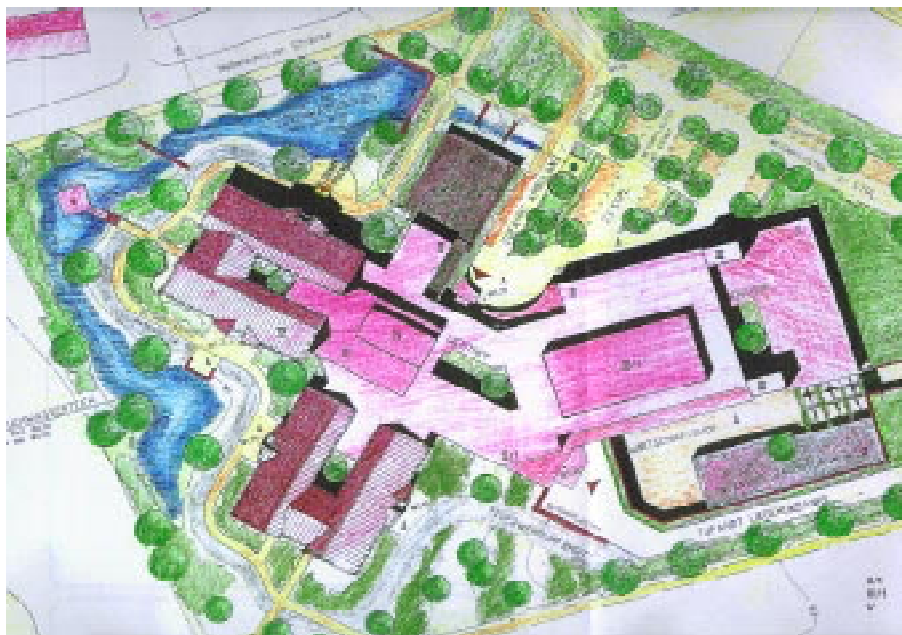


Bild 1 Planungsansicht Malteser-Krankenhaus Kamenz (Architektengruppe Schweitzer + Partner, Braunschweig)

Einige der in den letzten fünf Jahren in Deutschland errichteten Krankenhäuser besitzen eine dem Stand der heutigen Technik entsprechende Energieversorgung auf Basis von Blockheizkraftwerken und Absorptionskältemaschinen. Neue Wege werden derzeit bei der Ausführung der Energiezentrale des in Bau befindlichen Malteser-Krankenhauses in Kamenz beschritten. Das Krankenhaus wird mit 210 Betten und zusätzlichen 25 Plätzen in einer ambulanten Tagespsychiatrie dem Bedarf des Kreises Kamenz angepaßt sein. Die Planungen gehen von folgenden Anschlußwerten für die Energieversorgung aus:

- 1,8 MW Raumheizung/Lüftung/Warmwasserbereitung
- 440 KW elektrische Leistung
- 220 kW Kälte

Zwei Niedertemperatur-Kessel mit je 900 kW Leistung stellen im wesentlichen Raumheizung, Lüftung und Warmwasserbereitung sicher. Die innovative KWKK-Anlage mit Brennstoffzelle und solarer Stützung wird die in Tabelle 1 angeführten Hauptkomponenten vereinen. Mit Ausnahme der Solartechnik aus sächsischer Produktion ist jede Komponente für sich bereits in Pilotvorhaben praktisch eingesetzt worden. Ganz entscheidend für das Innovationspotential des Modellvorhabens ist es, ein neuartiges Gesamtsystem (Bild 2) zu konzipieren und praktisch umzusetzen, welches gegenüber herkömmlichen Lösungen technische, wirtschaftliche und ökologische Vorteile besitzt. Der Beleg dafür ist in einer 2-jährigen Monitoringphase zu erbringen.

Tabelle 1 Technische Daten und Hersteller der Hauptkomponenten

Komponente	Technische Daten		Hersteller
Phosphorsäure-Brennstoffzelle (PAFC)	200 kW 220 kW	elektrische Leistung thermische Leistung	ONSI
Adsorptions-Kältemaschine	105 kW	Kälteleistung	MYKOM
Sole-Kompressions-Kältemaschine	80 kW	Kälteleistung	YORK
Eisspeicher	400 kWh	latente Speicherkapazität	FAFCO
Wärmespeicher	20 m ³	Speicherinhalt	FLAMCO/ SOLVIS
TWD-Kollektoren	115 m ²	installierte Fläche	SSL Eibau
Multisolar-Kollektoren	15 m ²	installierte Fläche	SOLARWATT Dresden

