

# Betriebserfahrung an einem thermischen Kollektor mit TWD-Abdeckung zur solaren Klimatisierung

Dipl.-Ing. Hartmut Scholz SSL Eibau

Dr.-Ing. Karin Rühling, Technische Universität Dresden

Im neuen Malteser-Krankenhaus St. Johannes in Kamenz wurde ein bislang in Europa einmaliges Konzept der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung verwirklicht. Kernstück ist ein Brennstoffzellen-BHKW des Phosphorsäure-Typs ( $200 \text{ kW}_{el}$ ;  $220 \text{ kW}_{th}$ ). Thermische Energie aus der Brennstoffzelle und Solarwärme aus neuartigen TWD-Kollektoren sächsischer Produktion realisieren den thermischen Antrieb einer Adsorptions-Kältemaschine ( $105 \text{ kW}$ ) für die Kälteversorgung in der Grundlast. Der Weg vom Konzept bis zur Realisierung sowie ausgewählte Betriebserfahrungen im solar- und kältetechnischen Bereich werden beleuchtet.

## 1 Projektansatz

Die erste Projektidee stammt aus dem Jahre 1996.

Am weitesten fortgeschritten war zu diesem Zeitpunkt die Brennstoffzellenentwicklung im Bereich von  $200$  bis  $250 \text{ kW}_{el}$  (PAFC – Serienprodukt, PEM und MCFC – erste seriennahe Prototypen). Krankenhäuser lagen durch den ganzjährigen Warmwasserbedarf, den auch nachts mit  $20$  bis  $40 \%$  noch hohen Strombedarf und den Klimatisierungsbedarf in den operativen und sonstigen medizinisch-technischen Raumgruppen als potentieller Anwendungsfall auf der Hand.

Die Abbildung 1 zeigt die stark vereinfachte Verschaltung und die maximalen Leistungsanteile der innovativen Hauptkomponenten. Die Anlage ist so konzipiert, dass teure, innovative Technik in der Grundlast arbeitet.

Die Mittel- und Spitzenlast des Strombedarfs ( $240 \text{ kW}$ ) wird aus dem Netz des Regionallieferers gedeckt. Die auf der konventionellen Anlagenseite installierten zwei  $900\text{-kW}$ -Niedertemperatur-Kessel gewährleisten die wärmeseitige Versorgung in diesem Lastsegment.

Eine sinnvolle Einheit können Brennstoffzellen- und Solartechnik nur dann bilden, wenn im Sommer eine nahezu direkte Nutzung sowohl der Wärme aus der Brennstoffzelle als auch der Solarenergie

gesichert ist. Deshalb wurde die Adsorptionskältemaschine ( $105 \text{ kW}$ ) so dimensioniert, dass mit dieser Wärme die thermische Verdichtung erfolgt. Eine Kompressions-Kältemaschine übernimmt die Spitzenlast Kälte ( $80 \text{ kW}$ ).

Die Integration eines  $20\text{m}^3$ -Wärmespeichers und eines Eisspeichers ( $400 \text{ kWh}$  latent) vermeidet unnötiges Takten der Wärme- und Kälteerzeuger.

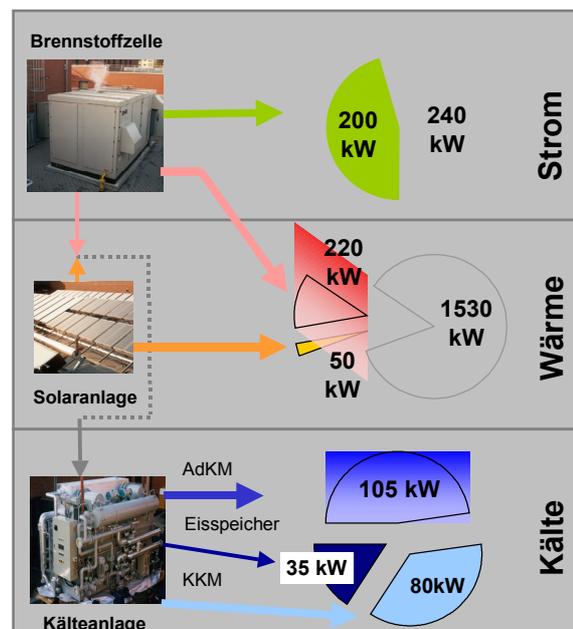


Abbildung 1 Innovative Hauptkomponenten

## 2 Brennstoffzelle

Die Phosphorsäure-Brennstoffzelle dieses Projektes hat zwei Besonderheiten:

- 50 % der Wärme (110 kW) können auf hohem Temperaturniveau (85 bis 95 °C) und 50 % auf niedrigem Temperaturniveau (50 bis 70 °C) ausgekoppelt werden.
- Bei Ausfall des äußeren Netzes kann die Brennstoffzelle die Stromversorgung für einen Teilbereich des Krankenhauses entsprechend dessen aktuellen Energiebedarfs übernehmen. Diese netzunabhängige Versorgung durch eine Brennstoffzelle wurde europaweit erstmalig realisiert.

Im Februar 2000 begann die Test- und Inbetriebnahmephase für die Brennstoffzelle. Alle dabei aufgetretenen Probleme sind ausführlich in [1] beschrieben. Positiv ist die Tatsache, dass im eigentlichen Brennstoffzellenprozess keinerlei Fehlfunktionen zu verzeichnen waren.

Die Bilanzmittelwerte der Brennstoffzelle für das erste Betriebsjahr im Krankenhaus-Versorgungsbetrieb sind besonders interessant, da sie neben dem kontinuierlichen Betrieb alle An- und Abfahrvorgänge sowie die Hilfsenergie während der Ausfallzeiten beinhalten.

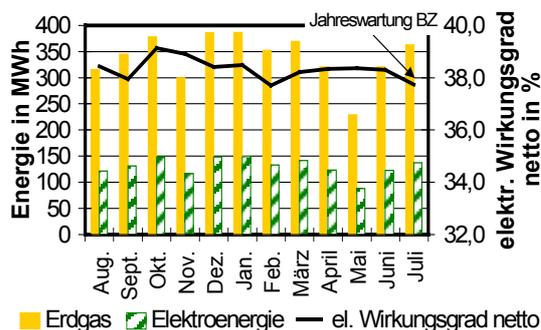


Abbildung 2 Monatsbilanzen Brennstoffzelle

Für die Stromerzeugung beträgt der Mittelwert  $\eta_{el} = 38,4\%$  (max. 40 %) und für die Wärmeauskopplung auf dem hohen Temperaturniveau (HT)  $\eta_{th,HT} = 17,0\%$  (max. 22 %).

Wie stabil arbeitete nun die Brennstoffzelle im ersten Betriebsjahr? Tabelle 1 belegt

recht eindrucksvoll eine 96,4 %-ige Zeitverfügbarkeit und eine 95,4 %-ige Leistungsverfügbarkeit. Unter Minderlast sind die Zeiten zu verstehen, in denen die Zelle im Inselbetrieb auf die Bettenhäuser des Krankenhauses gearbeitet hat. Diese Betriebsfälle im Lastbereich von 5 bis 80 kW sind unerwünscht, da sie mit schlechten Wirkungsgraden verbunden sind, belegen jedoch recht eindrucksvoll die Inselbetriebsfähigkeit der Zelle.

Tabelle 1 Verfügbarkeit Brennstoffzelle

	Aug 00	Sep 00	Okt 00	Nov 00	Dez 00	Jan 01	Feb 01	März 01	Apr 01
Volllast	610	649	738	590	740	740	663	589	420
Teillast	4	3	2	0	1	2	5	155	300
Minderlast	6	68	4	0	3	2	4	0	0
Störung	124	0	0	130	0	0	0	0	0
	Mai 01	Jun 01	Juli 01	Aug 01	Sep 01	Okt 01	Nov 01	Dez 01	SUMME
Volllast	433	450	337	460	435	454	436	413	9157
Teillast	310	270	224	281	266	284	272	254	2633
Minderlast	1	0	1	3	3	6	1	0	102
Störung	0	0	182	0	16	0	11	77	540

## 4 Kälteanlage

In Kamenz wurde zu Bereitstellung der Kältegrundlast eine Adsorptionskältemaschine (AdKM) vom Typ Mycom ADR 30 des japanischen Herstellers Mayekawa installiert. Diese Maschine arbeitet mit dem Stoffpaar Silicagel/Wasser. Da es sich um ein festes Sorptionsmittel handelt, sind Adsorber und Desorber als umschaltbare Kammern ausgeführt, so dass sich eine zyklische Betriebsweise ergibt. Die Zyklusdauer beträgt 10 Minuten. Große Wärmeübertragerflächen ermöglichen eine Betriebsweise nahe an den thermodynamischen Grenzen.

