

KOMPETENZZENTRUM  
**SOLARTECHNIK**  
an der Fachhochschule Ingolstadt

---

## Demonstrationsvorhaben

# „Nutzung thermischer Solarenergie zur sorptionsgestützten Klimatisierung“

Planung, Errichtung und Überwachung einer solargestützten Gebäudeklimatisierung in einer gewerblich genutzten Halle“

### - Abschlussbericht -

Verfasser: Dipl.-Wirtschaftsing. (FH) Achim Haller, MPhil  
Dr. Christoph Trinkl  
Dipl.-Ing. (FH) Roland Wittmann  
Prof. Dr.-Ing. Wilfried Zörner

Ausführende Stelle: Kompetenzzentrum Solartechnik  
an der Fachhochschule Ingolstadt

Aktenzeichen: 77a-3320.1-2003/12

Datum: 19. Juni 2008

## Abstract

The *CENTRE OF EXCELLENCE FOR SOLAR ENGINEERING* of *Ingolstadt University of Applied Sciences* investigates the renewable-only based HVAC system of a multipurpose building. The 10.000 m<sup>2</sup> gross floor area building is part of the biggest logistic-centre in the region serving the *AUDI* automobile production facilities. On the one hand, the investigation is supposed to demonstrate the potential of solar-assisted cooling, on the other hand, the monitoring focuses on the total energy balance of the building and the various innovative building technologies. Next to a ground source heat pump plant for base-load heating and cooling, the building is equipped with two arrays of solar-thermal flat-plate collectors (108 m<sup>2</sup> + 178 m<sup>2</sup>) and a desiccant air-conditioning system (DEC). This consists of two plants with a nominal air flow of 8.000 m<sup>3</sup>/h each. One of the two plants is monitored, where the plant itself is considered a black box in a first approach, i.e. all incoming and outgoing energy flows and the air condition are measured. Apart from the investigation of the performance of the solar-assisted air-conditioning system, the feasibility of DEC-operation using flat-plate collectors available on the market is investigated.

During the first year of operation (2006) massive problems occurred in the operation of the DEC-plant. While the degree of comfort in the building was found to be satisfying during the cooling period, the solar-driven DEC-plant showed major deficiencies in cooling performance, hydraulics and control. Especially, a too high rotational speed of the desiccant wheel and an inadequate adjustment of solar collector arrays, DEC-plants and building structure were identified. Therefore, in an overhaul of the system several problems in the hardware were found and corrected such as blocked nozzles due to calcinations, leakages in the sealing of the desiccant wheel and an incorrect installation of a non-return valve in the hydraulic system of the regeneration air heater. Moreover, the control strategy regarding the cooling power of the plant and the speed of the desiccant wheel was checked.

In the second year of operation (2007), some deficiencies of the first year were found to be removed, but the plant still did not work according to its capacity. Insufficient dehumidification by the desiccant wheel was identified as a major problem. Based on a detailed analysis of the desiccant wheel, one-sided displacement of the sorbent was supposed to be the reason for insufficient cooling capacity. Obviously, control or mechanical malfunctions during operation have lead to a one-sided oversaturation and thus to a one-sided damage of the desiccant wheel. Consequently, the damaged wheel is to be removed prior to the 2008 cooling period.

In order to tap the full potential of both the solar DEC-plant and the building's innovative concept, a number of further measures, especially concerning the matching of the DEC-plant and the solar system with the building management, need to be taken in future.

## Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis .....	3
Abbildungsverzeichnis .....	4
Tabellenverzeichnis .....	5
1 Aufgabenstellung .....	6
2 Dokumentation und Auswertung der verwendeten Literatur .....	6
3 Voraussetzungen unter denen die Arbeiten durchgeführt wurden.....	7
3.1 Bürogebäude früher und heute .....	8
3.2 Klimatisierung und Solare Klimatisierung .....	9
3.3 Projektumfeld.....	11
4 Planung und Ablauf der Arbeiten.....	12
4.1 Beschreibung des Demonstrationsobjekts.....	12
4.1.1 Wärmepumpenanlage.....	14
4.1.2 Wärmespeicher .....	16
4.1.3 Betonkernaktivierung .....	16
4.1.4 Solarkollektorfeld .....	17
4.1.5 Fernwärmeanschluss und sonstige Systeme.....	18
4.1.6 Hydraulisches System.....	18
4.1.7 DEC-Lüftungsanlagen.....	19
4.2 Ablauf der Arbeiten .....	24
5 Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden .....	25
6 Bisher bekanntgewordene Ergebnisse und Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen .....	27
7 Bewertung und Darstellung der erzielten Ergebnisse und ihrer praktischen Anwendbarkeit .....	30
7.2 Wartung der DEC-Anlagen und Verhalten im Betriebsjahr 2007 .....	34
7.2.1 Verhalten der DEC-Anlage am 17.07.2007.....	36
7.2.2 Verhalten der DEC-Anlage am 14.08.2007 .....	37
7.3 Entfeuchtungsleistung des Sorptionsrotors .....	41
8 Fazit und Empfehlungen.....	46
Quellenangaben .....	47

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Primärenergieverbrauch weltweit [WBU07] .....	7
Abbildung 2: Lastspitzen im Stromversorgungsnetz [EVE07] .....	8
Abbildung 3: Eingangsbereich von Gebäude J des Güterverkehrszentrums mit 18 kW <sub>p</sub> -PV-Anlage .....	12
Abbildung 4: Luftbildaufnahme <i>GVZ Ingolstadt</i> .....	13
Abbildung 5: Schnitt durch Gebäude J mit technischer Gebäudeausrüstung .....	14
Abbildung 6: Schema der Einbindung von Wärmeerzeugung und - verteilung in Gebäude J.....	14
Abbildung 7: Wärmepumpeneinheit.....	15
Abbildung 8: Baukörperaktivierung .....	16
Abbildung 9: Kollektorfeld <i>Conergy</i> .....	17
Abbildung 10: Kollektorfeld <i>Solahart</i> .....	18
Abbildung 11: Mögliche Energieflüsse im Gebäude J.....	19
Abbildung 12: DEC Anlage Typ <i>DEC101</i> .....	20
Abbildung 13: Schematischer Aufbau der solarbetriebenen DEC-Anlage des Gebäudes J.....	20
Abbildung 14: Sorptionsrotor .....	21
Abbildung 15: Struktur des SPR [KLI07a].....	22
Abbildung 16: Rotationswärmetauscher .....	22
Abbildung 17: Befeuchterkammer [KLI07c].....	23
Abbildung 18: Hochdruckpumpeneinheit .....	23
Abbildung 19: Messstellen an der DEC-Anlage [Sun05].....	25
Abbildung 20: Behaglichkeitsfeld für die Monate Juni / Juli (die verschiedenen Farben der Messpunkte beziehen sich auf die 6 betrachteten Räume) .....	30
Abbildung 21: Wärmeströme der vermessenen DEC-Anlage im Zuluftkanal, am Regenerationslufferhitzer und am Oberflächenkühler im Zeitraum Mitte Juni bis Mitte September 2006 .....	31
Abbildung 22: Verhalten der DEC-Anlage am 14.06.2006.....	32
Abbildung 23: Verkalkte Befeuchterdüsen (links) und Tropfenabscheider (rechts) .....	35
Abbildung 24: Klimabedingungen von Juni bis August 2007 in zwei beispielhaften Räumen des Gebäudes.....	35

---

Abbildung 25: Kälteleistung vom 17.07. bis 20.07.2007 (Stundenmittelwerte).....	36
Abbildung 26: Verhalten der DEC-Anlage am 17.07.2007.....	37
Abbildung 27: Verhalten der DEC-Anlage am 14.08.2007.....	38
Abbildung 28: Verhalten der DEC-Anlage am 14.08.2007 (14:00Uhr) im h- x-Diagramm .....	40
Abbildung 29: Desorption im Detail am 14.08.2007 (RGLH: Regenerationsluftherhitzer) .....	42
Abbildung 30: Monatlich kumulierte Erträge – bezogen auf die Bruttofläche – der Conergy- (grüne Balken) und Solahart-Kollektoren (rote Balken) sowie Monatsdurchschnittstemperatur und kumulierte Solarstrahlung .....	44
Abbildung 31: Klimatische Bedingungen sowie Verhalten der beiden Kollektorfelder am 11.06.2006 ( <i>Conergy</i> : grüne Kurven, <i>Solahart</i> : rote Kurven).....	45

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Technische Daten der Lüftungsanlage <i>DEC101</i> [WOL07a].....	19
Tabelle 2: Sensorik an Lüftungs- und Solaranlage .....	26
Tabelle 3: Überblick über realisierte Anlagen mit solarbetriebener DEC- Technologie [1] – [23] .....	28

## 1 Aufgabenstellung

Ziel des vorliegenden Projekts ist es, die Leistungsfähigkeit von solargestützten Klimatisierungsanlagen potentiellen Interessenten zu demonstrieren sowie Informationen über deren Betrieb zu liefern. Außerdem sollen praktische Erfahrungen im Umgang mit der neuen Technologie gesammelt werden. Da in Bayern bis zum Abschluss des Vorhabens keine vergleichbare Anlage in Betrieb ist, sollen ebenfalls Daten zur Leistung und Wirtschaftlichkeit im praktischen Einsatz gewonnen werden. Mit den gewonnenen Referenzwerten soll die Akzeptanz und Verbreitung solcher Anlagen gesteigert werden.

## 2 Dokumentation und Auswertung der verwendeten Literatur

Im Rahmen verschiedener bisher durchgeführter Forschungsprojekte wurden bereits die einzelnen Komponenten von DEC-Anlagen eingehend untersucht. Ferner wurden auf einzelnen Testeinrichtungen Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit kompletter Klimatisierungsanlagen durchgeführt. Die Mehrzahl der Vorhaben konzentrierte sich dabei auf Komponentenuntersuchungen (Sorptionsrad, Befeuchtereinrichtungen, ...) oder Untersuchungen von DEC-Anlagen ohne solare Einbindung. Im Umfeld der solarbetriebenen DEC-Technik existieren einige wenige Demonstrations- und Pilotanlagen, die wissenschaftlich von verschiedenen Instituten begleitet wurden [Spa07].

Auf dem Prüfstand für DEC-Anlagen des *ILK*, Dresden, wurden u. a. von U. Franzke verschiedene Tests an einzelnen Komponenten von DEC-Anlagen, wie Befeuchtereinrichtungen oder Sorptionsrotoren, durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sind in den Abschlussberichten [Fra00] und [Fra05] zusammengefasst und führten u. a. zur Erstellung von Simulationsmodellen der betrachteten Komponenten. Ähnliche Arbeiten wurden in Versuchen an einem Teststand der *Technischen Universität Hamburg-Harburg* an einem Klimatisierungsgerät mit Sorptionsentfeuchtung ermittelt [Mök02]. An der *Hochschule für Technik* in Stuttgart wurden durch U. Eicker und U. Schürger an einem Teststand Untersuchungen an verschiedenen Sorptionsmaterialien / -rotoren durchgeführt [Eik02a, Sch03]. Optimierte Regelstrategien für DEC-Anlagen (ohne solare Unterstützung) mit Hilfe des Simulationswerkzeuges *TRNSYS* wurden an der *Technischen Universität Dresden* von A. Rathey untersucht [Rat00]. Weitere, neuere Untersuchungen beschäftigen sich ebenfalls hauptsächlich mit der Regelung des DEC-Prozesses an sich [Vit07] oder der Modellierung von Komponenten der DEC-Anlage, wie beispielsweise dem Sorptionsrotor [Rui07]. Bezüglich solarer DEC-Klimatisierung gibt [Hen04] einen Überblick über sämtliche solare Klimatisierungsmöglichkeiten (inklusive der geschlossenen Ab- und Adsorptionsprozesse), Erläuterungen zu den einzelnen Komponenten und grundlegende Angaben zur (Grob-) Dimensionierung sowie dem Betrieb der jeweiligen Anlagen. Des Weiteren werden realisierte Anlagenbeispiele im Detail erläutert.

### 3 Voraussetzungen unter denen die Arbeiten durchgeführt wurden

Der Lebensstandard in der Bundesrepublik Deutschland und in allen Industrienationen weltweit steigt. Besonders rasant ist diese Entwicklung in den Ländern, die einen schnellen konjunkturellen Aufschwung verspüren wie beispielsweise China. Die Erhaltung dieses Lebensstandards ist meist nur mit erhöhtem Energieeinsatz möglich. So sind z.B. Reisen in andere Kontinente, ein eigenes Auto, sowie die tägliche Dusche längst zur Selbstverständlichkeit geworden und keine Seltenheit mehr, wie es noch vor 40 Jahren der Fall war. Der in Abbildung 1 dargestellte Primärenergieverbrauch verdeutlicht diese Tendenz.

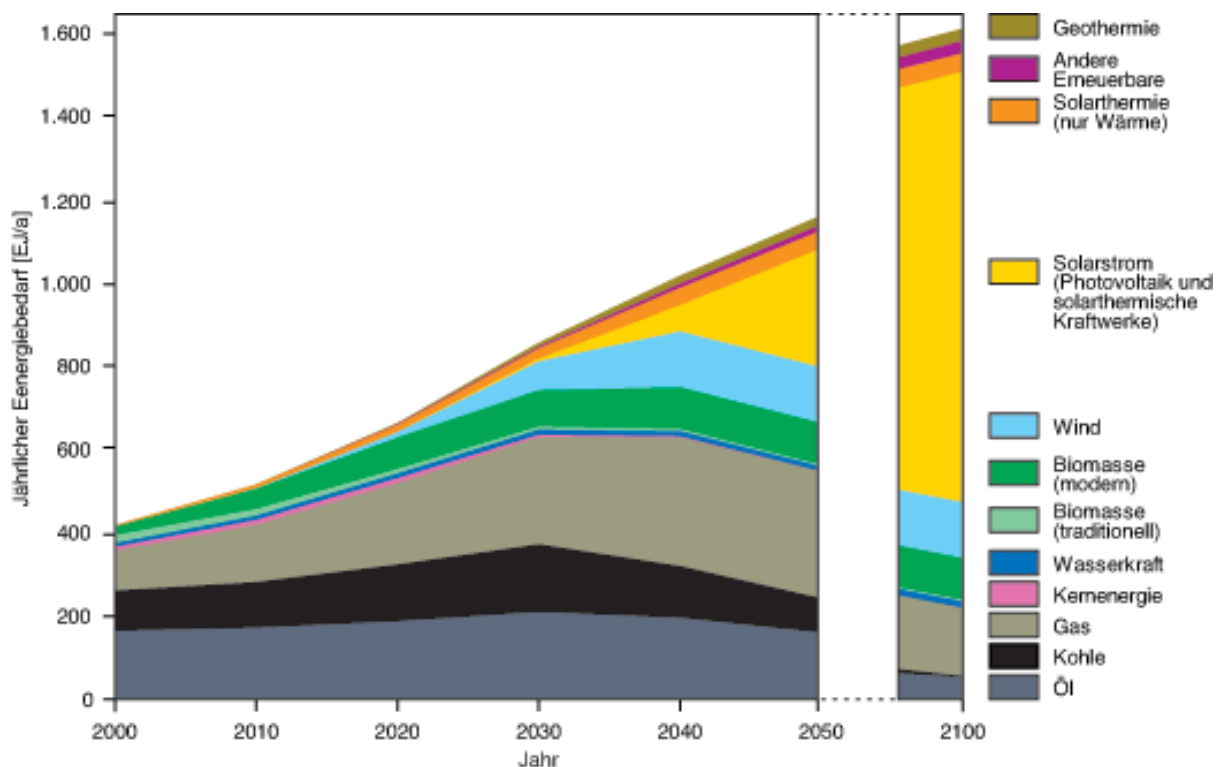


Abbildung 1: Primärenergieverbrauch weltweit [WBU07]

Diese Entwicklung ist unter Betrachtung des Gesichtspunktes, dass ein Großteil dieses Energieverbrauchs mit fossilen, also nicht erneuerbaren Quellen gedeckt wird, problematisch, zudem auch noch hochwertige Rohstoffe wie Erdöl in diesem Zuge unwiderruflich vernichtet werden. Als ebenso bedenklich ist auch die Tatsache einzustufen, dass diese Energieerzeugung mit einem enormen Ausstoß von CO<sub>2</sub> einhergeht. Ein Zusammenhang zwischen der Zunahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre und der Erwärmung des Klimas der Erde wird angenommen, sodass Technologien, die einen hohen Lebensstandard mit dem geringen Einsatz von Primärenergie gewährleisten können, als äußerst zukunftsträchtig erscheinen.

Eine dieser Technologien stellt die Klimatisierung mit solarer, also völlig regenerativ erzeugter Energie als Antrieb dar. Bei der Suche, für welchen Zweck die erzeugte Primärenergie eigentlich verwendet wird, wird schnell klar, dass ein nicht unbeträchtlicher Teil in die Bereitstellung von Kälte fließt. Abbildung 2 verdeutlicht darüber hinaus ein zweites Problem, welches mit solarer Klimatisierung zumindest entschärft werden könnte. Die thermisch angetriebenen Kältemaschinen könnten bei weit reichender Verbreitung die Lastspitzen abmildern, die aufgrund der meist elektrisch betriebenen Kompressionskältemaschinen im Stromversorgungsnetz auftreten.