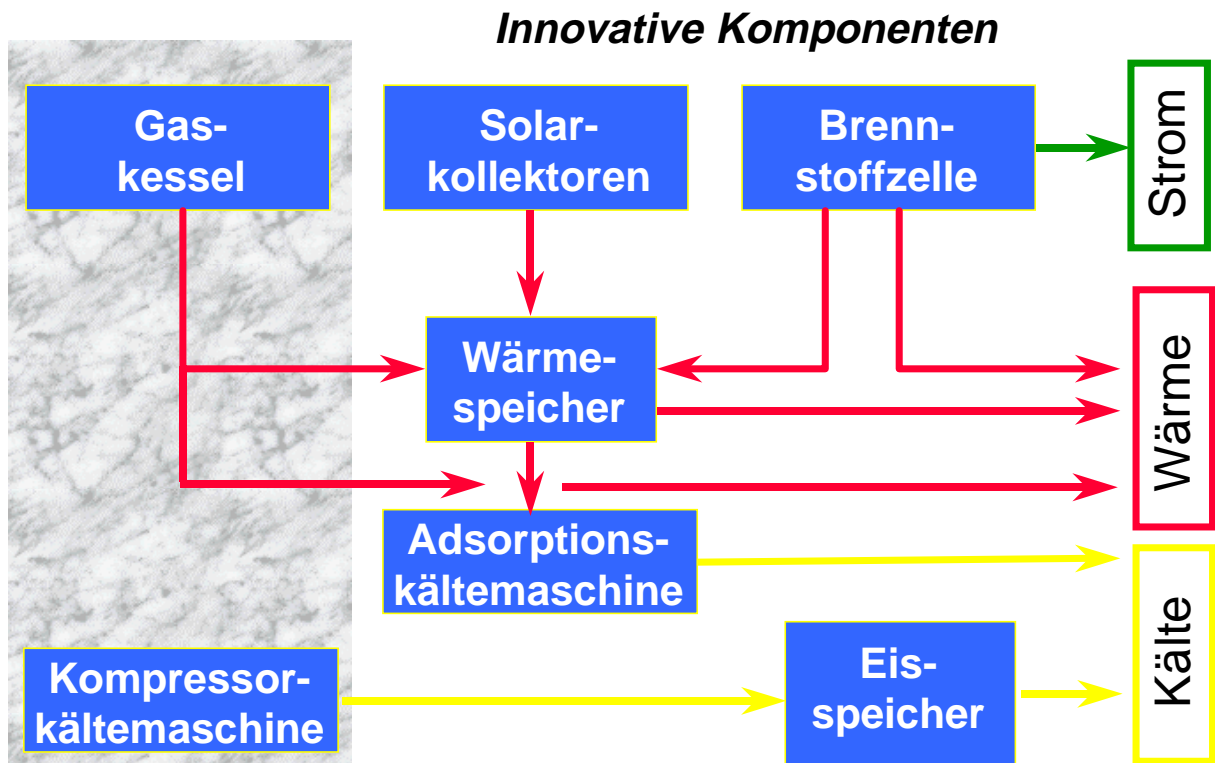


Bild 2 Komponenten des Projektes

2 Funktionsweise der Hauptkomponenten

Phosphorsäure-Brennstoffzelle

Im Gegensatz zu den am weitesten verbreiteten Anlagen zur dezentralen Erzeugung von Strom und Wärme, den Blockheizkraftwerken, die auf Basis eines thermischen Verfahrens arbeiten, setzen Brennstoffzellen die chemische Energie des Brennstoffes ohne Umwege über die thermische Energie direkt in elektrische Energie um. Brennstoffzellen versprechen sehr hohe Wirkungsgrade, kommerziell verfügbar ist praktisch nur die Phosphorsäure-Brennstoffzelle (BZ) PC25™ Modell C des amerikanischen Herstellers ONSI. Bild 3 zeigt das Funktionsprinzip.

Die für das Modellvorhaben vorgesehene BZ arbeitet bei einer Betriebstemperatur von 200 °C und im Bereich 50 - 100 % elektrischer Leistung mit einem nahezu konstanten elektrischen Wirkungsgrad von etwa 40 %. Die tatsächlich erzielten Emissionen bezüglich NO_x, CO, SO₂ und C_xH_y liegen im Vergleich zu Gasmotor-BHKW-Anwendungen bei 2 bis 5 % [1,3].