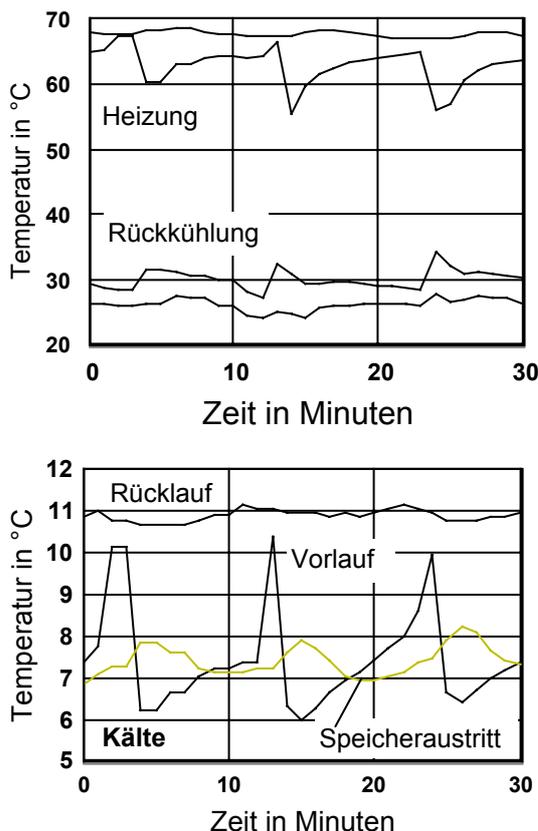
Die bei Absorptionskältemaschinen (AbKM) zu beachtende Kristallisationsgefahr entfällt bei AdKM. Beide Eigenschaften ermöglichen den Betrieb bei geringeren Heiztemperaturen (min. 60 °C) als Absorptionsmaschinen mit dem Stoffpaar LiBr/H<sub>2</sub>O (min. 80 °C) sowie ein stabiles Betriebsverhalten. Negativ fallen der gegenwärtig noch deutlich höhere Preis sowie ein größeres Bauvolumen und die höhere Masse auf. Auch die erreichbaren C.O.P.-Werte liegen mit 0,6 ca. 15 % unter den theoretisch mit AbKM erreichbaren (0,7).

Die AdKM arbeitet bei Heiztemperaturen um 65 °C korrekt, also in einem Temperaturbereich, der für Absorptionskältemaschinen nicht nutzbar ist.

Der C.O.P.-Wert liegt im praktischen Nenn-Betrieb annähernd beim Katalogwert von 0,6. Die Schwankungen zwischen 0,56 und 0,65 bei fast konstanten Randbedingungen sind lediglich messtechnisch bedingt.

In Abbildung 3 sind die Temperaturverläufe für drei Zyklen dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Zeit von 08.00 bis 08.30 Uhr am 16. August 2000.

Bei Zyklusumschaltung steigt die Kältevorlauftemperatur an, da keine Adsorption und folglich keine Kälteentwicklung stattfindet. Dem schließt sich eine Phase an, in der die neue Adsorberkammer erst abgekühlt werden muss und auch keine Kälteentwicklung stattfindet.



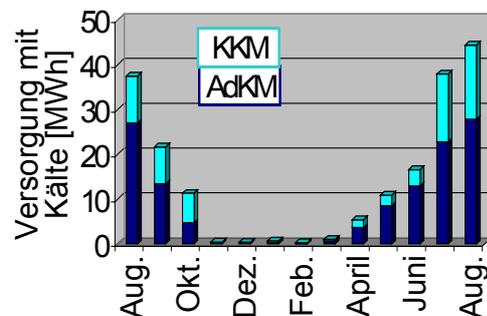
**Abbildung 3** Typischer Temperaturverlauf AdKM im KH Kamenz

Danach gibt es eine sehr große Kälteproduktion, da die Adsorberkammer sehr trocken ist und intensiv adsorbiert. Die

Kältevorlauftemperatur fällt stark ab. Gegen Zyklusende geht das Adsorptionsvermögen zurück und die Kältevorlauftemperatur steigt wieder an. Die starke Schwankung der Kältevorlauftemperatur zwischen 6 °C und 10,5 °C wäre für die Kälteverbraucher regelungstechnisch schwer beherrschbar. Der mit der Kältemaschine in Reihe geschaltete 1,5-m<sup>3</sup>-Misch-Speicherbehälter dämpft diese Schwankung erfolgreich (siehe Verlauf Speicheraustrittstemperatur in Abbildung 3) ab.