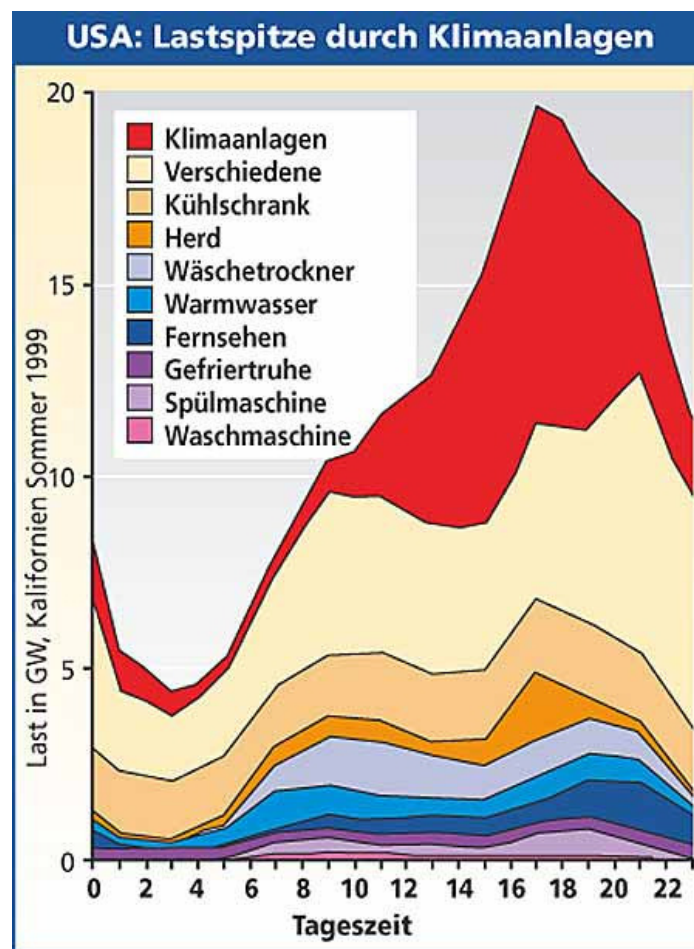


Abbildung 2: Lastspitzen im Stromversorgungsnetz [EVE07]

Des Weiteren weist die Verwendung von solarthermisch erzeugter Wärme zu Kühlzwecken den großen Vorteil auf, dass das Angebot von solarer Leistung zeitlich nahe dem Bedarf an Wärme liegt. Aufwändige Speichertechniken entfallen somit.

### 3.1 Bürogebäude früher und heute

Frühere Bürogebäude zeichneten sich meist durch einfache, zweck-orientierte Bauweise aus. Die Regelung des Raumklimas erfolgte im Allgemeinen nur durch Fensterlüftung.



Weitergehende Anforderungen an die Klimatisierung waren nicht vorhanden. Energieverbrauch beziehungsweise Energiekosten spielten früher eine eher unterordnete Rolle. Die Situation heutiger, moderner Bürogebäude stellt sich dagegen grundlegend anders dar:

- deutlich höhere Ansprüche an Gestaltung bzw. Architektur (repräsentative Zwecke),
- hoch-flexible Nutzungsmöglichkeit und höchste Flächeneffizienz der Räumlichkeiten,
- steigende äußere Lasten durch architektur-orientierte Gebäudehüllen (hohe Verglasungsanteile),
- steigende innere Lasten durch die ständige Zunahme von Bürotechnik,
- steigende Komfortansprüche (Behaglichkeit am Arbeitsplatz), auch durch den Gesetzgeber bedingt.

Um diesen Bedingungen beziehungsweise Ansprüchen gerecht werden zu können, ist eine immer umfangreichere technische Gebäudeausrüstung für Heizung, Lüftung, Klimatisierung und Beleuchtung erforderlich, die sich auch in immer größeren Energieverbrauchskennwerten widerspiegelt. So sind Primärenergiekennwerte von über 500 kWh/m<sup>2</sup>a nicht selten anzutreffen [VOS05]. Die Zielwerte moderner, energieeffizienter Bürogebäude liegen hingegen in einer Größenordnung von 100 kWh/m<sup>2</sup>a [WAG05]. Derartige Werte sind nur durch eine entsprechende Architektur und baukonstruktive Ausführung in Kombination mit einer Gebäudetechnik auf der Basis Erneuerbarer Energien zu erreichen.

### **3.2 Klimatisierung und Solare Klimatisierung**

Standardkühlsysteme, die auf einem geschlossen, elektrisch betriebenen Prozess beruhen, werden wegen ihrer niedrigen Investitionskosten häufig zur Kühlung eingesetzt. Diese benötigen aber neben einem meist umweltschädlichen Kältemittel eine große Menge an hochwertiger und teurer elektrischer Energie zum Antrieb. Diese Eigenschaft führt neben einer starken Belastung der Stromnetze zu hohen Betriebskosten und hohem CO<sub>2</sub>-Ausstoß.

Neue Ansätze auf dem Gebiet der Solartechnik sollen für die oben genannten Probleme Lösungen bieten. Diese Ansätze beruhen allesamt auf Basis der Kälteerzeugung mittels von der Sonne gewonnener Wärme. Dabei sind momentan die Ab- und Adsorptionstechnik mit geschlossenem Kreislauf sowie die Adsorptionstechnik mit offenem Kreislauf am weitesten entwickelt und verbreitet. Die geschlossenen Ab-/Adsorptionstechniken bieten dabei den Vorteil, dass sie direkt in einen vorhanden Kühl- bzw. Heizkreislauf eingebunden werden können, also keine aktive Frischluftversorgung der zu kühlenden Räume notwendig ist. Allerdings handelt es sich bei den Kältemaschinen typischerweise um große

und schwere Anlagen, die oftmals problematisch zu installieren sind. Außerdem benötigen diese für einen effizienten Betrieb verhältnismäßig hohe Antriebstemperaturen, die durch Standard-Solarkollektoren nur schwierig zu erzeugen sind. Aus diesem Grund werden die meisten dieser Anlagen immer noch mittels Abwärme von Blockheizkraftwerken oder direkt gasbefeuert betrieben.

Einstufige Absorptionskältemaschinen mit den Stoffpaaren Wasser/Lithiumbromid beziehungsweise Ammoniak/Wasser erzeugen über einen geschlossenen, kontinuierlichen Kreisprozess Kälte. Die Verdampfer Temperatur kann bei Ammoniak-Absorptionskältemaschinen bis auf  $-60^{\circ}\text{C}$  gesenkt werden, sodass industrielle Kälteprozesse möglich sind. Bei der Verwendung von Wasser als Kältemittel ist die Verdampfer Temperatur auf Temperaturen oberhalb des Gefrierpunktes von minimal  $5$  bis  $6^{\circ}\text{C}$  beschränkt. Bei der Absorptionskältetechnik wird das Kältemittel (Wasser oder Ammoniak) in einem flüssigen Lösungsmittel (Lithiumbromid oder Wasser) absorbiert und durch direkte oder indirekte Beheizung in einem Austreiber bei hohen Temperaturen desorbiert und auf den erforderlichen Kondensatordruck gebracht. Bei der Kondensation beziehungsweise Absorption wird Kondensations- beziehungsweise Lösungswärme frei, die über einen gemeinsamen Kühlkreis abgeführt werden müssen. Die Antriebstemperaturen für die Austreibung liegen je nach Technologie zwischen  $70$  und  $120^{\circ}\text{C}$ . Grundsätzlich finden Absorptionskältemaschinen Verwendung als zentrale Klimatisierungssysteme mit dezentralen Umluftgeräten (Fan Coils) oder Kühldecken für die Klimatisierung der zu kühlenden Räume. Bei geschlossener Adsorptionstechnik wird das Kältemittel Wasser an einem Festkörper wie Silikagel unter Freisetzung von Bindungswärme an der Oberfläche adsorbiert. Die Bindungswärme sinkt bei steigender Anlagerung von Wassermolekülen gegen Null, sodass nur noch Verdampfungswärme abgeführt werden muss. Die Desorption des angelagerten Wassers und die Druckerzeugung für die Kondensation erfolgt bereits bei niedrigeren Antriebstemperaturen von  $55$  bis  $70^{\circ}\text{C}$ , sodass sich diese Technologie für den Einsatz von Solarenergie anbietet. Von geschlossenen Adsorptionskältemaschinen wird durch den periodischen Kreisprozess Kaltwasser von minimal  $5$  bis  $6^{\circ}\text{C}$  erzeugt. Diese Kältemaschinen können ebenfalls als zentrale Klimatisierungssysteme mit Fan Coils oder Kühldecken eingesetzt werden [Jak08].

Ein weiterer Ansatz, aus Wärme Klimakälte zu erzeugen, ist die offen geführte Adsorptionstechnik. Diese beruht auf dem Prinzip der Verdunstungskühlung, und benötigt daher kein Kältemittel. An dessen Stelle rückt die dem Gebäude zugeführte Frischluft. Diese auch als DEC (Desiccant and Evaporative Cooling) bezeichnete Methode bietet neben dem Vorteil, dass nicht nur die Raumtemperatur sondern auch die Luftfeuchtigkeit im Raum aktiv gesteuert werden kann, vor allem den Vorteil, dass sie auch mit weitaus niedrigeren Antriebstemperaturen (bis max  $70^{\circ}\text{C}$ ) als eine Absorptionsmaschine effizient und kostengünstig betrieben werden kann.

Ein aktueller Überblick zum Stand der Umsetzung solarer Kühlung und Klimatisierung zeigt, dass in Europa mehr als 100 Anlagen der solaren Kühlung mit einer Kälteleistung

über 20 kW installiert sind. In rund 70% der Anlagen wird Absorptionskältetechnik verwendet, in rund 10% geschlossene Adsorptionstechnik und in etwa 20% offene Sorptionsverfahren [Hen08].

### 3.3 Projektumfeld

Am vorliegenden Projekt beteiligt sind die *IFG Ingolstadt GmbH*, eine Tochtergesellschaft der Stadt Ingolstadt, die für Wirtschaftsförderung, Existenzgründung, Tourismus und Beschäftigtenförderung verantwortlich und gleichzeitig Eigentümer und Betreiber des beschriebenen Gebäudes ist.

Des Weiteren sind das Planungsbüro *pbb Architekten und Ingenieure*, welches für die Architektur, die Projektsteuerung, die Planung der Gebäudetechnik sowie die Implementierung und Umsetzung verantwortlich ist, und das *Kompetenzzentrum Solartechnik* an der *Fachhochschule Ingolstadt* für die wissenschaftliche Begleitung an diesem Projekt beteiligt. Das *Bayerische Staatsministerium für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz*, unterstützt die wissenschaftliche Begleitung des Vorhabens. Die Zusammenarbeit der Partner erwies sich im Projektverlauf als produktiv und zufriedenstellend. Die Überwachung und Bewertung der Kühlperiode 2007 wurde ebenfalls mit Unterstützung der *IFG Ingolstadt GmbH* und der *pbb Planung + Projektsteuerung GmbH* realisiert.

## 4 Planung und Ablauf der Arbeiten

### 4.1 Beschreibung des Demonstrationsobjekts

Das in Abbildung 3 und Abbildung 4 dargestellte Gebäude J ist Teil des Ingolstädter Güterverkehrszentrums, einem Logistikzentrum in der Nachbarschaft des *AUDI*-Werks. Neben der Nutzung als Trainings-Center der *AUDI AG* (ca. 30 % der Flächen) wird das Gebäude im 1. OG für Büroräume und als Filmstudio sowie im 2. OG als Hotel genutzt. Das Gebäude ist in zwei Nutzungsstrukturen unterteilt: im Erdgeschoß die Service-, Dienstleistungs- und Werkstattflächen und in den zwei Obergeschossen die Schulungs-, Büro- und Hotelräume sowie das Filmstudio. Dabei weist das Gebäude eine Bruttogrundrissfläche von ca. 10.000 m<sup>2</sup> auf.

Das Gebäude wurde neben seiner eigentlichen Nutzung (im vollen kommerziellen Betrieb) konzipiert als Demonstrations- und Pilotobjekt für solare DEC-Klimatisierung aber auch für beispielhaften, vernetzten Einsatz regenerativer Energietechniken sowie nicht zuletzt für äußerst flexible Raumnutzung.



Abbildung 3: Eingangsbereich von Gebäude J des Güterverkehrszentrums mit 18 kW<sub>p</sub>-PV-Anlage



Abbildung 4: Luftbildaufnahme GVZ Ingolstadt

Einen Überblick über die technische Gebäudeausrüstung zeigt Abbildung 5; sie besteht aus folgenden Komponenten:

- ▶ Wärmepumpenanlage, aufgebaut aus 5 Wärmepumpen, mit einer Heizleistung von ca. 320 kW und einer Kühlleistung von ca. 240 kW insgesamt [Zör05],
- ▶ 2 Kollektorfelder à ca. 108 m<sup>2</sup> Bruttofläche (F6000 von *Conergy*) bzw. 178 m<sup>2</sup> (BT-Kollektor von *Solahart*) thermische Flachkollektoren für Heizung, Warmwasserbereitung, Kühlung und Regeneration der Erd-/Betonspeicher,
- ▶ Erdspeicher, aufgebaut aus 15.000 m Rohrleitung in der Bodenplatte des Gebäudes sowie 72 Tiefensonden à 40 m,
- ▶ 2 Pufferspeicher mit je 3.000 l,
- ▶ 2 solarbetriebene DEC-Anlagen mit je ca. 8.000 m<sup>3</sup>/h Luftdurchsatz,
- ▶ fassaden-integrierte 18 kWp-Photovoltaik-Anlage.

Die Wärmepumpenanlage versorgt das Gebäude mit der nötigen Energie zur Gebäudeheizung und Brauchwassererwärmung. Sie entzieht dabei die notwendige Energie aus einem Erdspeicher oder den Erdsonden. An Tagen hoher Sonneneinstrahlung und Außentemperaturen ist die Wärmepumpenanlage direkt in den Kältekreislauf eingebunden. Die im Kondensator entstehende Abwärme dient dann zur Warmwasserbereitung oder zur direkten Einspeisung in den Erdspeicher (vgl. Abbildung 6). Im Erdspeicher wird überschüssige Wärme von der Wärmepumpe oder aus den Kollektoren in den Sommermonaten eingelagert und in den Wintermonaten wieder der Wärmepumpenanlage zur Verfügung gestellt.

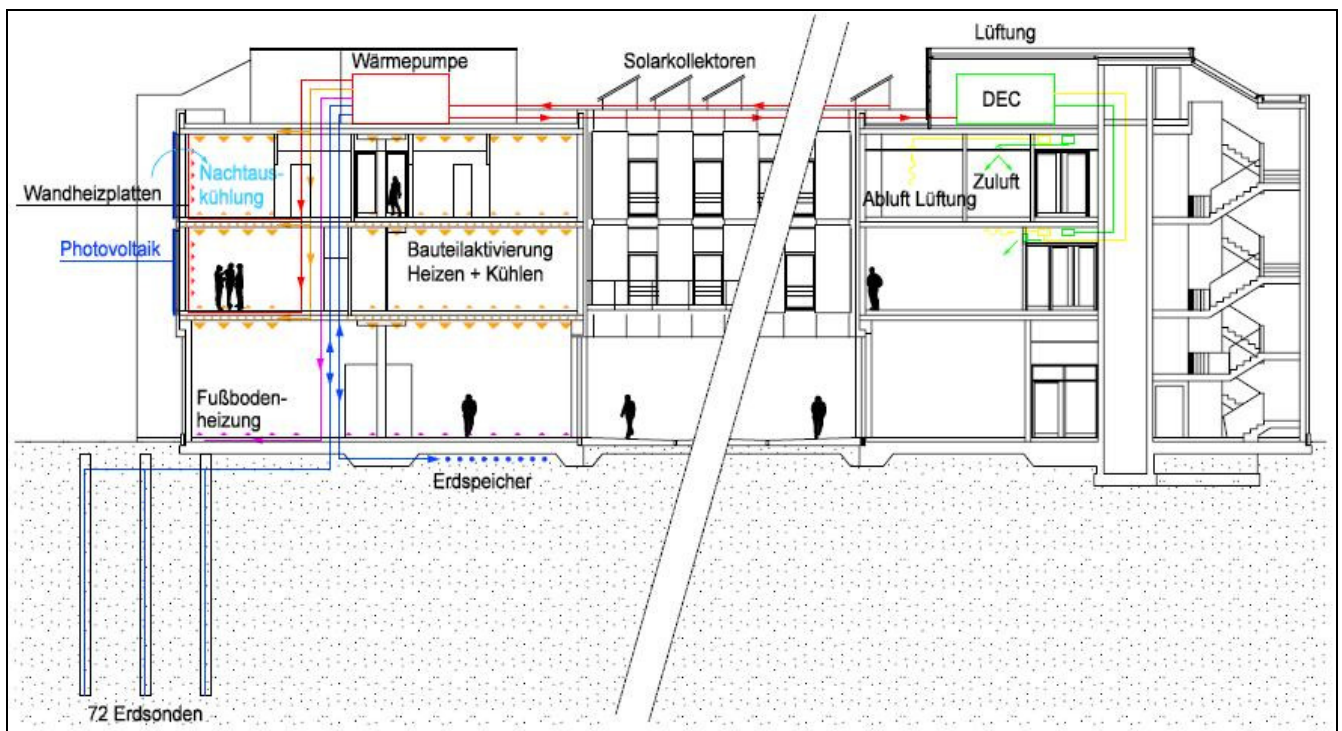


Abbildung 5: Schnitt durch Gebäude J mit technischer Gebäudeausrüstung

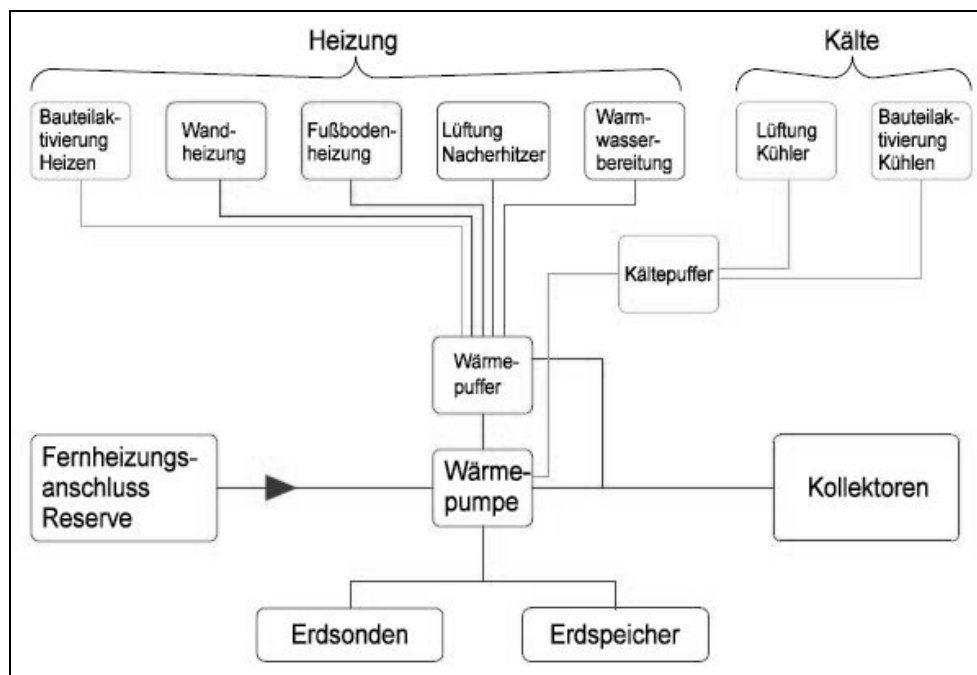


Abbildung 6: Schema der Einbindung von Wärmezeugung und -verteilung in Gebäude J

In den Decken des Gebäudes wurde ein Netzwerk aus ca. 45.000 m Kunststoffrohr verbaut. Mit Hilfe dieses Netzwerkes wird der Baukörper auf einer konstanten Kerntemperatur von etwa 20...24 °C gehalten, um so die Kühl- bzw. Heizlast zu verringern. Besteht in einem Teil des Gebäudes Heizbedarf und gleichzeitig in einem anderen Teil Kältebedarf, so

kann zum Heizen die Energie aus dem Kondensator und zum Kühlen die vom Verdampfer der Wärmepumpenanlage aufgenommene Energie eingesetzt werden. Der Ausgleich der thermischen Trägheit des Baukörpers erfolgt über eine Flächenheizung, die auch der Regelung der individuellen Raumtemperatur dient. Wegen der erwarteten hohen inneren und äußeren Kühllasten, ist die aktive Klimatisierung eines Teilbereichs des Gebäudes mittels zweier solar-betriebener DEC-Anlagen realisiert worden.