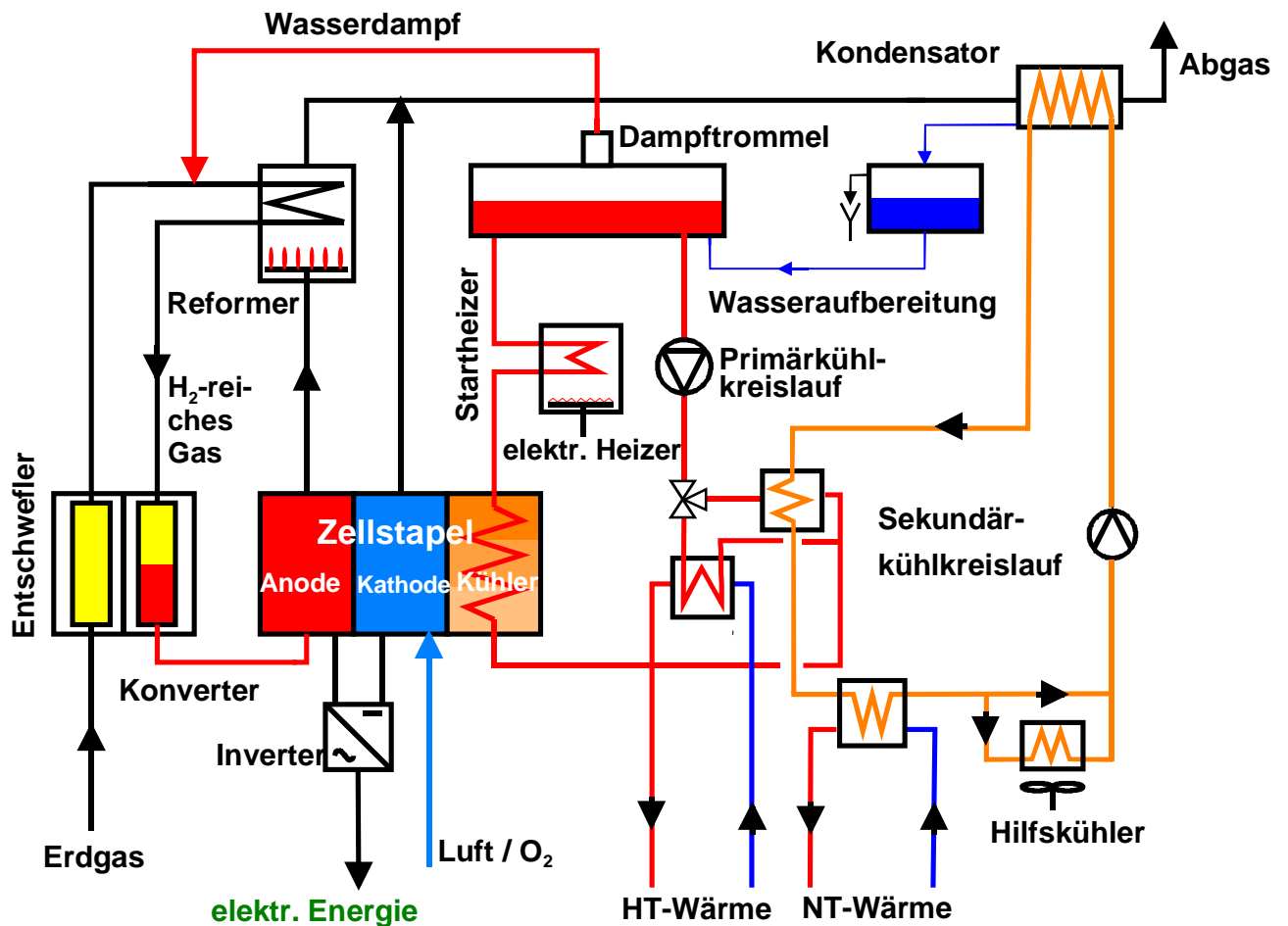


Bild 3 Aufbau einer erdgasbetriebenen BZ (nach [4])
(HT – Hochtemperatur, NT – Niedertemperatur)

Die Standardvariante der BZ PC 25™ C liefert thermische Energie auf einem Temperaturniveau von 70 - 75 °C. Im Modellvorhaben soll die Option genutzt werden, daß etwa die Hälfte der thermischen Leistung (110 kW) bei Temperaturen von 90 - 110 °C (Hochtemperaturbereich) ausgekoppelt werden können. Die restlichen 110 kW stehen dann bei 60 - 70 °C (Niedertemperaturbereich) zur Verfügung. Zum optimalen Betrieb der BZ muß der Niedertemperaturbereich verbraucherseitig mit Rücklauftemperaturen von 30 °C bedient werden. Auf der HT-Verbraucher-Seite sind Spreizungen von ≤ 40 K zulässig. Für Sorptionskältemaschinen, die mit einer Temperaturspreizung des Heizmediums von ca. 10 K arbeiten, ergeben sich somit optimale Koppelbedingungen.

Adsorptionskältemaschinen

Die Sorptionsprozesse stellen eine besonders umweltfreundliche Variante der Kälteerzeugung dar. Anstelle verlustreich erzeugten Stroms benötigen sie Wärme, die den primärenergetisch zu bevorzugenden Energiequellen Abwärme, Wärme aus KWK-Anlagen und Solarenergie entstammen können. Während Absorptionskältemaschinen Heiztemperaturen von mindestens 95 °C benötigen, können Adsorptionsmaschinen bereits ab 75 °C

mit vergleichbaren Kälteverhältnissen arbeiten. Die Prinzipskizze einer Adsorptionskältemaschine (AdKM) zeigt Bild 4. Nähere Erläuterungen sind [2] zu entnehmen. AdKM eignen sich damit hervorragend zur thermischen Kopplung mit der BZ. Nachteilig für den breiten technischen Einsatz stellt sich derzeit noch das Preisniveau von 1.500 -2.600 DM/kW Kälteleistung dar.