Interessant ist die statistische Auswertung des ersten Betriebsjahres im echten Krankenhaus-Versorgungsbetrieb. Wie Abbildung 4 zeigt, hat die AdKM tatsächlich die Grundlastversorgung des Krankenhauses mit Kälte übernommen. Bei kritischer Betrachtung wird deutlich, dass der AdKM-Anteil im Jahr 2001 rückläufig ist. Dafür sind zwei Gründe zu nennen.

- Erstens hat sich infolge der Liberalisierung des Strommarktes die Relation zwischen Gas- und Strompreis so verschlechtert, dass eine Stromspeisung nachts nicht sinnvoll ist. Die Brennstoffzelle wird dementsprechend nachts in Teillast betrieben. Eine Wärmeauskopplung im sogenannten HT-Bereich ist somit nicht möglich. Der AdKM-Betrieb ist durch ein um 5 bis 10 K niedrigeres Heiztemperaturniveau stark begrenzt.
- Zweitens wurde wegen luftseitiger Probleme in den Klimaanlage die Vorlauftemperatur von 8 auf 6 °C abgesenkt. Da jedoch im Kälteverbraucherkreis teilweise nur 1 bis 3 K Spreizung realisiert werden, kommt es recht häufig zur Aktivierung des AdKM-internen Frostschutzes.



**Abbildung 4** Monatsbilanzen Kälte 2000/01

Die Auslegungsleistung von 220 kW Kälte wurde bislang im Krankenhaus noch nicht benötigt (max. Inanspruchnahme 180 kW). Die Kontrolle der Betriebsführungsstrategie für diesen Tag (siehe auch [3]), d.h.

- Eisspeicherladung mittels Kompressionskältemaschine (KKM) in der Nacht
- AdKM-Betrieb bis ca. 11.00 Uhr
- sorptionsgestützter AdKM-Betrieb mit paralleler Eisspeicherentladung bis ca. 13.00 Uhr
- zusätzlicher kurzzeitiger KKM-Betrieb bis ca. 15.00 Uhr
- danach erneut AdKM-Betrieb plus Eisspeicherentladung

steht somit noch aus. Der Eisspeicher wurde bis Juni 2001 faktisch nur zur Erhöhung der Versorgungssicherheit genutzt. Der Betreiber zog in der sensiblen Inbetriebnahmephase des Krankenhauses einen kurzzeitigen KKM-Betrieb vor. In Abbildung 5 ist ein für den Sommer 2001 typischer Tag mit Klimakältebedarf dargestellt.

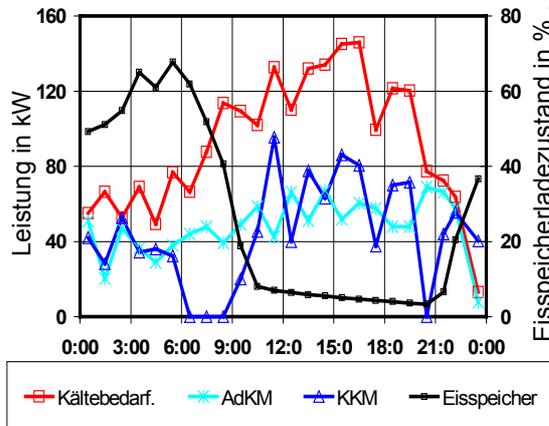


Abbildung 5 Tagesgang Kälte 16.08.2001

Entgegen den Planungsgrundlagen (nachts 0 kW) ist in der Nacht ein Klimakältebedarf von im Mittel 40 kW zu verzeichnen. Eine kontinuierliche Eisspeicherladung ist deshalb nicht möglich. Der KKM-Betrieb kann nur in den Morgenstunden völlig vermieden werden. Abhilfe ist erst bei niedrigeren Gaspreisen und damit bei einem Volllastbetrieb der Brennstoffzelle und damit genügendem thermischen Antrieb für die AdKM auch in der Nacht sowie bei Anhe-

bung des Vorlauf-Sollniveaus von 6 auf 8°C zu erwarten.