#### 4.1.1 Wärmepumpenanlage

Zur Beheizung des Gebäudes ist eine Wärmepumpenanlage der österreichischen Firma *Sun Systems*, bestehend aus fünf einzelnen Wärmepumpeneinheiten, in einer der vier Dachzentralen untergebracht. Jede Einheit (Abbildung 7) besteht dabei aus einem Kompressor vom Typ *ZR300 KCE-TWD* des Herstellers *Copeland* mit einer elektrischen Anschlussleitung von je 15 kW, einem Verdampfer, einem Verflüssiger und einem Wärmetauscher zur Heißgasentladung. Die gesamte Anlage liefert je nach Bedarfsfall insgesamt etwa 320 kW Wärme und 240 kW Kälte. Vorteil des modularen Aufbaus ist, dass durch Abschalten einzelner Einheiten die restlichen Wärmepumpen in einem optimalen Betriebsbereich arbeiten können und in Übergangszeiten gleichzeitig mit einer Einheit geheizt und mit einer anderen gekühlt werden kann. Die Heißgasentladung der gesamten Anlage erreicht eine Leistung von ca. 65 kW und dient zur unterstützenden Warmwasserbereitung des Hotels.

Als Wärmequelle für den Verdampfer dienen dabei die Tiefensonden und das thermisch aktivierte Betonfundament der Halle. Ein Vorteil dieses Systems ist, dass Wärme, die im Kühlfall im Verflüssiger anfällt, zur Erwärmung des Brauchwassers genutzt werden kann.



Abbildung 7: Wärmepumpeneinheit

#### 4.1.2 Wärmespeicher

Zur Wärmespeicherung auf hohem Temperaturniveau und zu Pufferzwecken sind zwei Wasserspeicher mit einer Kapazität von je 3.000 l installiert. Dabei dient je einer zur Kälte- und einer zur Wärmespeicherung, was ein häufiges Takten der Wärmepumpen, das sich negativ auf die Arbeitszahlen auswirkt, verhindert. Zur Speicherung des Warmwasservorrats des Hotels sind zusätzlich drei Pufferspeicher mit einer Kapazität von je 1.000 l vorhanden. Um die Wärmepumpen mit der benötigten Verdampferwärme zu beliefern, wurden 72 Tiefensonden mit einer Tiefe von je 40 m gebohrt. Diese dienen ebenso wie das mit einem ca. 15.000 m langen Rohrregister durchzogene Betonfundament des Gebäudes als saisonal arbeitender Niedertemperaturspeicher. Dieser Speicher ist zusätzlich in zwei Teile aufgeteilt:

- dem Betonfundament und 10 Tiefensonden
- die restlichen 62 Tiefensonden

Diese Unterteilung bietet die Möglichkeit einer gleichzeitigen Beladung auf verschiedenen Temperaturniveaus. Beladen wird der Niedertemperaturspeicher durch die im Kühlbetrieb überschüssige Verflüssigerwärme oder überschüssige Solarwärme sowie aus dem Gebäude über Direktkühlung abgeführte Wärme. Direktkühlung bedeutet das Durchströmen der im Baukörper verlegten Rohre mit Flüssigkeit, die direkt im Niedertemperaturspeicher gekühlt wird. Es kommen dabei keine Kältemaschinen zum Einsatz.

#### 4.1.3 Betonkernaktivierung

Zur Beheizung des Gebäudes wurde dieses mit einer Betonkernaktivierung versehen. Das bedeutet, dass in den Decken Rohrleitungen eingegossen wurden (Abbildung 8).

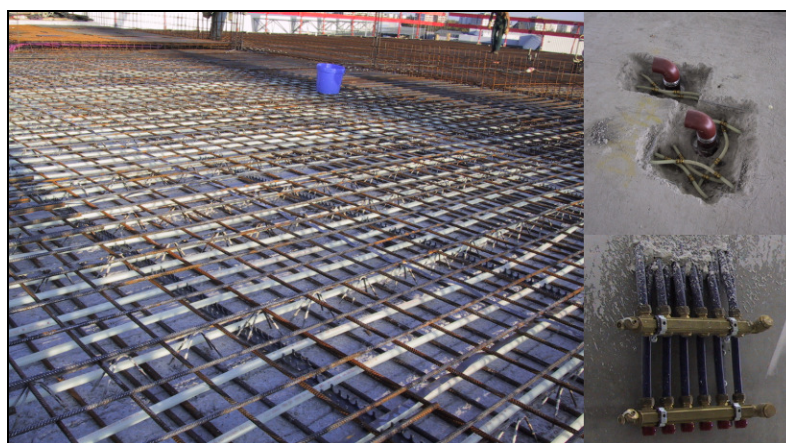


Abbildung 8: Baukörperaktivierung

Mit diesen wasserdurchströmten Leitungen soll der Baukörper temperiert und damit das Gebäude geheizt bzw. gekühlt werden. Vorteil dieser Konstruktion ist, dass sich sehr große Wärmeübertragungsflächen ergeben und sich somit eine Temperierung mit Temperatu-



ren nahe der gewünschten Raumtemperatur (ca. 24 °C) erreichen lässt. Durch diesen Effekt kann bereits mit niedrigen Vorlauftemperaturen geheizt und mit hohen Vorlauftemperaturen gekühlt werden. Dies steigert die Effizienz der Wärmepumpen, Direktkühlung wird möglich und Wärme bei niedrigen Temperaturen aus dem Kollektorfeld kann zur Heizung genutzt werden. Außerdem wird nahezu die gesamte Wärme durch Strahlung übertragen, was zu einem angenehmen Empfinden für die Nutzer führt. Um auf die unterschiedlichen Heiz- bzw. Kühllasten aufgrund der Sonneneinstrahlung zu reagieren, wurde das Rohrnetzwerk in einen Nord- und einen Südteil unterteilt.

Nachteil dieser Konstruktion ist, dass sie nur sehr träge thermisch reagiert und nicht individuell geregelt werden kann. Deshalb sind die Hotelzimmer zusätzlich mit individuell einstellbaren Flächenheizkörpern versehen. Außerdem sind die Badezimmer des Hotels sowie das Erdgeschoss mit einer Fußbodenheizung ausgestattet.

#### 4.1.4 Solarkollektorfeld

Hauptsächlich zum Betrieb der DEC-Anlage, aber auch zur Brauchwassererwärmung und der Heizungsunterstützung, wurde auf dem Dach des Gebäudes ein Sonnenkollektorfeld mit insgesamt 285,7 m<sup>2</sup> Bruttofläche errichtet. Dies entspricht bei den eingesetzten Kollektoren einer Aperturfläche von 262,9 m<sup>2</sup>. Dieses unterteilt sich in zwei Teilfelder von einer Fläche von 107,5 m<sup>2</sup> / 95,5 m<sup>2</sup>, bestückt mit dem Kollektor Typ *F6000* der Hamburger Firma *Conergy* (Abbildung 9), und eine Fläche von 178,2 m<sup>2</sup> / 167,4 m<sup>2</sup>, bestückt mit dem *BT-Kollektor* des australischen Herstellers *Solahart* (Abbildung 10).



Abbildung 9: Kollektorfeld *Conergy*

Die Unterteilung des Feldes dient zum Vergleich und zur Bewertung der Leistungsfähigkeit unter praktischen Bedingungen beider Kollektorentypen.



Abbildung 10: Kollektorfeld Solahart

#### **4.1.5 Fernwärmeanschluss und sonstige Systeme**

Zusätzlich besitzt das Gebäude einen Fernwärmeanschluss, der bei Ausfall des Heizsystems oder Wartungsarbeiten die komplette Heizung des Gebäudes übernehmen kann. Zur Sicherstellung der Brauchwasserversorgung des Hotels stehen zusätzlich zwei elektrische Heizstäbe mit je 9 kW Leistung zur Verfügung.

In der Fassade des Gebäudes ist außerdem eine Photovoltaikanlage mit einer Fläche von 397 m<sup>2</sup> und einer Leistung von 18 kW<sub>p</sub> installiert, die zur Strom einspeisung ins öffentliche Stromnetz genutzt wird.

#### **4.1.6 Hydraulisches System**

Das im Gebäude J installierte Hydrauliksystem lässt eine Vielzahl verschiedener Betriebsweisen zu. Abbildung 11 zeigt stark vereinfacht die möglichen Energieflüsse. Damit können Synergieeffekte genutzt werden. Überschüssig produzierte Solarwärme kann in den Erdspeicher abgeführt werden, was Stagnationsprobleme im Kollektor verhindert und den Erdspeicher mit Wärme belädt. Werden die Wärmepumpen zu Kühlzwecken eingesetzt, wird die im Verflüssiger produzierte Wärme der Brauchwassererwärmung zugeführt. Im Heizfall kann die aus Räumen mit ganzjährigem Kältebedarf, wie dem Filmstudio und dem Serverraum, anfallende Wärme dem Verdampfer der Wärmepumpe zugeführt werden.

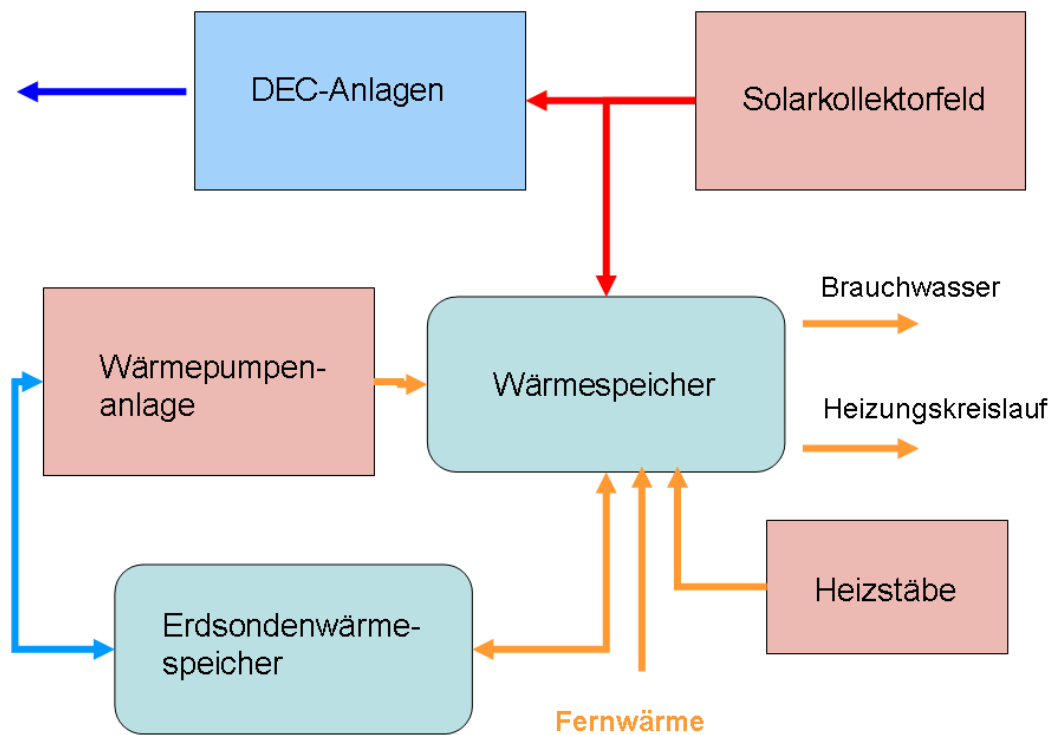


Abbildung 11: Mögliche Energieflüsse im Gebäude J

#### 4.1.7 DEC-Lüftungsanlagen

Im Gebäude J befinden sich zwei baugleiche Lüftungsanlagen vom *Typ DEC 101* (Abbildung 12) des im nahe Ingolstadt gelegenen Geisenfeld ansässigen Herstellers *Wolf Anlagen-Technik GmbH*. Die beiden Anlagen sollen Spitzenlasten abdecken und die träge reagierende Baukörperaktivierung unterstützen.

Tabelle 1 zeigt die technischen Rahmendaten der Anlage.

Tabelle 1: Technische Daten der Lüftungsanlage *DEC101* [WOL07a]

Nennvolumenstrom	8000 m <sup>3</sup> /h
Kälteleistung*	35 kW
Leistung des Zulufterhitzers	34 kW
Leistung des Regenerationsluftherhitzers	87 kW
Oberflächenkühler	40 kW
Elektrische Anschlussleistung	8 kW

\* Herstellerangabe



Abbildung 12: DEC Anlage Typ DEC101

Abbildung 13 zeigt schematisch die Komponenten und ihre Anordnung in der DEC-Anlage des Gebäudes J.

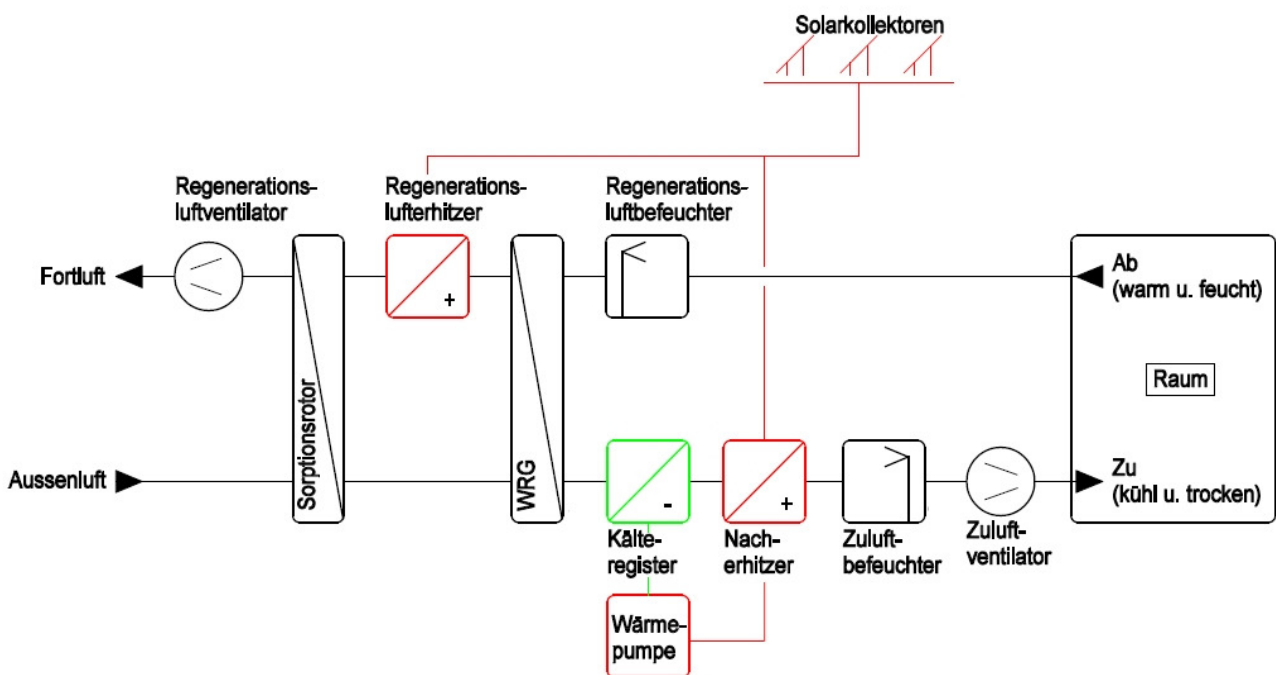


Abbildung 13: Schematischer Aufbau der solarbetriebenen DEC-Anlage des Gebäudes J

## Sorptionsrotor

Das Herzstück jeder DEC-Anlage ist der Sorptionsrotor (SPR). Dieser hat die Aufgabe, die Zuluft isenthalp zu trocknen, und funktioniert nach dem Absorptionsprinzip. In der beschriebenen DEC-Anlage kommt ein SPR der Firma *Klingenburg* vom Typ *SECO 1500* (Abbildung 14) zum Einsatz. Der Rotordurchmesser beträgt 1410mm, und hat eine Tiefe von 450mm. Der Grundstoff dieses Rades ist Zellulose, die mit einem patentierten Verfahren mit dem Sorptionsmittel Lithiumchlorid getränkt wird. Das Material ist biozid, die keimtötende Wirkung des Lithiumchlorids sorgt für hygienische Unbedenklichkeit. Ein weiteres Merkmal ist die niedrige, durch Feuchte bedingte Ausdehnung. Besonders hervorzuheben ist dabei, dass der Vorgang der Entfeuchtung nicht auf dem Adsorptionsprinzip, sondern auf dem Absorptionsprinzip beruht. Grund dafür ist die in der Zellulose gebundene Lithiumchloridlösung. An dieser Salzlösung wird das Wasser der Luft absorbiert. Dadurch lassen sich bereits in Verbindung mit niedrigen Regenerationstemperaturen hohe Entfeuchtungsleistungen erzielen.