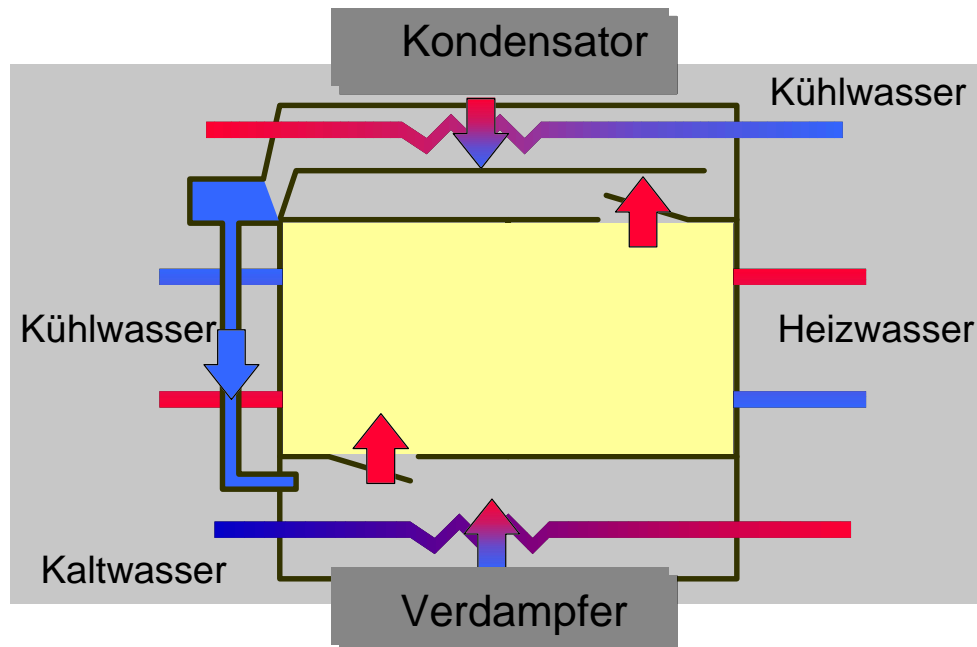


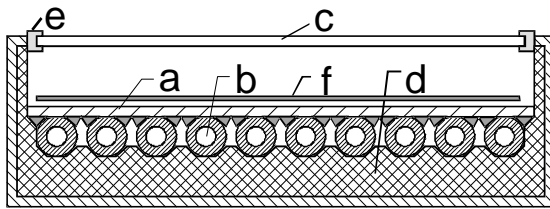
Bild 4 Prinzipskizze einer Adsorptionskältemaschine

Solarkollektoren

Auf dem Dach der Energiezentrale des Krankenhauses Kamenz soll ein Kollektorfeld installiert werden, dessen Solarertrag im Winter zur Unterstützung des Heizbetriebs und der Warmwasserbereitung eingesetzt wird. Im Sommerhalbjahr erfolgt eine direkte Nutzung zum thermischen Antrieb der Adsorptionskältemaschine. Das Kollektorfeld wird aus zwei Arten von Kollektoren aufgebaut. Ca. 90 % der Absorberfläche werden als Flachkollektoren mit einer Glasröhrchen-TWD-Abdeckung ausgebildet. Der innere Aufbau der Transparenten Wärmedämmung (TWD) als dicht gepackte Glasröhrchen-Struktur, bestehend aus 10 cm langen Glasröhrchen mit 1 cm Durchmesser und 0,1 mm Wandstärke, verspricht gute Erträge in den Übergangszeiten und den Wintermonaten und erlaubt im Gegensatz zu Kunststoff-TWD-Materialien das Arbeiten bei Temperaturen bis 180 °C und höher. Die Wirkungsgradkennlinie ist entsprechend flacher ausgebildet.

Komplettiert wird die Absorberfläche durch den Einsatz von 15 m² Hybridkollektoren Multisolar®. Vom Grundaufbau sind sie mit Flachkollektoren vergleichbar (Bild 5). Jedoch wird die Absorberoberfläche durch eine Anordnung kristalliner Photovoltaikmodule (PV) weitestgehend abgedeckt. Das Sonnenlicht fällt zunächst auf die PV-Zellen, die entsprechend ihrer spektralen Empfindlichkeit bestimmte Anteile aus dem Sonnenlicht herausfiltern und in Solarstrom umwandeln. Die verbleibenden Spektralanteile werden am thermischen Absorber in Wärme umgewandelt. Ein Multisolar®-Modul (LxBxH 2.152x892x114) erzeugt je nach PV-Zellenart 150 - 180 W_p und besitzt einen optischen Wirkungsgrad von

68 %. Der Solarstrom wird indirekt zum Antrieb der Pumpen des Kollektorkreislaufs genutzt.