Trotz der ganzjährig relativ hohen Umgebungstemperaturen von etwa 30 bis 35 °C durch die Innenaufstellung liegt die Verlustleistung des Eisspeichers nur im Bereich von 290 bis 350 W.

Trotz der für den Adsorber nicht optimalen Betriebsbedingungen können sich die in Abbildung 6 dargestellten Tagesmittelwerte sehen lassen. Inkl. aller An- und Abfahrvorgänge konnte im Tagesmittel ein C.O.P.-Wert von 0,45 erreicht werden. Nur bei extremer Teillast und Heiztemperaturen um die 60 °C, wie Mitte bis Ende September, ist mit Werten unter 0,2 zu rechnen.

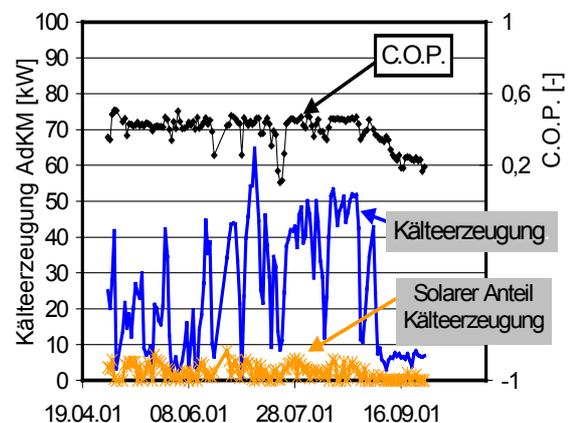


Abbildung 6 Kälteerzeugung AdKM (Tagesmittel)

### 3 Solaranlage

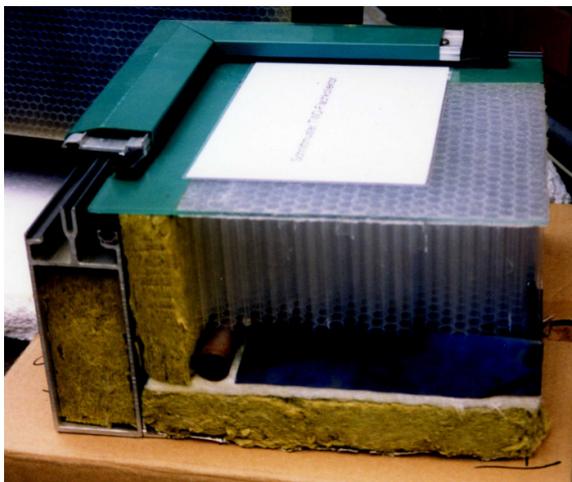
Die auf dem Flachdach der Energiezentrale installierte Solaranlage besteht aus 58 TWD-Flachkollektoren (115 m<sup>2</sup>) und 30 Photovoltaik-Modulen (13 m<sup>2</sup>).

Die Solarwärme wird vorrangig zur Stützung der sorptiven Kälteerzeugung benötigt. Zum Antrieb des thermischen Verdichters der Adsorptions-Kältemaschine (AdKM) sind im Nennlastpunkt 175 kW auf einem Temperaturniveau von 80 °C erforderlich.

110 kW können von der Brennstoffzelle kontinuierlich zur Verfügung gestellt werden. Bei Auslegungsbedingungen muss die Solaranlage den Differenzbetrag erzeugen. Um das geforderte Temperaturniveau be-

reits bei geringer Solarstrahlung zu erreichen, sind Hochleistungskollektoren erforderlich. Es wurden die vom SSL Maschinenbau Eibau völlig neu entwickelten-Flachkollektoren gewählt, die sich durch eine Abdeckung aus einer neuartigen transparenten Wärmedämmung (TWD) auszeichnen (siehe Abbildung 7). Die TWD-Kollektor-Anlage besitzt folgende Kennwerte:

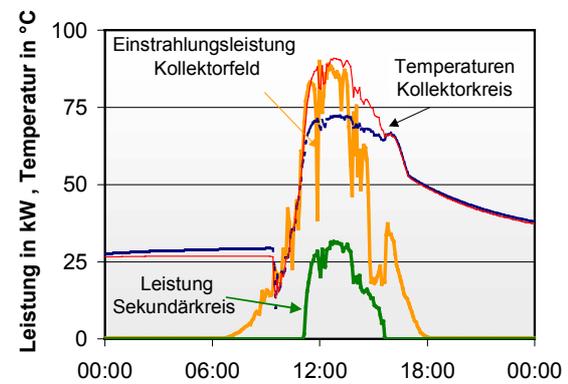
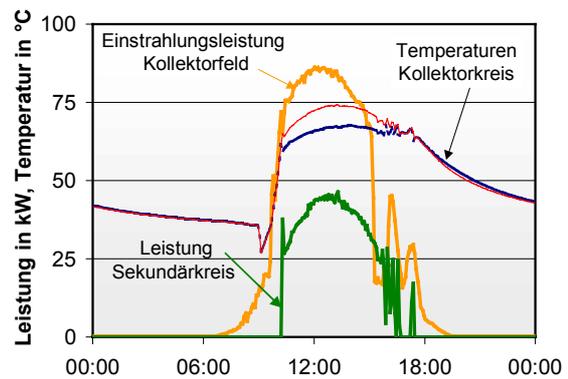
$$\begin{aligned} \eta_0 &= 0,753 \\ k_1 &= 2,633 \text{ (W/m}^2\text{K)} \\ k_2 &= 0 \text{ (W/m}^2\text{K)} \end{aligned}$$



**Abbildung 7** Schnittmodell TWD FK AL 2 80 (SSL Maschinenbau GmbH Eibau)

Für den Einsatz bei einem hohen Nutztemperaturniveau ist der niedrige  $k_1$ -Wert von entscheidender Bedeutung. Die dementsprechend flach ausgebildete Kollektorkennlinie ermöglicht gute solare Erträge beim benötigten Temperaturniveau von 60 bis 80 °C. Der Quotient aus mittlerer Temperaturdifferenz und Feldstrahlung in Kollektorebene  $(T_m - T_{amb})/E_g$  wird nie unter 0,04 (K\*m<sup>2</sup>)/W sinken. Der maximale Kollektoreffizienzgrad beträgt mithin 64 %. Unter Berücksichtigung der Primär- und Sekundärkreisverluste ist bezogen auf den Sekundärkreisenergieertrag mit Systemwirkungsgraden von höchstens 55 bis 60 % zu rechnen. Beispielhaft sind in Abbildung 8 zwei typische Lastgänge für einen klaren, warmen Spätsommertag (12.09.2000,  $t_{amb,mittel} = 17,5$  °C) und einen klaren, kalten Wintertag (06.03.2001,  $t_{amb,mittel} = -0,5$  °C) dargestellt. Am den Spätsommertag werden bis

zu 53 % und am Wintertag bis zu 32 % Systemwirkungsgrad erreicht.



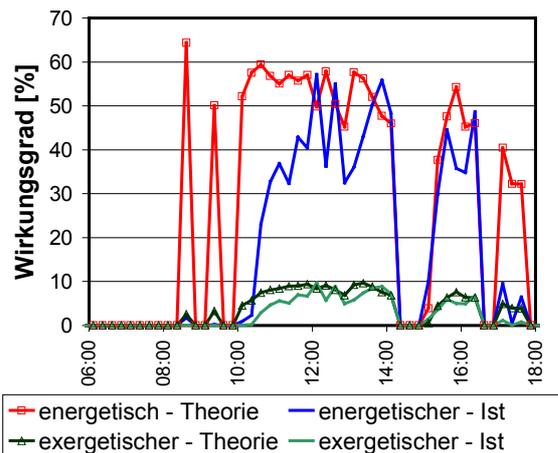
**Abbildung 8** Solaranlage KH Kamenz (oben 12. Sept. 2000, unten 06. März 2001)

Interessant und relativ einfach ausführbar ist der Vergleich theoretischer und praktischer Wirkungsgrade (energetisch  $\eta_{en}$ ;

$$\text{exergetisch } \eta_{ex} = \eta_{en} \cdot \frac{T_m - T_u}{T_m}$$

- Theorie-Werte unter Ansatz der tatsächlichen Feldstrahlung und der Temperaturmesswerte berechnet und
- Ist-Werte unter Ansatz von Tatsächlicher Feldstrahlung und Solarertrag.