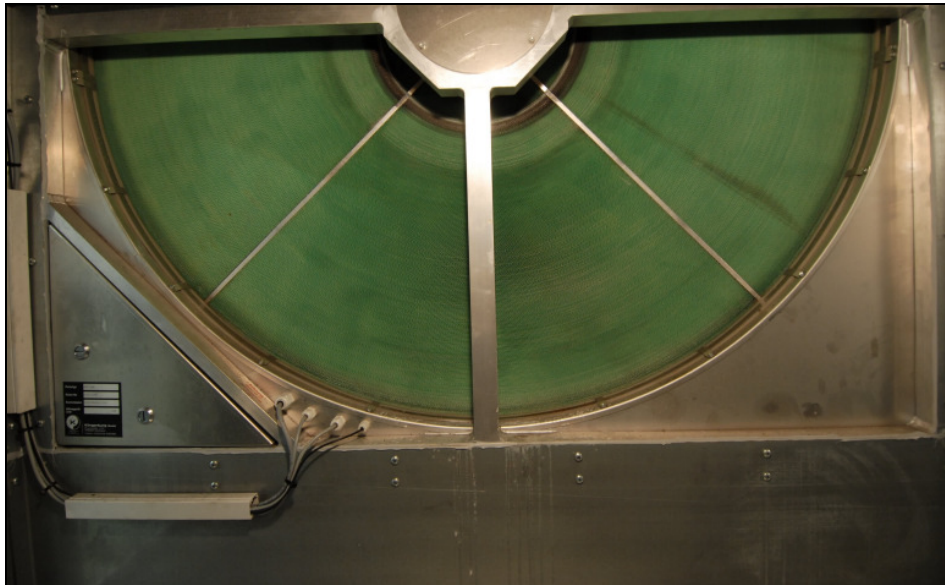


Abbildung 14: Sorptionsrotor

Zur Entfeuchtung der Luft wird der SPR mit einer Drehzahl von 20 U/h betrieben und darf dabei eine Temperatur von 70°C nicht überschreiten. Da für hohe Feuchteübertragungsleistungen eine große Oberfläche benötigt wird, besitzt das Rad eine wabenförmige Struktur (Abbildung 15).

Um die Wärmerückgewinnungsleistung im Heizbetrieb zu steigern, kann der SPR auch als Enthalpietauscher genutzt werden. Zu diesem Zweck wird er mit einer Drehzahl von 10 U/min betrieben. Damit kann die Lüftungsanlage bis zu 95% der Wärme zurückgewinnen [KLI07a]. Ist der SPR nicht in Betrieb, wird er in Abständen von ca. 30 Minuten automatisch eine halbe Umdrehung weiter gedreht, um eine einseitige Überladung des Feuch-

tetauschers und somit Beschädigungen zu vermeiden. Dieser Schutzmechanismus ist in dem ebenfalls von der Firma *Klingenburg* stammenden Regler des Rotors integriert.

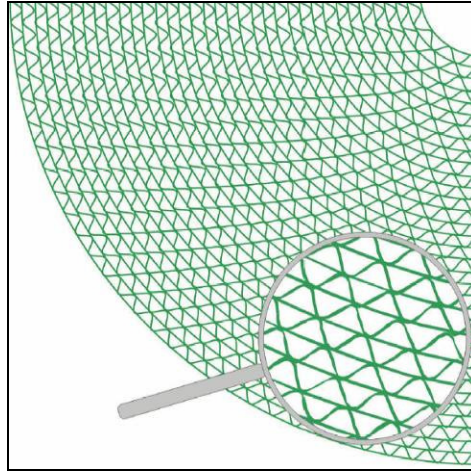


Abbildung 15: Struktur des SPR [KLI07a]

### Wärmerückgewinnungsrad

Der in der Anlage verbaute Wärmerückgewinnungsrotor (WRG) vom Typ *RRT 1420* (Abbildung 16) stammt ebenfalls vom Hersteller *Klingenburg*. Der Durchmesser beträgt 1420 mm und die Tiefe 400 mm. Im Aufbau ist er dem SPR sehr ähnlich, besteht allerdings aus einer seewasserbeständigen Aluminiumlegierung. Die Wärmerückgewinnungsleistung wird dabei über die Drehzahl des Rades eingestellt [KLI07b].



Abbildung 16: Rotationswärmetauscher

## Luftbefeuchter

Zur Befeuchtung der Zu- und Abluft ist jeweils eine Befeuchtereinheit installiert. Diese besteht jeweils aus einer Hochdruckkolbenpumpe vom Typ *FU Vacon* der Firma *Unelco* und einer Befeuchterkammer in der Lüftungsanlage. In den Befeuchterkammern sind Turbulatoren und Düsensätze (5 Düsen im Zuluftkanal, 7 Düsen im Abluftkanal) installiert. Nach der Befeuchterkammer folgt ein Tropfenabscheider (Abbildung 17).

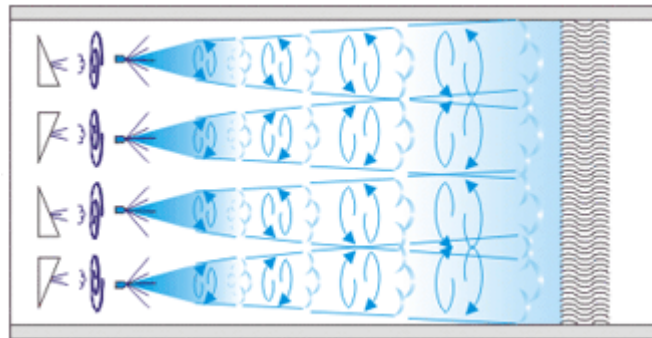


Abbildung 17: Befeuchterkammer [KLI07c]

Mit den Düsen wird enthärtetes Wasser unter einem Druck von 30...70 bar, abhängig vom Betriebspunkt der Befeuchter sehr fein zerstäubt. Diese feinen Tropfen verdunsten in der Luft, die mit den Turbulatoren erzeugten Turbulenzen verbessern dabei die Durchmischung des Nebels mit der Luft. Die Befeuchtungsleistung kann in 10%-Schritten mittels Drehzahlanpassung der Hochdruckpumpen durch einen Frequenzumrichter geregelt werden (Abbildung 18).



Abbildung 18: Hochdruckpumpeneinheit

Um Wasseransammlungen in der Anlage und damit Nährböden für Bakterien zu vermeiden, wird die Befeuchterkammer mit einem zweistufigen Aluminiumtropfenabscheider abgeschlossen. An diesem schlagen sich Tropfen nieder, das entstehende Kondensat wird an dieser Stelle aus der Anlage geleitet.

### **Wärmetauscher**

Um die Luftströme mit Energie zu versorgen, befinden sich in der Anlage insgesamt drei Oberflächenwärmetauscher. Der am größten dimensionierte Wärmetauscher, mit einer Leistung von 87 kW dient zur Erwärmung der Abluft, um eine Regeneration des SPR mittel solarer Wärme zu ermöglichen, und wird als Regenerationsluftherhitzer (RGLH) bezeichnet.

Im Zuluftkanal befinden sich zwei weitere Wärmetauscher, einer zum Heizen der Außenluft mit max. 34 kW Leistung im Heizbetrieb. Dieser wird als Zulufterhitzer oder Nacherhitzer bezeichnet. Der dritte Wärmetauscher wird als Kälteregister oder Oberflächenkühler (OFK) bezeichnet und dient zur Kühlung der Außenluft im Kühlbetrieb bei einer Leistung von etwa 35 kW. Der OFK dient als Nachkühleinrichtung und sollte im normalen Betrieb der DEC-Anlage keine Leistung übertragen.

## **4.2 Ablauf der Arbeiten**

Die Planung und Installation der Messtechnik wurden in enger Zusammenarbeit zwischen *pbb* und dem *Kompetenzzentrum Solartechnik* vorgenommen. Die Entscheidung, nicht wie ursprünglich geplant nur die DEC-Anlage sondern das komplette Gebäude messtechnisch zu erfassen, führte aufgrund des weitaus größeren Umfangs zu Verzögerungen bei der Inbetriebnahme der Messtechnik. Eine besondere Herausforderung war bereits in der Konzeptions- und Planungsphase des Gebäudes, dass die endgültige Nutzung, sprich die einzelnen Mieter des Gebäudes, erst zu einem sehr späten Zeitpunkt fixiert wurde. Somit musste die Gebäudetechnik und damit auch die Messtechnik laufend den neuen Anforderungen angepasst werden. Zum Beispiel wird -entgegen der ursprünglichen Planung- ein Teil des Gebäudes als Filmstudio genutzt, das eine hohe Kühlleistung bei gleichzeitig niedriger Geräuschbelastung benötigt.



## 5 Angewandte wissenschaftliche und technische Methoden

Für die wissenschaftliche Untersuchung des gesamten Gebäudes wurde umfangreiche Messtechnik installiert. Diese umfasst insgesamt 103 Messstellen. Sie ermöglicht die Erfassung sämtlicher Energieströme des Gebäudes sowie die Energieflüsse in einer der beiden DEC-Anlagen.

Die DEC-Anlage selbst wird dabei als Black Box betrachtet, d.h. nur die Energieflüsse, die in die Anlage gehen und aus der Anlage kommen, werden messtechnisch erfasst. Im Detail sind das die Luftfeuchten, die Temperaturen und die Volumenströme der Außen-, Zu-, Ab- und Wegluft sowie die Volumenströme und Temperaturen am Ein- und Ausgang des Regenerationsluftherhitzers, des Oberflächenkühlers und des Zulufterhitzers. Außerdem werden der Volumenstrom der beiden Befeuchter und die elektrische Stromaufnahme der gesamten Anlage erfasst. Abbildung 19 zeigt die Messstellen an der DEC-Anlage.

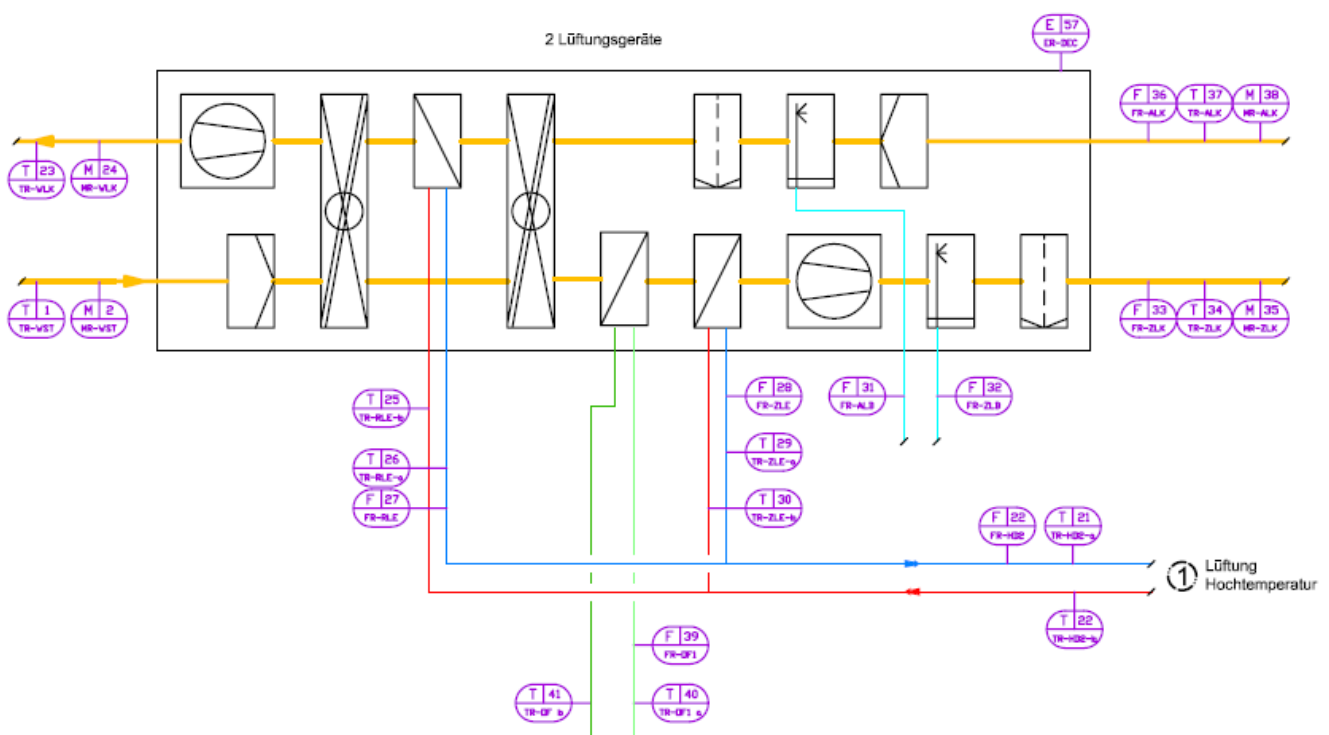


Abbildung 19: Messstellen an der DEC-Anlage [Sun05]

Die violetten Ovale stehen für je einen Messaufnehmer, dabei bezeichnet der Buchstabe links oben die Art des Messfühlers, bzw. welche Messgrößen damit erfasst werden:

- T: (Temperature) Temperatur
- F: (Flow) Durchfluss
- E: (Electricity) Aufnahme elektrischer Energie
- M: (Humidity) Luftfeuchte

Aus diesen Werten können die übertragenen Energiemengen berechnet und die Anlage energetisch bilanziert werden. Eine Aussage über die internen Vorgänge in der Anlage ist damit ebenfalls in begrenztem Umfang möglich.

Um die Auswirkung der Lüftungsanlage auf die Bedingungen in den Räumen bewerten zu können, werden zusätzlich die Temperatur, die Luftfeuchtigkeit und der Volumenstrom der zugeführten Lüftungsluft in sechs verschiedenen Räumen erfasst. Die restlichen Messstellen sind im Hydrauliksystem des Gebäudes verbaut und dienen zur Erfassung der Vorgänge in der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Gebäudetechnik sowie der Untersuchung der Leistungsfähigkeit der beiden Kollektorfelder. Zu diesem Zweck ist auch ein Strahlungssensor an der Wetterstation angebracht. Ein Überblick über die einzelnen Messwertnehmer kann Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Sensorik an Lüftungs- und Solaranlage

Sensor	Messbereich	Genauigkeit	Ausgang	Benennungen
Wirkenergiezähler	Drehstrom 400V	1 %	1000 Imp./kWh	ER-DEC
Luftgeschwindigkeits-Messumformer	0...10 m/s	+/-3 %	4 - 20 mA	FR-RL1-Hotel,FR-RL2-Bavaria,FR-RL3+4,FR-RL5+6
Feuchte/Temperatur-Messumformer	-30...+70 °C 0...100 % rF	+/- 2 % rM (> 90 % rF: 3 %) Pt1000 DIN A	4 - 20 mA	TR-RL1, MR-RL1,TR-RL2,MR-RL2,TR-RL3,MR-RL3,TR-RL4,MR-RL4, TR-RL5-Fischer,MR-RL5-Fischer,TR-RL6-Fritsch,MR-RL6-Fritsch
Feuchte/Temperatur-Messumformer	-40...+80 °C 0...100 % rF	+/- 1 % rM (>90 % rF: 2 %) Pt1000 DIN A	4 - 20 mA	TR-ZLK, MR-ZLK, TR-ALK, MR-ALK
Durchflussmesser (Ovalrad)	2...100 l/h	+/- 1 %	1000 Imp./l	FR-ALB, FR-ZLB
Durchflusszähler (Flügelrad)	0,2...10 m³/h	+/- 1 %	1 Imp./l	FR-ZLE, FR-RLE
Durchflusszähler (MID)	0,2...20 m³/h	+/- 0.5 %	1 Imp./l	FR-SKF1, FR-SKF2
Luftgeschwindigkeits-Messumformer	0-100 d PA	+/- 0.5 % des Druckbereichs	4 - 20 mA	FR-ZLK, FR-ALK
Pyranometer	0...1400 W/m²	1,5 % (< 1000 W/m²)	4 - 20 mA	RR-WST
Außentemperatur- und Feuchtesensor	-30...+70 °C 0...100 % rF	+/- 2 % rF Pt100 1/3 DIN B	4 - 20 mA	TR-WST, MR-WST
Temperaturtransmitter	0...+120 °C	Pt100 1/3 DIN B	4 - 20 mA	TR-RLE-a, TR-RLE-b, TR-ZLE-a, TR-ZLE-b, TR-SKF-a,TR-SKF-b,TR-SKF2-a,TR-SKF2-b

Die Aufzeichnung der Daten geschieht mittels eines *Fieldpoint 2000* Datenloggers der Firma *National Instruments*, von der auch die Software *Labview* zur Programmierung der Datenaufzeichnung stammt. Die Speicherung der Daten erfolgt in einer SQL-Datenbank. Die Auswertung der Daten wird mit der Software *Diadem* durchgeführt. In dieser wurde ein spezielles Auswerteskript erstellt, das durch die direkte Verrechnung von Dateneingangskanälen eine automatisierte Auswertung ermöglicht.