- a - Absorber
- b - Wärmeträgerrohr
- c - transparente Abdeckung
- d - Isolierung
- e - Dichtung
- f - Photovoltaikmodul



Bild 5 Prinzipaufbau und Foto des Multisolar®

3 Funktionsweise der Anlage

Der Einsatz der innovativen KWKK-Anlage erfolgt mit dem Ziel einer möglichst ganzjährigen Nutzung der in der Brennstoffzelle erzeugbaren elektrischen sowie thermischen Energie. Bild 6 zeigt den prognostizierten Tagesgang des Strombedarfs für das Malteser-Krankenhaus Kamenz. Entsprechend des eingezeichneten elektrischen Arbeitsbereiches der Brennstoffzelle mit Wirkungsgraden zwischen 39 und 41 % ist der Dauerbetrieb der Anlage aus Sicht der elektrischen Leistungsabnahme bei fast optimalen Bedingungen möglich.

Wesentlich komplexer stellen sich die Verhältnisse auf der Wärme-Kälte-Seite dar. Die starken tageszeitlichen Schwankungen sollen durch den Einsatz des 20-m³-Wärmespeichers sowie des Eisspeichers ausgeglichen werden. Grundsätzlich fungiert die Brennstoffzelle ganzjährig als Wärmeerzeuger mit erster Priorität, so daß die Nieder-temperatur-Kessel erst bei einem Wärmebedarf größer 220 kW zugeschaltet werden. Der NT-Teil der Brennstoffzelle speist direkt in die Verbraucher-Sammelschiene. HT-Teil und Solaranlage arbeiten auf den 20-m³-Schichtenspeicher.

Im Winterlastfall erfolgt die verbrauchsabhängige Entladung des Speichers für die Raumheizung, Lüftung und Warmwasserbereitung. Im Sommerlastfall wird aus dem Speicher vorrangig die Energie für den thermischen Antrieb der Adsorptionskältemaschine bereitgestellt. Nur Überschußwärme wird in die Verbraucher-Sammelschiene eingespeist.

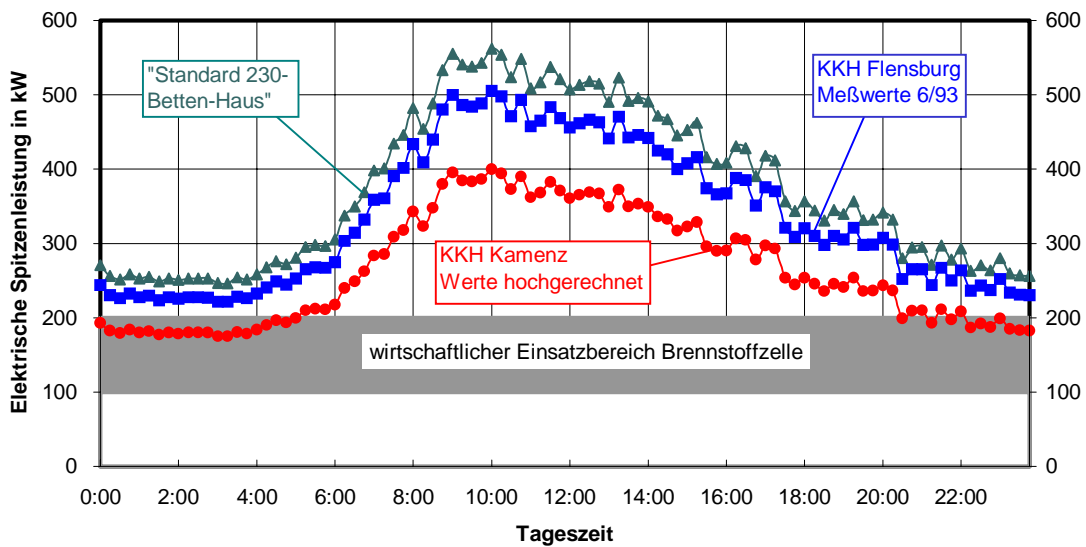


Bild 6 Tageskurven des elektrischen Leistungsbedarfs (nach HTA Planungsgesellschaft mbH) und wirtschaftlichster Arbeitsbereich der BZ

Ein am Institut für Thermodynamik und TGA der TU Dresden erarbeitetes Berechnungsmodell auf der Basis von TRNSYS[®] ermöglicht es, das Zusammenspiel der Einzelkomponenten der Wärme-Kälte-Seite der Energiezentrale zu simulieren.