Abbildung 9 gibt eine solche Auswertung beispielhaft für den 5. August 2001 wieder. Selbst bei der verwendeten 15-Minuten-Mittelwertbildung wird noch der relative Nachlauf des Ist-Solarertrags im Vergleich zu den Theoriewerten deutlich.



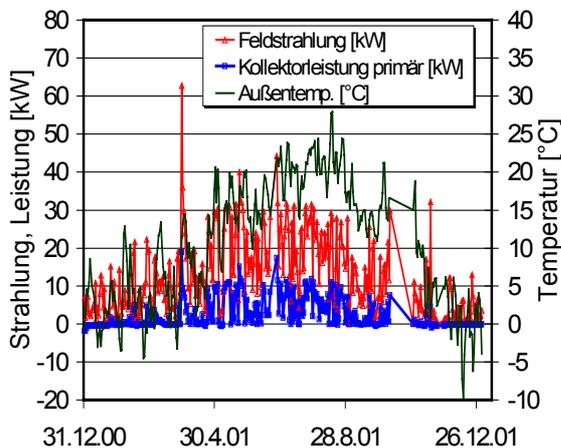
**Abbildung 9** Wirkungsgrade 05.08.2001

Eine Auswertung der ersten Augustdekade 2001 nach dieser Methode zeigt folgende Ergebnisse:

- $\eta_{en, \text{mittel}}$  Ist = 30,1 %  
Theorie = 40,8 %
- $\eta_{ex, \text{mittel}}$  Ist = 4,4 %  
Theorie = 6,1 %

Damit werden mit der praktischen Gesamtanlage bei energetischer Betrachtung 67 % der theoretischen Maximalwerte und bei exergetischer 73 % erreicht.

Die monatlichen Erträge der Solaranlage sind unter <http://www.malteser-krankenhaus-kamenz.de> online abrufbar.



**Abbildung 10** Tagesmittelwerte 2001

Die Tagesmittelwerte von Feldstrahlung, Außentemperatur und Kollektorleistung gibt Abbildung 10 wieder. Die von der konventionellen Anlage gelieferten, viel zu hohen Rücklauftemperaturen (Plan <math>50\text{ }^\circ\text{C}</math>; Ist 60 ... 70  $^\circ\text{C}</math>) haben natürlich auch den Solaretrag erheblich beschnitten.$

## 5 Messwerterfassung und Datenauswertung

Die laufende Optimierung sowie der Nachweis der energetischen Effizienz einer derart komplexen Anlage erfordert die Erfassung und Verarbeitung großer Datenmengen.

Der innovative Anlagenteil wird umfassend vermessen. Jeder Kreis, von denen es fast 20 gibt, ist mit folgenden Messtellen ausgestattet:

- Volumenstrom
- Druckdifferenz über der Pumpe
- Stromverbrauch der Pumpe
- Temperaturen (zwei bis drei je Kreis)
- Solarstrahlung (Global- und Feld)
- Außentemperatur, Außenluftfeuchte
- Spannung und Strom der PV-Anlage

In Kamenz werden die Minuten-Momentanwerte von etwa 150 Messstellen archiviert. Die Erfahrung aus anderen, durchaus kleineren Projekten zeigte, dass eine manuelle Verarbeitung derartiger Datenmengen – immerhin 220.000 Datenpunkte pro Tag – nicht mehr rationell möglich ist. Bislang sind 100 Mio. Messpunkte archiviert.

Deshalb wurde im Rahmen der Projektbearbeitung das Programm IMSA – Internetbasierte MessdatenSichtung und -Auswertung [4] erstellt.

## 6 Gegenwart und Zukunft

Am 1. August 2000 nahm das neu errichtete Malteser-Krankenhaus St. Johannes in Kamenz den Betrieb auf. Neben der hochmodernen Technik zur Versorgung der Patienten hat in der Öffentlichkeit die komplexe Kraft-Wärme-Kälte-Kopplungsanlage mit Brennstoffzelle und solarer Stützung Interesse hervorgerufen.