## 6 Bisher bekanntgewordene Ergebnisse und Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen

Tabelle 3 gibt einen Überblick über die in Europa realisierten solarbetriebenen DEC-Anlagen. Von der *Hochschule für Technik* in Stuttgart wurden unter Leitung von U. Eicker zwei Pilotanlagen in Althengstett bei Stuttgart sowie Mataro (Spanien) betreut. Beide Anlagen wurden mittels solarer Luftkollektoren mit Regenerationswärme versorgt und messtechnisch begleitet. Aus den Messergebnissen wurden Regelstrategien für das Luftkollektorfeld sowie die DEC-Anlage ermittelt [Eik02b, Eik06]. Eine weitere Anlage, die mittels solarer Luftkollektoren betrieben wird, befindet sich in Freiburg (Gebäude der *IHK*) und wurde vom *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme* begleitet und messtechnisch bewertet [Hin02]. Eine mittels flüssigkeitsgeführten Flachkollektoren betriebene Pilotanlage klimatisiert einen Seminarraum im technologieorientierten Gründerzentrum Riesa-Großenhain. Diese Anlage wurde von der *Technischen Universität Karlsruhe* messtechnisch bewertet und ein Simulationsmodell für die DEC-Anlage erstellt. Die Arbeiten konzentrierten sich ausschließlich auf die DEC-Anlage und die Kombination mit den Solarkollektoren; die Einbindung in die weitere Gebäudetechnik bzw. die Interaktion mit weiteren Kühleinrichtungen war nicht Gegenstand der Untersuchung [Erp99]. Eine weitere, vergleichbare Anlage befindet sich im Ökopark Hartberg (Österreich). Diese wurde von *Joanneum Research*, Institut für Energieforschung, im Rahmen des EU-geförderten ASODECO-Projekts messtechnisch untersucht [Pod00, Pod02]. Ergebnisse einer eventuell durchgeführten Optimierung der Anlage sind leider nicht verfügbar.

Die verfügbaren Ergebnisse und Optimierungen der Anlagen mit Luftkollektoren sind nur bedingt auf Anlagen mit flüssigkeitsgeführten Flachkollektoren übertragbar, da das Prinzip der Regeneration auf Erwärmung von Außenluft und nicht der Abluft beruht. Des Weiteren ist die Einbindung von Luftkollektoren in die Warmwasserbereitung und/oder (meist ebenfalls flüssigkeitsgeführte) Heizungsunterstützung aufwändig beziehungsweise teilweise nicht möglich. Die weitaus meisten bestehenden Demonstrations- und Pilot-Anlagen sind auf unabhängigen Betrieb von weiteren Klimatisierungseinrichtungen ausgelegt (z.B. *IHK* Freiburg, *TGZ* Riesa, *ILK* Dresden), d.h. sind von Seiten der Regelungsstrategie wesentlich einfacher zu handhaben als systemintegrierte Anlagen im Zusammenspiel mit weiteren Einrichtungen (wie es etwa die Anlage der Fa. *Maier*, Althengstett, mit der Integration in einen Produktionsprozess ist). Dazu handelt es sich bei den in Deutschland installierten und mit Flachkollektoren betriebenen Anlagen um Anlagen kleiner Größenordnung, die jeweils nur beispielsweise einen Raum klimatisieren, bzw. um Testanlagen. Ein vergleichbares Konzept, das eine volle Systemintegration und eine multivalente Nutzung der Flachkollektoren für Heizung, Warmwasser und Kühlung vorsieht, wie es im Untersuchungsgebäude umgesetzt wurde, ist derzeit nicht verfügbar.

Tabelle 3: Überblick über realisierte Anlagen mit solarbetriebener DEC-Technologie [1] – [23]

Anlage	Anwendung	Kühlleistung Volumenstrom	Kollektortyp	Kollektorfläche [m <sup>2</sup> ]	Betrieb seit
ILK Dresden (D)	Konferenzraum	18 kW 2.700 m <sup>3</sup> /h	FK	20	n/A
TGZ Riesa (D)	Konferenzraum	18 kW 2.640 m <sup>3</sup> /h	FK	20	1997
FHT Stuttgart (D)	Ausstellungsraum	18 kW 3.000 m <sup>3</sup> /h	SLK	20	n/A.
Stadtwerke Bückeburg (D)	Konferenzraum, Foyer	30 kW 5.000 m <sup>3</sup> /h	SLK	100	1998
EZK Heemstede (NL)	Konferenzraum	n/A 7.700 m <sup>3</sup> /h	FK	77	1999
IHK, Freiburg (D)	Konferenzraum	60 kW 10.200 m <sup>3</sup> /h	SLK	100	2001
Fraunhofer ISE, Freiburg (D)	Testanlage	24 kW 4.000 m <sup>3</sup> /h	SLK+ FK	je 20	2001
Verhust Waalwijk (NL)	Bürogebäude	22 kW 3.250 m <sup>3</sup> /h	FK	33	2002
INETI Lissabon (P)	Bürogebäude	28,6 kW 5.000 m <sup>3</sup> /h	FK	44	1999
Ökopark Hartberg (A)	Konferenzraum, Büro	30 kW 6.000 m <sup>3</sup> /h	VK	12	2000
Atecnic, Sintra (P)	Bürogebäude	75 kW 10.000 m <sup>3</sup> /h	FK	72	1999
Universität Jerewan (ARM)	Vorlesungssaal	n/A 8500 m <sup>3</sup> /h	FK	64	2002
Bibliothek Matarò (E)	Bibliothek	81 kW 12.000 m <sup>3</sup> /h	SLK	97	2002
Maier, Althengstett (D)	Produktionshalle	108 kW 18.000 m <sup>3</sup> /h	SLK	100	2000

FK: Flachkollektor

SLK: Solar-Luft-Kollektor

VK: Vakuumröhrenkollektor

Des Weiteren werden derzeit nahezu in allen Bereich der solaren Kälteerzeugung massive Forschungsanstrengungen unternommen, die beispielsweise von Eicker [Eic08] aktuell zusammengefasst sind. Herauszuheben ist dabei derzeit vor allem der Bereich der Kältemaschinenentwicklung auch im kleinen Leistungsbereich bis  $20\text{kW}_{\text{th}}$  [Cla08, Saf08]. Er-

gänzend dazu werden beispielsweise Aktivitäten zur Modellierung und Simulation des Anlagenverhaltens solarer Kühlanlagen [Koh07, Car07] oder Anwendungen (z.B. eines Einkaufszentrums [Oli07]) unternommen.

Die Übersicht in Tabelle 3 zeigt, dass europaweit bereits zahlreiche Ansätze unternommen wurden, um solarthermisch betriebene DEC-Anlagen wissenschaftlich und vor allem in der Anwendung als Demonstrations- oder Pilotanlagen zu untersuchen. Die überwiegende Mehrzahl der wissenschaftlichen Untersuchungen an den gezeigten Anlagen ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt bereits abgeschlossen. Weiterführende Aktivitäten, die diese zweifelsohne viel versprechende Technologie einer breiten Markteinführung näher bringen müssen, sind derzeit nicht zu erkennen.

## 7 Bewertung und Darstellung der erzielten Ergebnisse und ihrer praktischen Anwendbarkeit

### 7.1 Verhalten der solarbetriebenen DEC-Anlage im Betriebsjahr 2006

Das Gefühl der Behaglichkeit am Arbeitsplatz ist von vielen verschiedenen, auch stark individuell „gefühlten“ Faktoren abhängig, von denen lediglich die Raumlufthemperatur und -feuchte objektiv bewert- und messbar sind. Diese beiden Faktoren lassen sich dementsprechend im sog. Behaglichkeitsfeld kombinieren, das Bereiche wie „behaglich“, „noch behaglich“, „zu trocken“ oder „zu warm“ definiert.

Im Gebäude J zeigt die Auswertung für die Monate Juni / Juli (Abbildung 20) weitgehend „behagliche“ (comfortable) bzw. „noch behagliche“ (still comfortable) Bedingungen. Nahezu 85 % aller Messpunkte liegen in diesen beiden Bereichen. Tendenziell war es in diesem Zeitraum lediglich „etwas“ zu warm in den Räumen.

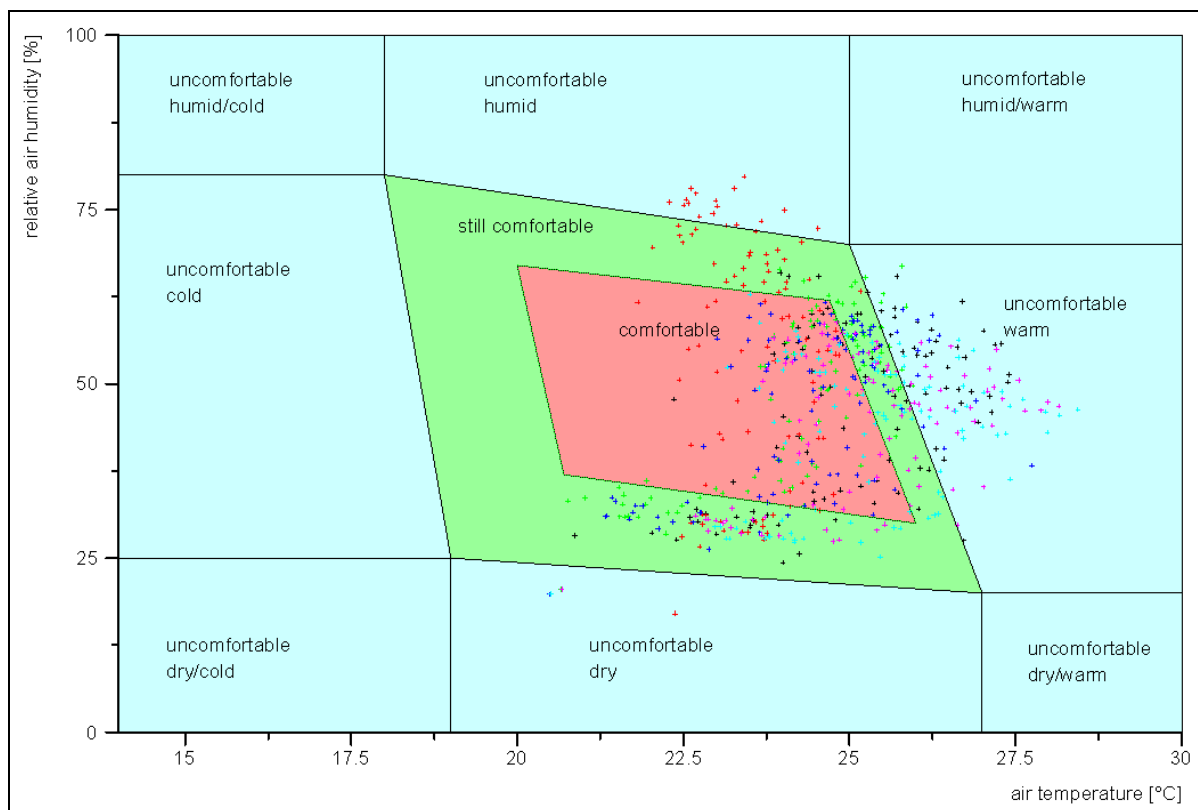


Abbildung 20: Behaglichkeitsfeld für die Monate Juni / Juli (die verschiedenen Farben der Messpunkte beziehen sich auf die 6 betrachteten Räume)

Im Zeitraum November / Dezember lagen die Raumlufthzustände zu 95 % in den Bereichen „behaglich“ (36 %) und „noch behaglich“ (59 %). Hier war klar die Tendenz zu etwas zu trockener Luft feststellbar. Im gesamten Jahr 2006 lagen die Raumlufthzustände zu 85 %

bei „behaglich“ (48 %) und „noch behaglich“ (37 %) – ein durchaus positives Ergebnis aus Sicht der Raumklimatisierung. Wiederum nur in geringem Umfang war „zu trocken“ (11 %) bzw. „zu warm“ (3 %) zu beobachten.

Die Analyse der Energieströme im gesamten Gebäude ergab allerdings, dass dieses hohe Komfortniveau im Wesentlichen durch die Wärmepumpenanlage im Zusammenspiel mit der Bauteilaktivierung und den individuell regelbaren Flächenheiz- bzw. -kühleinrichtungen erreicht werden konnte. Die für die Spitzenlasten vorgesehenen DEC-Anlagen zeigten diesbezüglich ein eher kontraproduktives Verhalten. So konnte gezeigt werden, dass die Kälteleistung der untersuchten DEC-Anlage bei weitem nicht die Erwartungen erfüllte und teilweise die Räume im Sommer sogar beheizt wurden, obwohl die Anlage mit dem Ziel maximaler Kälteleistung betrieben wurde. Sehr gut erkennbar ist dies im Zeitraum von Mitte Juni bis Mitte September 2006, wie in Abbildung 21 dargestellt. Sowohl der Regenerationsluftheritzer (RGLH) als auch der Oberflächenkühler (OFK; Backup-Kälteregele im Zuluftkanal) sind in Betrieb. Bei einem funktionierenden DEC-Prozess müsste die Kälteleistung aber in jedem Fall größer sein als die Leistung des OFK, da der OFK nur Spitzenlastbereiche abdecken und die eigentliche Kälteleistung vom DEC-Prozess stammen sollte. Auch kleine in den Morgenstunden zugeführte Heizleistungen können die Bilanz nicht in diesem Maß beeinträchtigen. Im gezeigten Zeitraum kann im Allgemeinen eine Kälteleistung durch die DEC-Anlagen erwartet werden. Im Gegensatz dazu kam es aber offensichtlich zu einer Beheizung der Zuluft durch den Regenerationsluftheritzer (erkennbar am positiven Wärmestrom in der Zuluft) beispielsweise über den Sorptionsrotor (SPR) beziehungsweise durch Undichtigkeiten, die durch den in der Anlage eingebauten Oberflächenkühler zum Teil wieder ausgeglichen werden mussten.

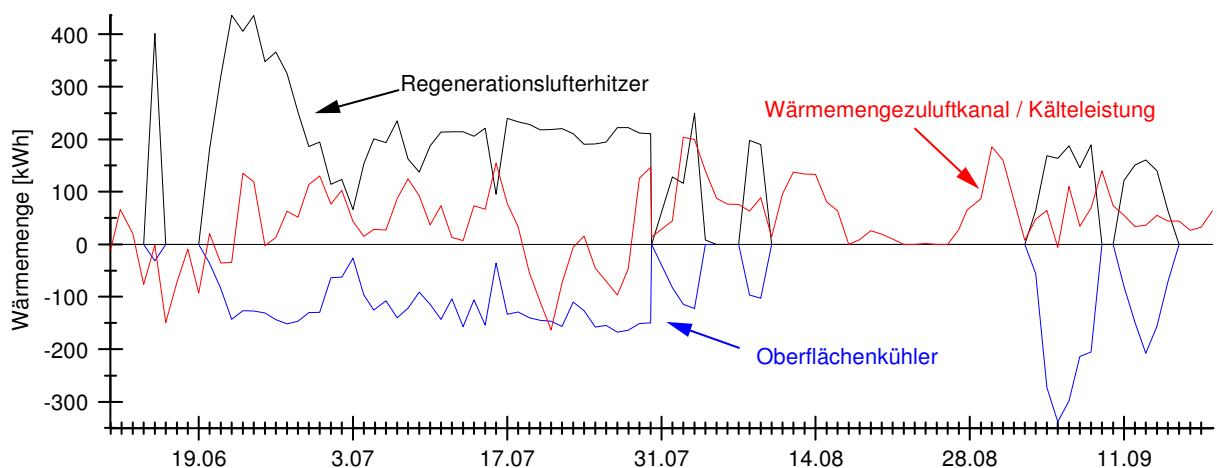


Abbildung 21: Wärmeströme der vermessenen DEC-Anlage im Zuluftkanal, am Regenerationsluftheritzer und am Oberflächenkühler im Zeitraum Mitte Juni bis Mitte September 2006

Eine detaillierte Analyse des Gesamtsystems – wobei zu beachten ist, dass die DEC-Anlagen bislang als Blackbox betrachtet wurden, sprich keine Messtechnik in den Anlagen

selbst vorhanden ist – ist mit den in Abbildung 22 dargestellten Messwerten eines beispielhaften Messtages möglich.