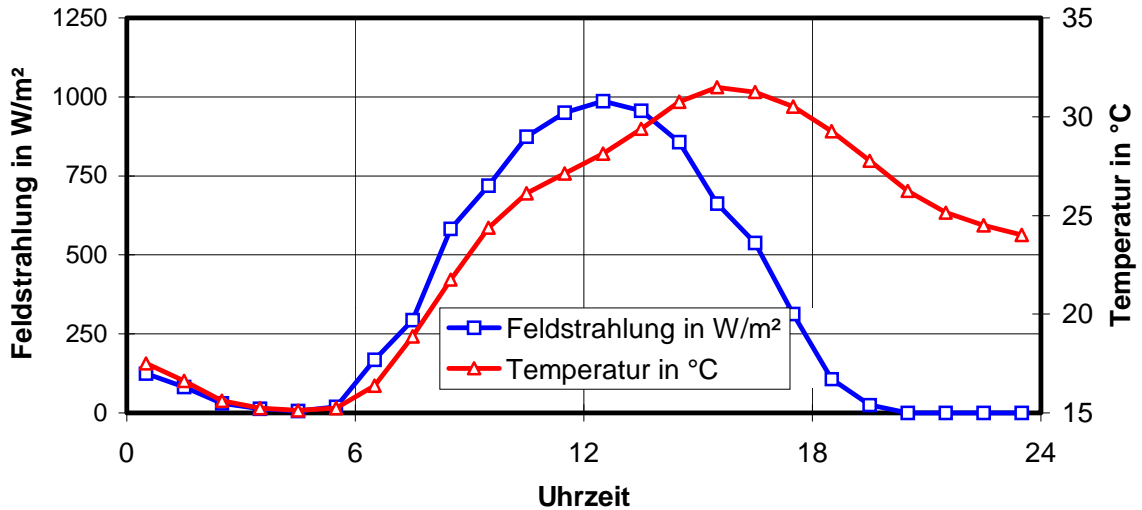


Bild 7 Tagesgänge der Feldstrahlung und der Außentemperatur am Auslegungstag

Für den Auslegungstag wurden die in Bild 7 dargestellten Tagesgänge der Feldstrahlung und der Außentemperatur zugrunde gelegt. Zunächst galt es nachzuweisen, daß durch das geplante thermische Kollektorfeld in Kombination mit dem Wärmespeicher tatsächlich die Spitzenlast Kälte am Nachmittag abgefangen und somit ein Betrieb des Adsorbers nahe des Auslegungspunktes gewährleistet werden kann.

Bild 8 zeigt, daß bei Verzicht auf die Solarwärme (Lastfall AdKM BZ) die von der BZ gelieferte Wärme nicht ausreicht, den Adsorber in der Zeit ab 15 Uhr bei Nennleistung von 105 kW zu betreiben, da das Niveau der Heizkreis-Vorlauftemperatur (HK-VL BZ) am Adsorber eine Leistungsreduzierung nach sich zieht. Der Anteil des Adsorbers an der Kältearbeit beträgt in diesem Fall 68 %. Es müßte der konventionelle Heizkessel in Betrieb genommen werden.