Dank der Förderung

- der Europäische Union
- des Freistaates Sachsen
- der Verbundnetz Gas AG
- der Thyssengas GmbH
- der Gasversorgung Sachsen Ost

und natürlich der Malteser Betriebsträgergesellschaft Sachsen selbst, kann eine erste positive Bilanz gezogen werden.

Nach Problemen in der Inbetriebnahme-phase, die dank der langen Vorlaufzeit vor

Aufnahme des aktiven Krankenhausbetriebes lagen, arbeitet die Brennstoffzelle seit dem 30. Mai 2000 zufriedenstellend.

Die Stromerzeugung ist exzellent ( $\eta_{el,mittel} = 38,4 \%$ ), die Brennstoffzelle arbeitet sowohl im Nenn- als auch im Teillastbetrieb und produziert den überwiegenden Teil des Krankenhausstrombedarfes. Der Hochtemperaturkreislauf ist seit dem 13. Juli 2000 optimiert, die Wärmeauskopplung ist zeitweise besser als erwartet.

**Trotz der bereits guten Betriebserfahrungen gibt es noch beträchtliches Einsparpotential. Das betrifft im Wesentlichen das Zusammenwirken mit der konventionellen Technik. Lange behinderten Rücklauftemperaturen von weit über 60 °C aus dem Heiznetz die Niedertemperatur-Wärmeauskopplung der Brennstoffzelle, so dass nur Brennstoffnutzungsgrade von 55 bis knapp 60 % erreicht wurden. Seit Anfang Dezember liegen nach ersten Umbaumaßnahmen die Rücklauftemperaturen im Bereich von 55 bis 60 °C. Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** recht deutlich wiedergibt, können damit bereits Nutzungsgrade nahe 65 % erreicht werden. Nach Abschluss der Umbaumaßnahmen im Januar/Februar 2002 werden über 70 % erwartet.

Das „Konsortium Innovative Technik“, bestehend aus der DBI Gas- und Umwelttechnik GmbH Leipzig/Freiberg, der TU Dresden und der GASTEC N.V. (Apeldoorn/NL) stellt sich diesem Problem. Eine interaktive Kontrolle unter Nutzung der IMSA-Oberfläche sowie der direkte Kontakt mit dem Betreiberpersonal der Anlage sind dafür Grundlage.

Das Projekt startete mit einer wissenschaftlichen Idee und einem bauseitig genehmigten Architektenentwurf. Wie die ersten Bilanzen zeigen, hat die installierte Technik bewiesen, dass die Energieversorgung eines Krankenhauses im Grundlastbereich auf Brennstoffzellenbasis und mit solargestützter Kälteerzeugung möglich und energetisch sinnvoll ist. Die Anlage stellt sich heute als in den Architektenentwurf integrierte und baulich angepasste Lösung dar (Abbildung 11).



**Abbildung 11** Luftbild Malteser-Krankenhaus St. Johannes Kamenz

Im ersten Betriebsjahr mit echtem Versorgungsbetrieb konnte die Anlage unter Einsatz von 3759 MWh Erdgas

- 1435 MWh Strom
- 693 MWh Wärme und
- 112 MWh Kälte

erzeugen. Aktuelle Informationen über das Gesamtprojekt können jederzeit unter [www.malteser-krankenhaus-kamenz.de](http://www.malteser-krankenhaus-kamenz.de) abgerufen werden.

## 7 Literatur

- [1] Rational supply of power, heat and cooling in buildings demonstrated by a hospital. DBI GUT Freiberg, TU Dresden, GASTEC N.V., Final Technical Report, EU-Thermie BU/0065/97, oktober 2000
- [2] Gassel, A.: Der Einsatz von Adsorptionskältemaschinen (SiO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O) in Anlagen der solaren Klimatisierung. Kurzvortrag 11. Internat. Sonnenforum, Köln 1998
- [3] Rühling, K.; Gassel, A.: „Strom, Wärme- und Kälteversorgung – Brennstoffzelle und Adsorber als Grundlastanlage. Pilotprojekt Krankenhaus Kamenz.“; Vortrag, 8. WAW Fachtagung Wärme aus Kälte, 27.07.2000, Mannheim
- [4] Gassel, A.: IMSA – Internetbasierte Messdatensichtung- und auswertung. TU Dresden, Institut für Thermodynamik und TGA, Januar 2001 (<http://141.30.103.179/imsa>)