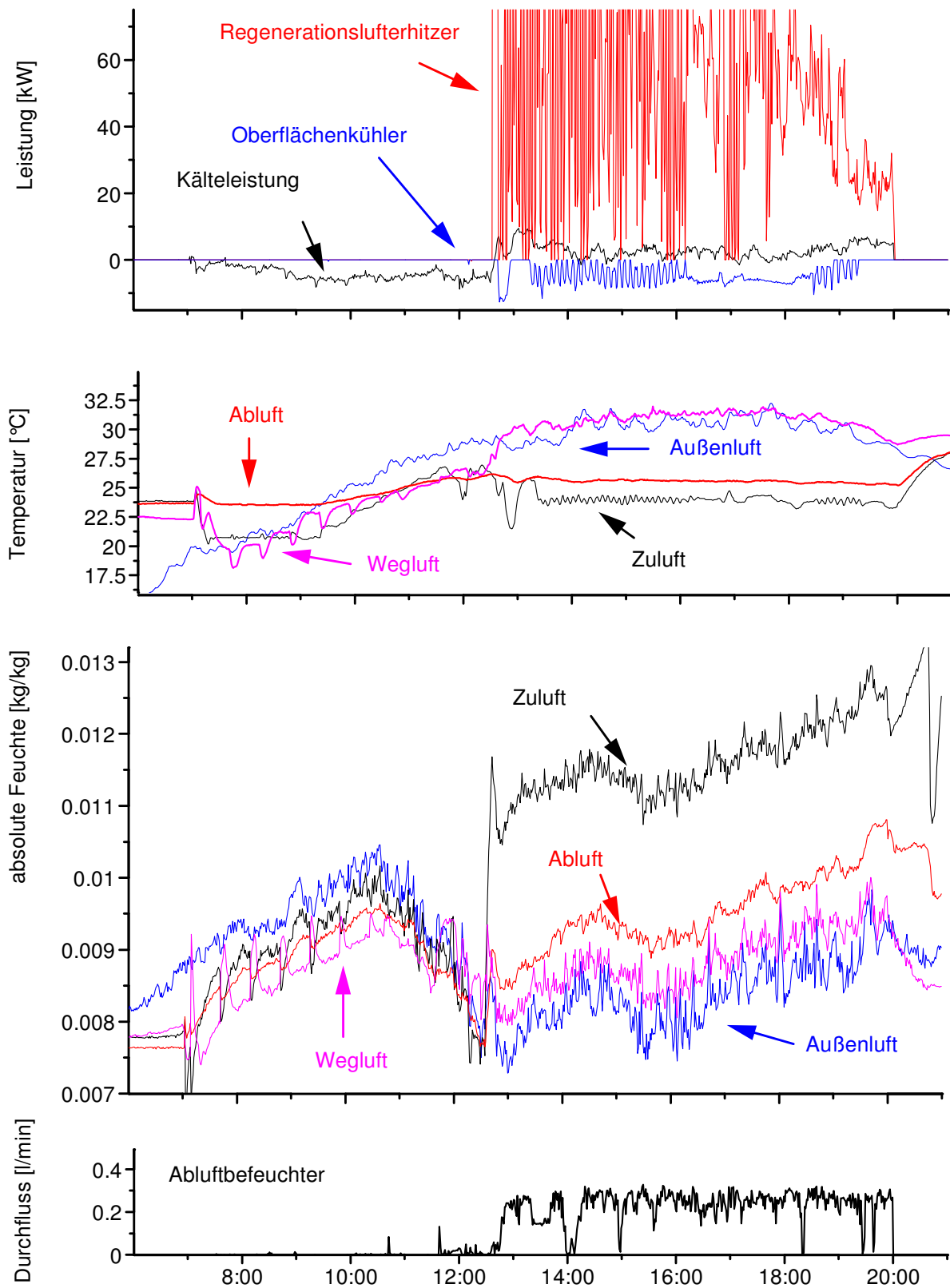


Abbildung 22: Verhalten der DEC-Anlage am 14.06.2006



Die oberste Grafik zeigt die Wärmeleistungen, die in der Anlage umgesetzt werden. Dabei ist auffällig, dass sich die negative Kälteleistung nach Start des RGLH in eine positive Heizleistung verwandelt. Bei einem regulären Betrieb müsste der Start des RGLH, und somit des DEC-Prozesses, eine Steigerung der Kälteleistung erwirken. Hinzu kommt, dass ab ca. 13:00 Uhr der OFK die Zuluft zusätzlich kühlt, was in jedem Fall eine negative Kälteleistung hervorrufen müsste.

Die Darstellung der Temperaturverläufe zeigt, dass zwar die Temperatur der Zuluft einen Wert von ca. 22,5°C einhält, aber aufgrund des hohen Feuchtegehalts der Zuluft im Vergleich zur Abluft die Enthalpiedifferenz zwischen Zuluft und Abluft positiv ist. Des Weiteren weist die Wegluft nur eine Temperatur von ca. 30°C auf, obwohl ihr mit dem RGLH Wärme zugeführt wird.

Bei Betrachtung der Luftfeuchten ist besonders auffällig, dass sich die Feuchte der Luft im Abluftkanal (Abluft → Wegluft) trotz Betriebs des Abluftbefeuchters insgesamt verringert. Die wahrscheinlichste Erklärung für diese Phänomene ist ein Sorptionsrotor, der mit zu hoher Drehzahl betrieben wird. Dieser wirkt dann wie ein Wärmerückgewinnungsrad und heizt durch die erwärmte Regenerationsluft die angesaugte Außenluft, beziehungsweise kühlt die Luft im Abluftkanal. Außerdem verändert sich die Entfeuchtungseigenschaft des SPR im Zuluftkanal in eine Befeuchtungseigenschaft, was somit auch die Entfeuchtung im Abluftkanal erklärt.

Zusammenfassend können eine Reihe potenzieller Ursachen für die Fehlfunktion der DEC-Anlage im Betriebsjahr 2006 festgehalten werden [Hal07a]:

- Das Sorptionsrad läuft aufgrund fehlerhafter Steuerung offensichtlich mit zu hoher Drehzahl. Es wirkt deshalb primär als Wärmetauscher und kann dem Anspruch der Entfeuchtung daher nicht gerecht werden. Zudem zeigten sich Undichtigkeiten in der vermessenen Anlage, verursacht durch eine verletzte Dichtlippe.
- An mehreren Komponenten der DEC-Anlagen waren starke Verkalkungen durch eine Fehlbedienung der zentralen Enthärtungsanlage des Gebäudes zu finden. So kam es zur Verkalkung einiger Düsen der Sprühbefeuchter. Somit war auch die Befeuchtungsleistung deutlich eingeschränkt und damit die Gesamtleistungsfähigkeit der DEC-Anlagen drastisch reduziert.
- Die Anlagensteuerung nutzt schwerpunktmäßig die Temperaturen von Zu- und Abluft als Steuergrößen. Damit werden Be- und Entfeuchtungsvorgänge in der Anlage von der Steuerung prinzipiell „ignoriert“. Das führt dazu, dass im Falle mangelhafter Entfeuchtung geheizt statt gekühlt wird. Die Steuerung muss deshalb unbedingt auch Feuchtezustände innerhalb der Anlage erfassen und entsprechend berücksichtigen.

- Auffällig sind auch die periodenweise unterschiedlichen Volumenströme in Zu- und Abluft, was wiederum von der Steuerung nicht berücksichtigt wird und damit zu ungewolltem Verhalten der DEC-Anlagen führt.
- Die jeweiligen Steuerungen von Wärmepumpe (als Grundlast-Wärme- und Kältelieferant für Bauteilaktivierung und Flächenheizung / -kühlung) und DEC-Anlagen (als Spitzenlast-Kältelieferant) sind unzureichend miteinander vernetzt. So versuchen beispielsweise die DEC-Anlagen im Winter eine Ablufttemperatur von maximal 22°C zu halten, wobei die Räume in diesem Zeitraum meist wärmer sind. Auf der anderen Seite versuchen die DEC-Anlagen die Räume im Sommer tatsächlich zu kühlen, so wie es zu erwarten ist. Aufgrund der Schwierigkeiten mit der Be- und Entfeuchtung ist jedoch die Zuluft sehr viel feuchter als die Abluft, was einer Energiezufuhr in das Gebäude entspricht.
- Ebenfalls als nicht zufriedenstellend wurde die Einbindung der Solarkollektoren in die übrige Gebäudetechnik (Heizungsunterstützung und Warmwasserbereitung für Hotel) und damit die Ausnutzung der solar erzeugten Wärme bewertet. Die Leistungsfähigkeit und Tauglichkeit der beiden Flachkollektortypen für den solaren DEC-Betrieb zeigte sich dagegen als sehr gut.

## 7.2 Wartung der DEC-Anlagen und Verhalten im Betriebsjahr 2007

Basierend auf den Erkenntnissen aus dem Monitoring wurde im Mai 2007 eine Komplettwartung der Lüftungsanlagen durchgeführt. Dabei wurden die folgenden Probleme in den Komponenten der Anlage festgestellt und behoben:

- verstopfte Befeuchterdüsen (Verkalkung, vgl. [Abbildung 23](#))
- stark verkalkte Tropfenabscheider ([Abbildung 23](#))
- Leckagen an den Dichtungen von Sorptions- und Wärmerückgewinnungsrotor
- fehlerhaft eingebautes Rückschlagventil in der hydraulischen Versorgung des Regenerationsluftherhitzers

Außerdem wurde die Regelstrategie in Bezug auf Kälteleistung und die Drehzahl des Sorptionsrotors überprüft [Hal07b].

Nach der Überarbeitung und Neuinbetriebnahme konnte in der Kühlperiode 2007 ein wesentlich zuverlässigerer Betrieb des solaren DEC-Systems und wiederum eine sehr zufriedenstellende Behaglichkeit im Gebäude festgestellt werden ([Abbildung 24](#)). Im Zeitraum von Juni bis August 2007 lagen 88% aller Messwerte im „angenehmen“ Bereich, weitere 18% im „noch angenehmen“ Bereich. Die genauere Analyse der Energieströme im gesamten Gebäude zeigte allerdings, dass dieses hohe Komfortniveau in weiten Teilen durch die Wärmepumpenanlage im Zusammenspiel mit der Bauteilaktivierung und den individuell

regelbaren Flächenheiz- bzw. -kühleinrichtungen erreicht werden konnte. Die DEC-Anlagen konnten dazu nur begrenzt beitragen.

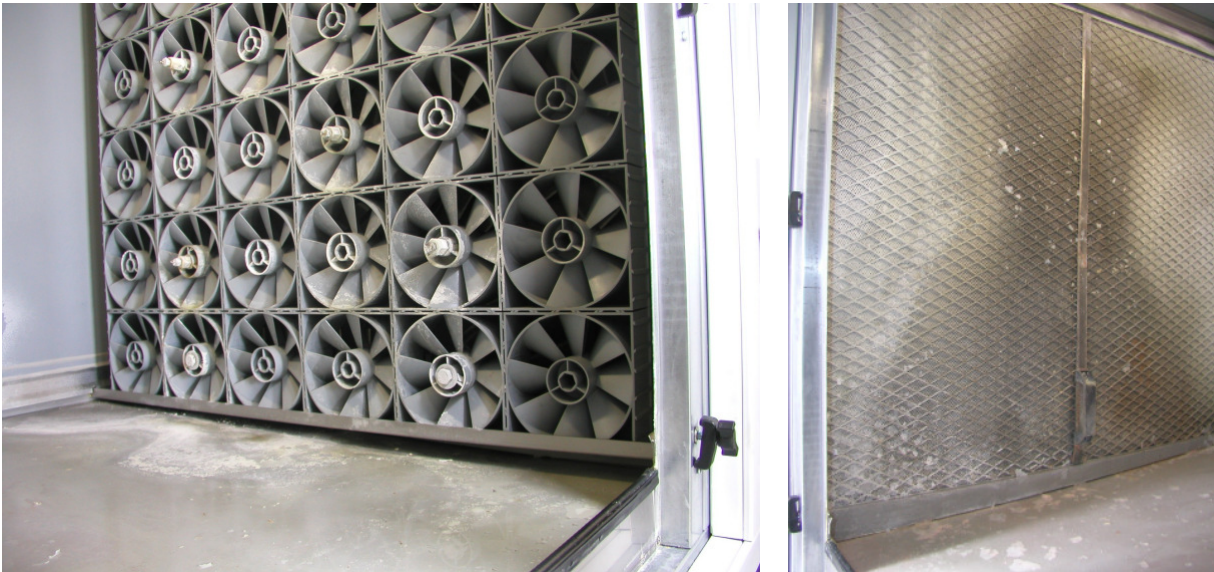


Abbildung 23: Verkalkte Befeuchterdüsen (links) und Tropfenabscheider (rechts)

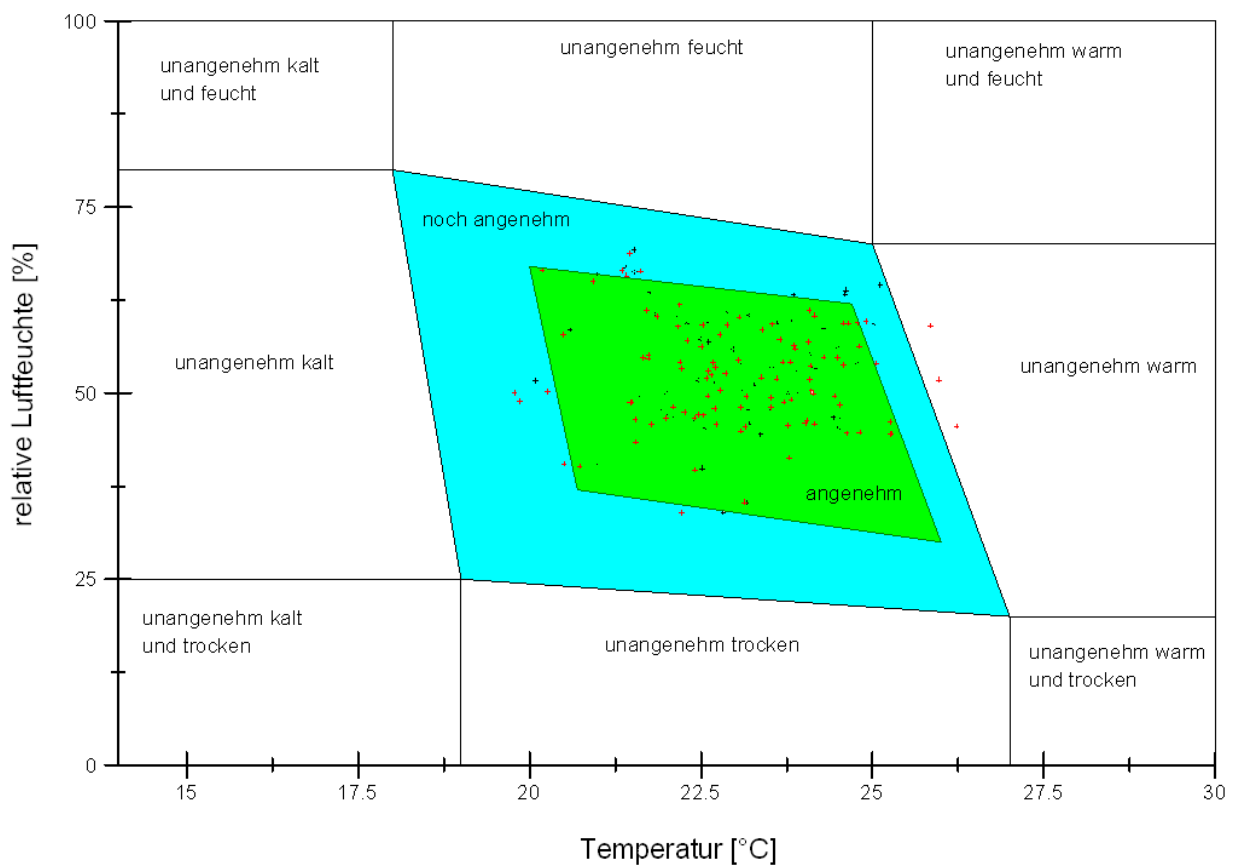


Abbildung 24: Klimabedingungen von Juni bis August 2007 in zwei beispielhaften Räumen des Gebäudes

Trotz der an der Anlage vorgenommenen Optimierungsmaßnahmen konnte damit auch im Betriebsjahr 2007 noch nicht die erwartete Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems erreicht werden. So bleibt weiterhin ein großes Optimierungspotenzial in der energieeffizienten und bedarfsorientierten Einbindung der Solarkollektoren in die Gebäudetechnik vorhanden. Bei der solarbetriebenen DEC-Anlage zeigte sich erfreulicherweise, dass die im Betriebsjahr 2006 identifizierten Probleme beseitigt werden konnten, die volle Kälteleistung wurde allerdings nicht realisiert.

In Abbildung 25 sind die Stundenmittelwerte der Kälteleistung in der wärmsten Woche des Jahres 2007 dargestellt. Dieser Wert liegt dabei auf einem maximalen Niveau von 7...12 kW. Die positiven Ausschläge entsprechen kurzen Heizphasen während der Morgenstunden. Gegenüber der erwarteten Kälteleistung von bis zu 26 kW gemäß der Anlagen- und Komponentenauslegung beim in diesem Zeitraum vorhandenen Volumenstrom von 4.800 m<sup>3</sup>/h ist dies bei weitem nicht zufriedenstellend. Um die Ursachen hierfür zu analysieren werden nachfolgend verschiedene typische Betriebstage anhand der Messdaten untersucht [Tri08b].

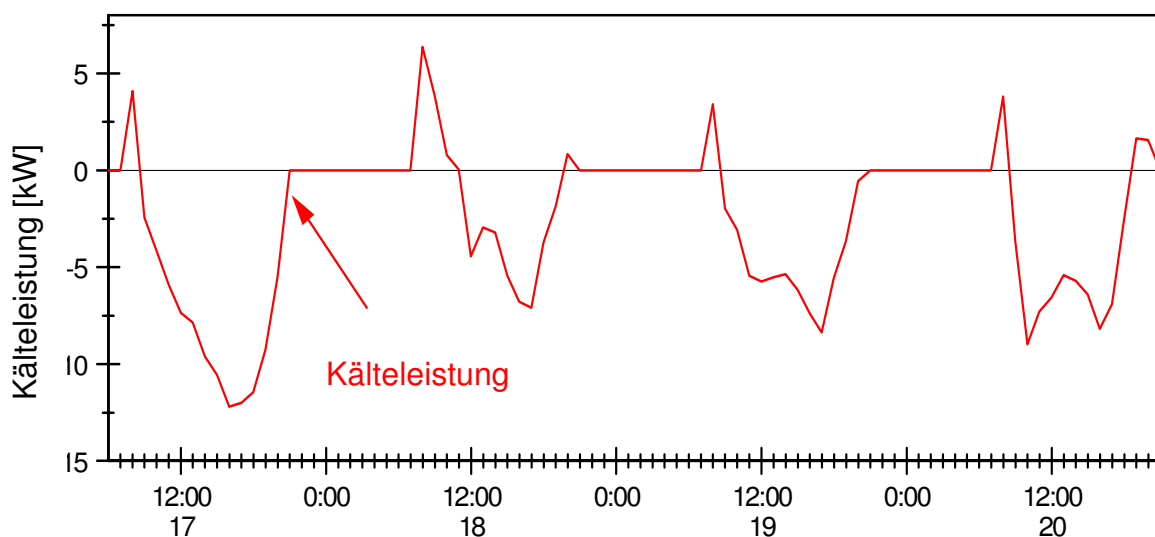


Abbildung 25: Kälteleistung vom 17.07. bis 20.07.2007 (Stundenmittelwerte)

### 7.2.1 Verhalten der DEC-Anlage am 17.07.2007

Abbildung 26 zeigt die Messwerte an der DEC-Anlage für den 17.07.2007, einem Tag mit einer im Vergleich zu anderen Messtagen verhältnismäßig hohen gemessenen Kälteleistung von bis zu knapp 15 kW. Besonders markant erscheinen an diesem Tag kontinuierlich auftretende Spitzen in der absoluten Feuchte der Wegluft in identischen Zeitabständen von 30 Minuten. Diese lassen sich auf die Schutzfunktion des Sorptionsrotors zurückführen, die diesen regelmäßig um eine halbe Umdrehung bewegt und damit eine einseitige Feuchtebelastung oder Übersättigung / Austrocknung verhindert.