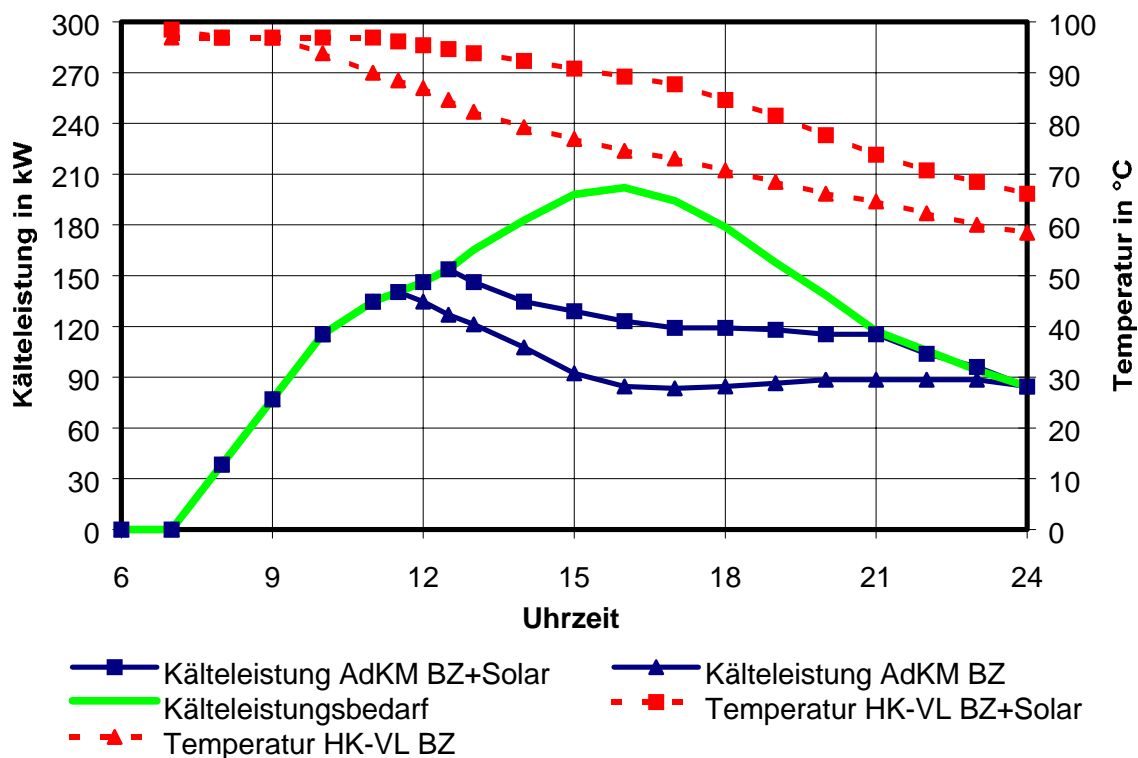


Bild 8 Leistungsanteile des Adsorbers mit und ohne Solarwärmenutzung

Bei Integration des solarthermischen Anteils (Lastfall AdKM BZ+Solar) kann der Adsorber entsprechend der vom Wärmespeicher gelieferten Heizkreis-Vorlauftemperatur (HK-VL BZ + Solar) die maximale Kälteleistung zur Verfügung stellen. Da das vom Wärmespeicher bereitgestellte Temperaturniveau über der Auslegungstemperatur liegt, erzeugt die AdKM in der Zeit von 10 bis 21 Uhr Kälteleistungen > 105 kW. Der Arbeitsanteil des Adsorbers beträgt dann 82 %.

Der verbleibende Kältebedarf wird durch den Einsatz der Kompressionskältemaschine (KKM) in Verbindung mit dem Eisspeicher gedeckt. Die Dimensionierung erfolgte so, daß die KKM nur an weniger als 10 - 15 Tagen im Jahr in der Spitzenlastzeit zwischen 9 und 18 Uhr in Betrieb gehen muß. Nur an den wenigen Tagen des Jahres mit Außentemperaturen ≥ 32 °C wird, wie in Bild 9 für den Auslegungstag gezeigt, ein 5-stündiger Betrieb der KKM erforderlich. Die Kälteleistungsspitze wird durch den Einsatz des Eisspeichers gedeckt.

Der Betrieb der KKM im Zeitraum von 23 - 6 Uhr ist ausreichend, den Eisspeicher mit einer latenten Speicherkapazität von 390 kWh zu laden. Bis ca. 13 Uhr übernimmt allein die AdKM die Deckung des Kälteleistungsbedarfs. Dann setzt der Entladebetrieb Eisspeicher ein. Zur Deckung der Lastspitze zwischen 14 und 18 Uhr ist der Betrieb aller Komponenten der Kälteerzeugung erforderlich. Ab ca. 21 Uhr übernimmt der Adsorber allein die Kälteerzeugung.

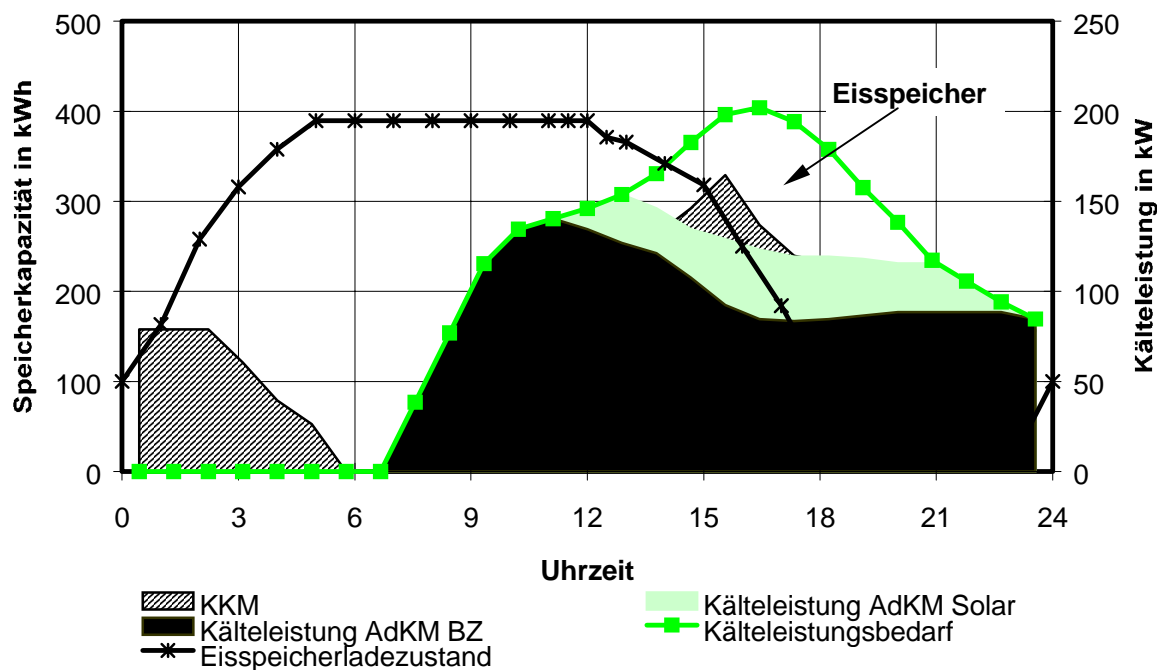


Bild 9 Lastanteile der Kälteerzeuger am Auslegungstag

4 Ausblick

Der Bau der Energiezentrale ist im vollen Gange. Bild 10 zeigt den Bautenstand im Juni diesen Jahres. Ab September wird die Baustelle mit Raumheizwärme versorgt, im Oktober 1999 wird die Brennstoffzelle geliefert und ab März 2000 beginnt der Probetrieb für das Komplettsystem inklusive Kälteerzeugung und Solaranlage. Mit der Vergabe der Leistung liegen nunmehr auch Angaben über die wirklichen Investitionskosten inkl. Lieferung, Montage und Inbetriebnahme vor.

Brennstoffzelle (Kurs 1 \$ = 1,8 DM)	1.656	TDM
Wärme/Kälteerzeugung (ohne Niedertemperaturkessel)	551	TDM
Regelung innovativer Teil	186	TDM
Summe	2.393	TDM

Im Zeitalter der Liberalisierung der Energiemärkte stellt sich nun selbstverständlich die Frage nach marktfähigen Preisen für die bereitgestellte Kilowattstunde Nutzenergie. Eine solche Rechnung soll hier nur für die reine Brennstoffzelle angestellt werden. Tabelle 2 zeigt die Investkosten des konkreten Projekts, Kosten für Wartung und fixe Betriebsko-

sten in Anlehnung an eine bereits in Betrieb befindliche BZ gleichen Typs und [3] sowie die Eckdaten für die Wirtschaftlichkeitsrechnung. Ohne Förderung würden sich jährliche Verluste in Höhe von ca. 71 TDM ergeben.

Tabelle 2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung Brennstoffzelle (Stand Juni 1999)

Brennstoffzelle	DM	1.656.000
Zellstapelersatz nach 5 Jahren	DM	250000
Zinssatz	%	8
Lebensdauer	a	10
Jährliche Wartungskosten	DM	50000
fixe Betriebskosten	DM	10.000
Erdgaspreis	Pf/kWh	3,4
Preis gesparter Elt-Bezug	Pf/kWh	20
Wärmepreis	Pf/kWh	5,5
Vollaststunden	h/a	7500
Jahresnutzungsgrad elektr.	%	39



Bild 10 Baustelle Malteser-Krankenhaus Kamenz
Energiezentrale Bauteil F (Stand 02.06.1999)

Genauere Analysen sind erst nach 1 bis 2 Betriebsjahren sinnvoll und werden zeigen, ob die für das Modellvorhaben gewählte Systemkonfiguration die prognostizierten Ertragswerte erreicht. Im Rahmen des EU-THERMIE-Projektes ist eine Monitoringphase geplant, die sowohl in der Inbetriebnahmephase als auch über mindestens einen kompletten Jahresgang das Systemverhalten verfolgt. Dabei sind Meßwertaufzeichnung und adaptive Anpassung der Betriebsführung und Regelung gekoppelt zu realisieren.

Da insbesondere die BZ und die AdKM derzeit noch weit von einem wirtschaftlichen Einsatz ohne Fördermaßnahmen entfernt sind, muß das Projekt bezüglich des minimalen Primärenergieeinsatzes einen eindeutigen Vorzug gegenüber bisherigen Konzepten nachweisen. Nur dann kann dieses neuartige System der KWKK in Europa etabliert werden.

Literatur

- [1] Technische Beschreibung Brennstoffzellen-KWK-Modul ONSI[®] PC25[™], Modell C. EES GmbH Essen; C.L.C. S.r.l. Genova
- [2] Gassel, A.: Der Einsatz von Adsorptionskältemaschinen (SiO₂/H₂O) in Anlagen der solaren Klimatisierung. Kurzvortrag 11. Internat. Sonnenforum, Köln 1998
- [3] Krein, St.: Brennstoffzellen für die dezentrale Energieversorgung. Grundlagen, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. erdgas report 2/99, VNG-Verbundnetz Gas AG Leipzig, 1999
- [4] Gummert, G.: Planung, Aufstellung und Betrieb von Brennstoffzellen – Heizkraftwerken. Vortrag zum Kolloquium Brennstoffzellen in der Energieversorgung, TU Dresden, 19. März 1998