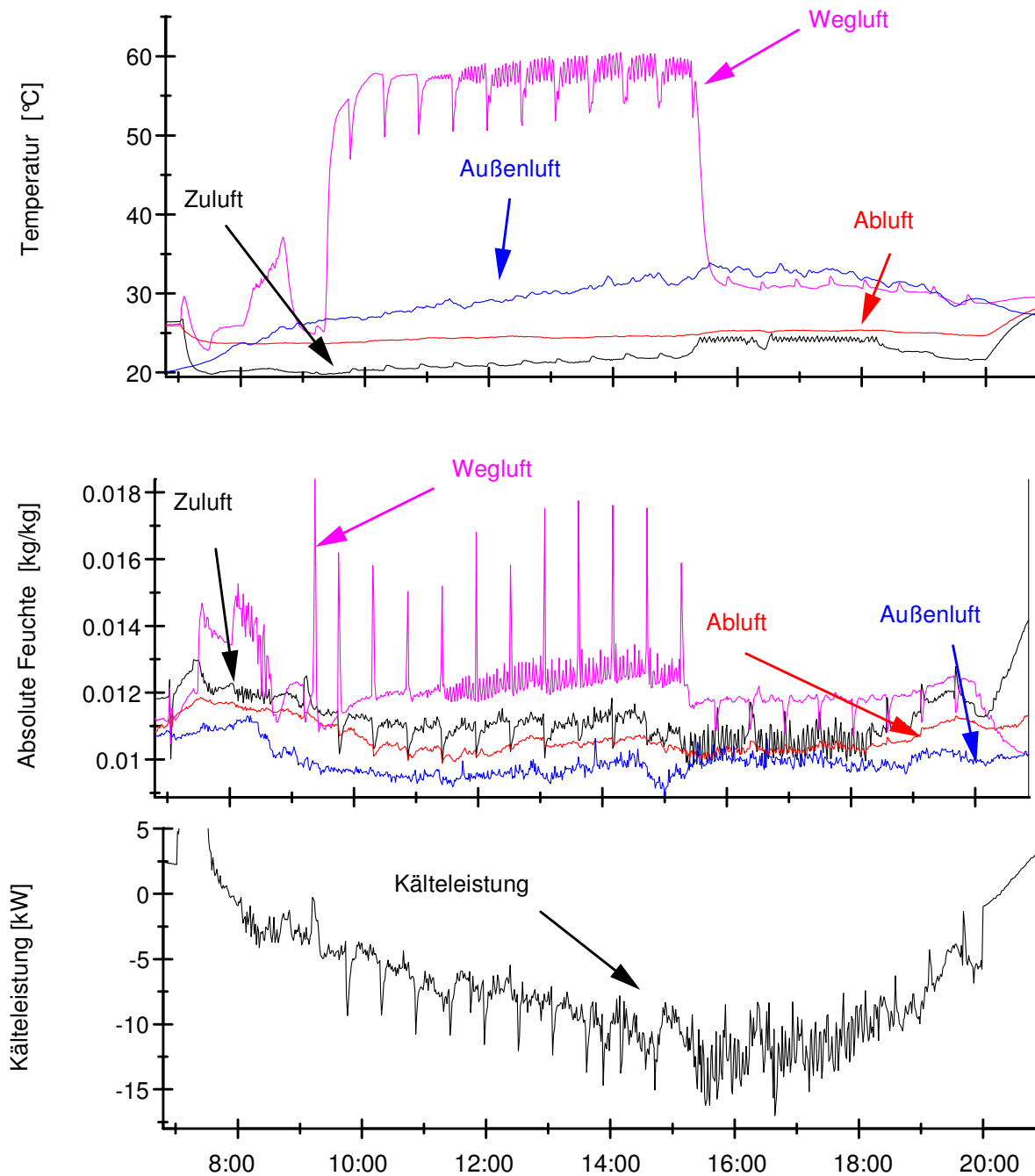


Abbildung 26: Verhalten der DEC-Anlage am 17.07.2007

Der hohe Betrag der Ausschläge von ca. 6 g/kg absoluter Feuchte lässt sich darauf zurückführen, dass beim Bewegen des Rotors mit der Schutzfunktion dieser zuerst mit hoher Geschwindigkeit (schneller als im kontinuierlichen Desorptionsbetrieb) gedreht und dann wieder gestoppt wird. Dadurch wird die mit Wasser beladene Seite des SPR schlagartig und nicht kontinuierlich wie im normalen Betrieb, entfeuchtet. Zum Weiteren bedeutet dies aber, dass der SPR an diesem Tag nicht im Entfeuchtungsbetrieb ist, obwohl eine Regenerationsluftherhitzung erfolgt. Die erbrachte Kälteleistung resultiert in diesem Betriebszustand folglich ausschließlich aus Befeuchtung der Abluft und Kälterückgewinnung ohne

DEC-Prozess. Letzterer wird von der Anlagenregelung offenbar nicht in Betrieb gesetzt, da der gesetzte Parameterwert für die maximale relative Zuluftfeuchte an diesem Tag mit trockener Außenluft nicht überschritten wird. An diesem Tag wird also durch die Lüftungsanlage ohne DEC-Prozess eine höhere Kälteleistung erreicht, als an vergleichbaren Tagen, an denen aber der Sorptionsrotor und damit der DEC-Prozess gestartet wird (beispielsweise der 19.07.2007 in [Abbildung 25](#)).

### 7.2.2 Verhalten der DEC-Anlage am 14.08.2007

Als typischer Betriebstag mit DEC-Betrieb lässt sich der 14.08.2007 darstellen. [Abbildung 27](#) zeigt dazu die Vorgänge an der Anlage an diesem Tag.

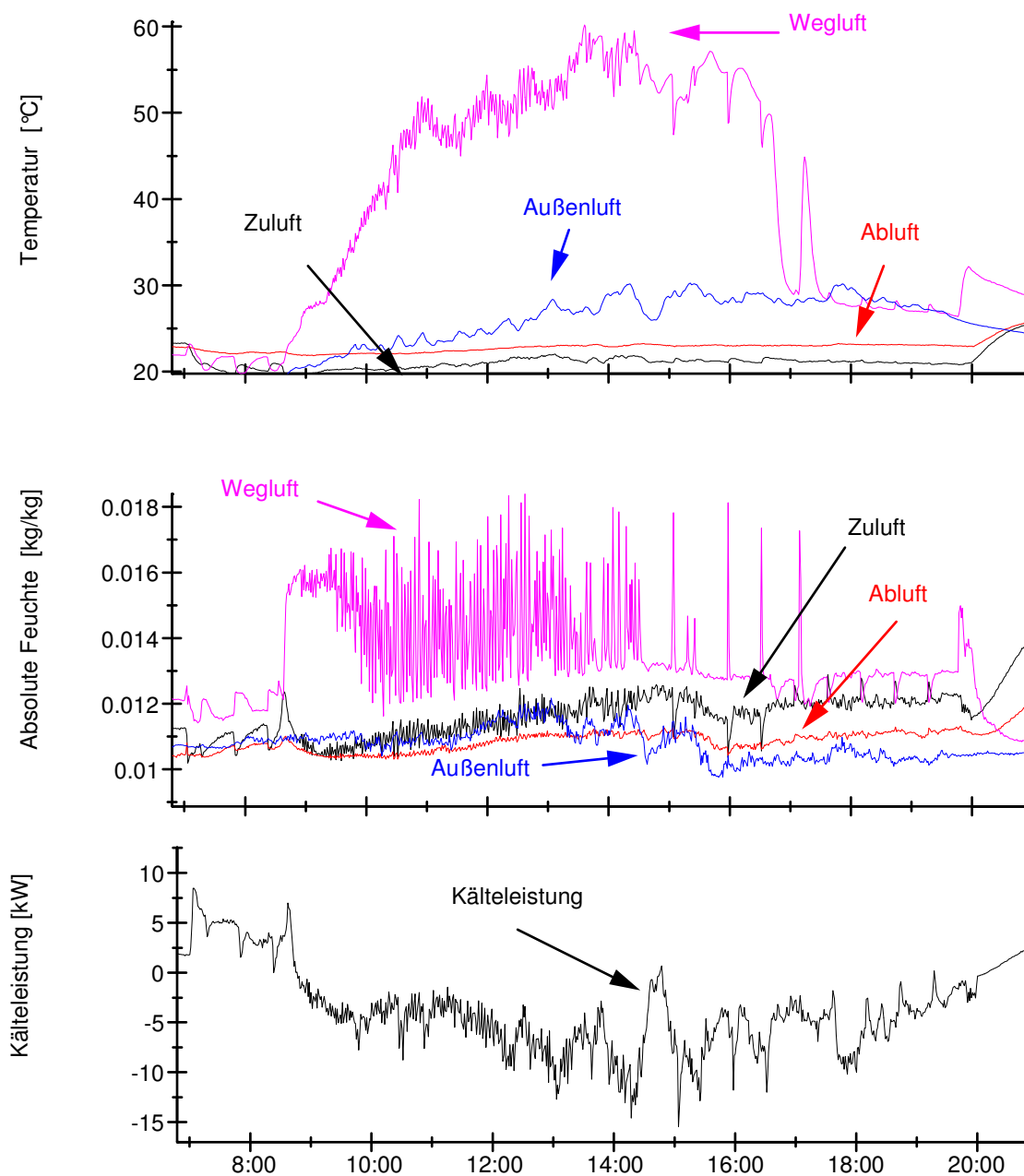


Abbildung 27: Verhalten der DEC-Anlage am 14.08.2007

Der stattfindende DEC-Betrieb lässt sich zum einen an der Weglufttemperatur von bis zu 60°C (oberste Grafik) und zum anderen an den nicht mehr wie am 17.07.2007 vorhandenen Spitzenausschlägen im 30 Minutenabstand in Temperatur und Feuchte der Wegluft erkennen. Befindet sich die Anlage im DEC-Betrieb, wird der SPR mit einer Drehzahl von 20 Umdrehungen pro Stunde kontinuierlich bewegt, die Schutzfunktion mit dem damit verbundenen Takten fällt weg. Außerdem werden Zu- und Abluftbefeuchter sowie der Regenerationsluftherhitzer mit voller Leistung betrieben. Damit arbeiten der DEC-Prozess und die gesamte Kühlanlage zwischen 9:00 und 15:00 Uhr mit maximaler Leistung. Dennoch liegt die erzielte Anlagen-, d.h. Kälteleistung, tendenziell unter dem Niveau vom 17.07.2007, einem Tag an dem wie beschrieben kein DEC-Prozess stattfand.

Zur Analyse des an diesem Tag realisierten Prozesses werden die auftretenden Zustandsänderungen hergeleitet und im h-x-Diagramm aufgetragen (Abbildung 28):

- Die Abluft wird vom Zustand 11 g/kg absoluter Feuchte und 22,5°C (Messwert Abluft) durch Befeuchtung durch den Abluftbefeuchter bis nahe des Taupunkts adiabatisch auf 18°C gekühlt (1-2).
- Dadurch erhält die Luft einen absoluten Feuchtegehalt von 13 g/kg (2).
- Nach Erwärmung durch Wärmerückgewinnung und Regenerationsluftherhitzung entspricht dies einer relativen Feuchte von 12% (2-4).
- Dadurch werden der Außenluft mit dem Sorptionsrotor 1,6 g/kg Wasser entzogen (4-5 bzw. 6-7). Im Idealfall fällt dadurch die absolute Feuchte der Außenluft von 11,6 g/kg (Messwert Außenluft) auf 10 g/kg, wodurch sich diese auf etwa 33°C erwärmt
- Unter Berücksichtigung von Verlusten im Wärmerückgewinnungsrotor lässt sich die Außenluft auf minimal 20,5°C kühlen (7-8).
- Bei einer Befeuchtung bis 75% kühlt sich die Luft im Zuluftkanal auf 18°C ab (8-9, Messwert Zuluft).

Da sich keine Messstellen der *Fachhochschule Ingolstadt* innerhalb der Anlage befinden, wurden bei der Skizzierung des Prozesses folgende Annahmen getroffen:

- Isenthalpe Befeuchtung bis nahe des Taupunkts mit dem Abluftbefeuchter.
- Isenthalpe Befeuchtung im Zuluftbefeuchter.
- Isenthalpe Be- und Entfeuchtung mittels des Sorptionsrotors.
- Wärmerückgewinnungsverluste im Wärmerückgewinnungsrotor von 25%, unter Zugrundelegung von Herstellerangaben.

Der spezifische Feuchteentzug im Zuluftkanal durch den SPR wurde genauso groß angenommen, wie der spezifische Feuchtegewinn im Abluftkanal. Da der Volumenstrom im Abluftkanal um ca. 12,5% niedriger ist als im Zuluftkanal, ist der Feuchteentzug im Zuluft-

kanal um ca. 12,5% zu hoch angesetzt. Für eine Abschätzung erscheint die damit erreichte Genauigkeit aber als ausreichend.

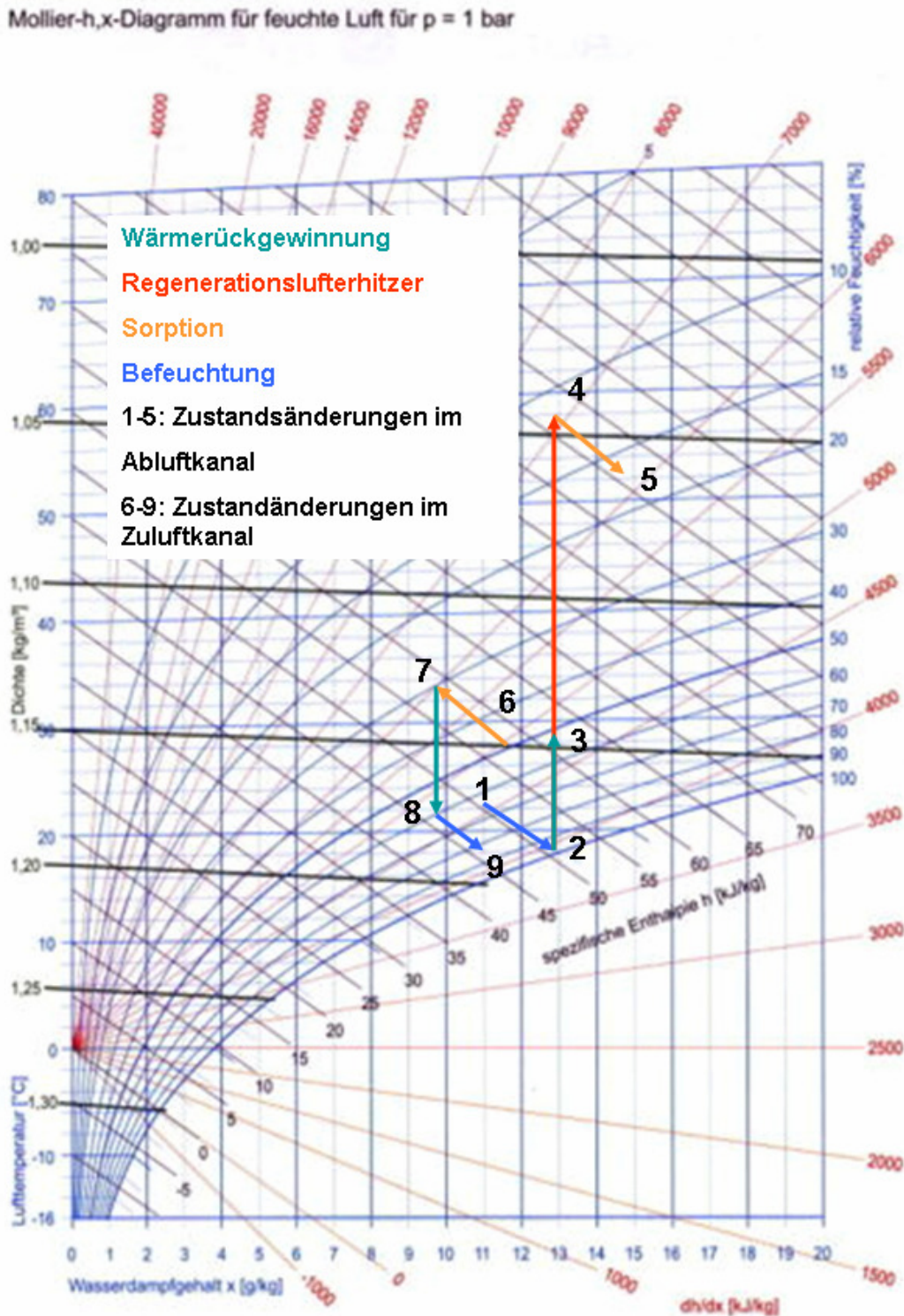


Abbildung 28: Verhalten der DEC-Anlage am 14.08.2007 (14:00Uhr) im h-x-Diagramm

Die Annahmen, die zur Abschätzung des Zustands der Luft nach dem Wärmerückgewinnungsrotor (WRG) dienen, sind durch Untersuchung der Zustände der Wegluft bei stehen-



dem SPR und inaktivem RGLH bei gleichzeitigem Betrieb des Abluftbefeuchters zusätzlich gestützt.

Die Temperatur der Luft nach dem RGLH ist im Realfall weit höher als in der Abschätzung, da die Entfeuchtung mit dem SPR aufgrund von Wärmeübertragungsverlusten weit von einem isenthalpen Vorgang abweicht. Da aber keine gravierende Feuchteänderung im WRG zu erwarten ist, wirkt sich dies nicht auf die mit dem SPR übertragene absolute Feuchte aus.

Im Zuluftkanal ergibt sich mit dieser Abschätzung für den berechneten Idealfall eine spezifische Enthalpiedifferenz von ca. 9 kJ/kg, was bei einem Volumenstrom von 4.800 m<sup>3</sup>/h einer Kälteleistung von knapp 15 kW entspricht. Da dieser Wert nur wenig über dem gemessenen Wert von 12 kW liegt und bei der Berechnung keine Verluste durch Wärmeübertragung im SPR berücksichtigt wurden, erscheint der Verlauf im h-x-Diagramm als sehr realistisch [Tri08a].

Der skizzierte Prozessverlauf im h-x-Diagramm deutet augenscheinlich auf eine nicht ausreichende Desorptions- und somit auch Sorptionsleistung als Ursache für die unerwartet niedrige Kälteleistung hin. Aufgrund der aus mangelhafter Entfeuchtung resultierenden hohen absoluten Abluftfeuchte weist diese eine hohe Enthalpie auf, es kann durch Befeuchtung bis zum Taupunkt die Temperatur nur um einen kleinen Betrag von 4,5°C verringert werden. Dadurch verschlechtert sich die Kühlung der Luft mit dem WRG. Bei unzureichender Entfeuchtung der Außenluft erwärmt sich diese außerdem weniger stark, was wiederum zu einer schlechteren Wärmerückgewinnung und somit niedrigeren Kälteleistung führt.

### 7.3 Entfeuchtungsleistung des Sorptionsrotors

Bei näherem Betrachten lassen sich auch im DEC-Betrieb Schwankungen in der Wegluftfeuchte erkennen (Abbildung 27, zweite Grafik von oben). Allerdings treten diese zunächst in sehr engen Zeitabständen von etwa 4 Minuten und erst bei Beendigung des DEC-Betriebs ab 15:00 Uhr im Abstand von 30 Minuten (Schutzfunktion) auf. Aus diesem Grund wurde das Entfeuchtungsverhalten des Sorptionsrotors näher analysiert [Tri08a].

Abbildung 29 zeigt dafür die Zustände im Bereich der Desorption im Detail. Dabei kann von den gleichmäßigen Messwerten am Regenerationsluftherhitzer auch auf einen gleichmäßigen Zustand der Luft beim Eintritt in den Sorptionsrotor geschlossen werden. Auch der Abluftbefeuchter arbeitet im betrachteten Zeitraum kontinuierlich. Trotzdem zeigt der Messwert der Wegluftfeuchte (oberstes Diagramm) starke Schwankungen im Bereich von etwa 4 bis 5 g/kg. Als Erklärung für die Schwankungen kommt nur eine diskontinuierliche Feuchteübertragung aus dem Zuluftkanal mittels des Sorptionsrotors in Betracht. Dadurch sinkt die durchschnittliche Entfeuchtungsleistung stark ab. Die durchschnittliche Feuchteübertragung mit deutlich unter 2 g/kg absoluter Feuchte der Luft erreicht bei den vorhanden

Bedingungen bei weitem nicht den erwarteten Wert von bis zu 5 g/kg gemäß Herstellerspezifikation.

Bei Betrachtung des Verlaufs der absoluten Feuchte der Wegluft in Abbildung 29 ist aber erkennbar, dass die maximalen Ausschläge durchaus in etwa dem erwarteten Wert von 5 g/kg Wasserentzug entsprechen. Des Weiteren legt die Tatsache, dass die Abstände in exakt gleichen Zeitintervallen von 4 Minuten auftreten die Vermutung auf einen Zusammenhang mit der Stellung des Rotors nahe. Die Drehzahl des Rotors von 20 U/h lässt zwar zunächst auf einen Intervallabstand von 2 Minuten schließen, jedoch können Effekte nicht ausgeschlossen werden, die nur bei jeder zweiten Umdrehung auftreten, beispielsweise bedingt durch eine stärkere Sättigung des Sorptionsmittels. Des Weiteren können bei der bestehenden Abtastfrequenz von einer Minute Vorgänge, die in einem Abstand von ca. 2 Minuten auftreten, teilweise nicht deutlich erkannt werden.

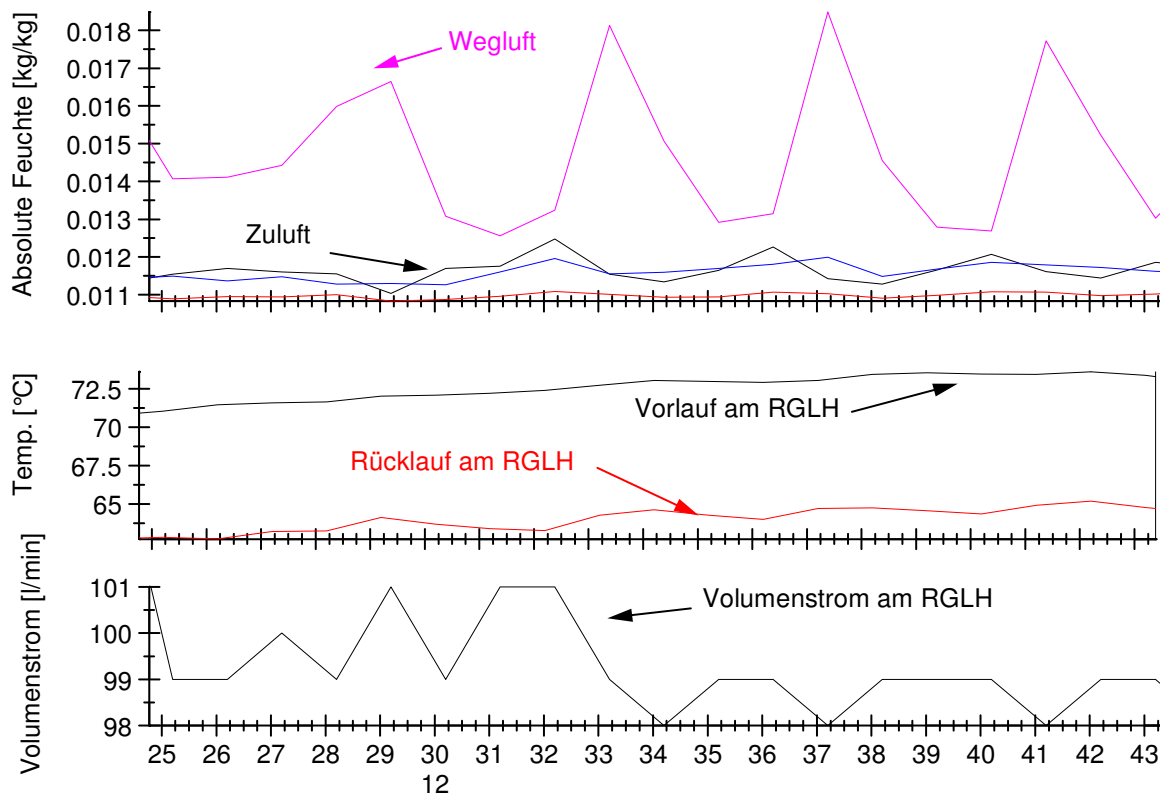


Abbildung 29: Desorption im Detail am 14.08.2007 (RGLH: Regenerationsluftheritzer)

Die Analyse des Stundenmittelwertes der Feuchtebilanz im Abluftkanal zeigt außerdem einen Wert von ca. 3 g/kg Feuchtezunahme zwischen Ab- und Wegluft. Davon entfallen ca. 2 g/kg auf die Befeuchtereinrichtung. Der auf diesem Weg ermittelte, verbleibende Betrag von 1 g/kg entspricht ebenfalls keineswegs dem erwarteten Wert von bis zu 5 g/kg Feuchteübertragung durch den Sorptionsrotor, obwohl zum Messzeitpunkt die erforderliche Desorptionstemperatur eingehalten wird.

Der für den DEC-Betrieb maßgebliche Sorptionsrotor scheint somit nicht mit der erwarteten Entfeuchtungsleistung zu arbeiten. Die Messwerte deuten dabei auf eine –zumindest

einseitige– Beschädigung hin, die zur verminderten Anlagenleistung führt. Dies wird unterstützt durch die Tatsache, dass die erreichte Entfeuchtungsleistung über einen längeren Zeitraum in etwa auf einem Wert liegt, der weit weniger als der Hälfte der Herstellerangabe entspricht. Die gemessenen Spitzenwerte entsprechen aber wiederum durchaus der erwarteten Entfeuchtungsleistung, wobei eine diskontinuierliche Bewegung des Rades durch Beobachtungen an der Anlage ausgeschlossen werden kann. Dahingehend wurde zunächst eine einseitige Verschmutzung als mögliche Ursache in Betracht gezogen und der Sorptionsrotor mit einer Injektordruckluftdüse gereinigt. Die Reinigung zeigte hinsichtlich des Entfeuchtungsverhaltens bei entsprechenden Messungen an der Anlage keinerlei Wirkung. Ein Verschließen von Poren während des Betriebs der Anlage mit nicht enthärtetem Wasser wurde vom Hersteller des Sorptionsrotors ausgeschlossen.

Damit kommen noch folgende Ursachen für die nicht zufriedenstellende Entfeuchtungsleistung in Betracht: In der porösen Zellulosestruktur des Sorptionsrotors ist eine Salzlösung gebunden, an der die Feuchtigkeit absorbiert wird. Eine mögliche Fehlerursache kann dabei eine Umverteilung der Salzlösung innerhalb des Rotors sein. Dies führt dazu, dass nur noch ein Teil des Rotors Feuchtigkeit binden kann und somit abhängig von der Stellung des Rotors in der Anlage unterschiedliche Entfeuchtungsleistungen auftreten. Als mögliche Ursache dafür kommen wiederum eine einseitige Be- bzw. Entladung oder eine vollständige Austrocknung bzw. Übersättigung des Rotors in Frage. Bei einer vollständigen Austrocknung kristallisiert Salz aus der Lithiumchlorid-Lösung aus und es können in der Anlage aus dem SPR ausgeblasene Salzkristalle gefunden werden. Bei einer Übersättigung tritt die Salzlösung in flüssiger Form aus der Zellulosestruktur aus, gelangt damit in den unteren Bereich des Rotors oder tropft vollständig aus diesem aus. Salzkristalle im Bereich des Sorptionsrotors deuten darauf hin, dass tatsächlich ein Teil der Salzlösung ausgetreten ist. Verfärbungen an der Zellulosematrix des Rotors sind deutlich erkennbar.

Es muss folglich davon ausgegangen werden, dass der Sorptionsrotor während der Inbetriebnahmephase oder während des Betriebs unter ungünstigen Betriebszuständen übersättigt und damit beschädigt wurde. In Frage kommt dafür beispielsweise ein regelungstechnisches oder mechanisches Versagen der oben beschriebenen Schutzfunktion des Rotors. Der Sorptionsrotor wurde daher vor Beginn der nächsten Kühlperiode ausgetauscht, da ein erneutes Eintränken des Rotors einen zu hohen zeitlichen und organisatorischen Aufwand verursacht hätte.

## **7.4 Flachkollektoren zum Antrieb solarer Klimatisierung**

Im vorliegenden System wird die erzeugte solare Wärme nicht nur zur solaren Kühlung, sondern auch zur Heizungsunterstützung (teilweise über den „Umweg“ der Beladung des saisonalen Erdspeichers) sowie zur Brauchwassererwärmung genutzt. Damit können auch höhere Erträge und höhere Wirkungsgrade erwartet werden. Die Gebäudegeometrie bedingt zudem eine Aufteilung der thermischen Solaranlage auf zwei Felder, was die Nut-

zung von Kollektoren zweier verschiedener Hersteller ermöglicht, und zwar in nennenswerten Stückzahlen (50 und 90 Stk.), so dass sich repräsentative Praxisergebnisse gegenüber den üblichen Prüfstandsversuchen ergeben. Darüber hinaus gilt es, die Leistungsfähigkeit von Flachkollektoren im Hinblick auf sorptionsgestützte, solare Klimatisierung zu klären, bei der ein Mindest-Temperaturniveau von 60...70 °C erforderlich ist. Dabei verfügt jedes Kollektorfeld über seine eigene Steuerung, allerdings bei gleicher Regelungsstrategie, d.h. der VolumenstromEinstellung zur Sicherstellung eines Temperaturniveaus von mindestens 70 °C.

Bei der Bewertung der Ergebnisse ist zu beachten, dass beide Kollektorfelder aus betrieblichen Gründen nach einer Winterpause erst im April 2006 wieder in Betrieb genommen wurden. Zudem zeigten sich diverse Unzulänglichkeiten sowohl in der Steuerung als auch in der Hydraulik der Dach-Energiezentrale, in der die Kollektorfelder hydraulisch mit der Wärmepumpenanlage und den Wärmespeichern zusammengeführt sind. Die Erträge der beiden Kollektoren sind in Abbildung 30 aufgetragen.

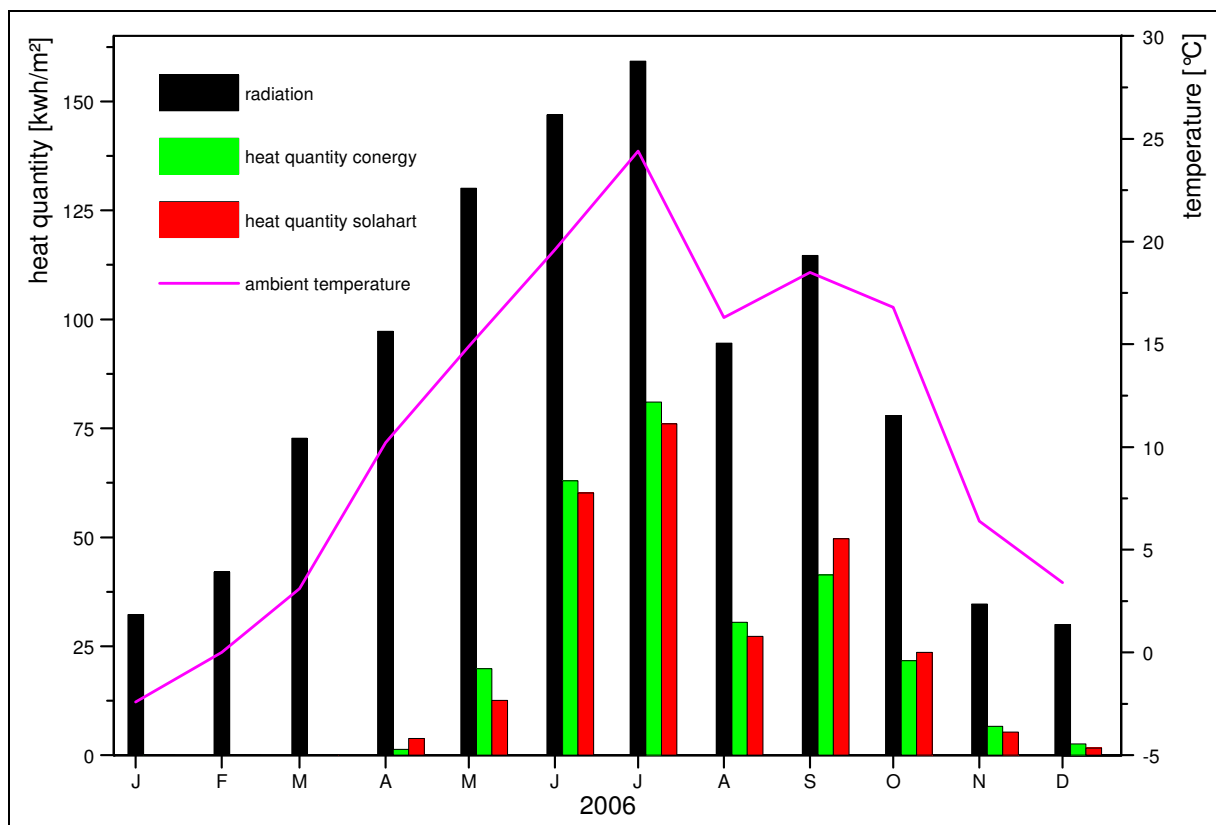


Abbildung 30: Monatlich kumulierte Erträge – bezogen auf die Bruttofläche – der Conergy- (grüne Balken) und Solahart-Kollektoren (rote Balken) sowie Monatsdurchschnittstemperatur und kumulierte Solarstrahlung

Obwohl laut Datenblatt die Leistungsfähigkeit des *Conergy*-Kollektors aufgrund seines konstruktiven Aufbaus – er verfügt zum Beispiel über eine Antireflex-Glasabdeckung – über der des *Solahart*-Kollektors liegt, zeigt sich lediglich ein vernachlässigbar kleiner Unterschied im Solarertrag (innerhalb der Messgenauigkeit).

Wie in so vielen anderen Fällen, können Hochleistungskollektoren ihre Leistungsfähigkeit nur in Verbindung mit einem optimalen System einschließlich der adäquaten Steuerung ausspielen. In dieser Hinsicht haben beide Kollektoren mit optimierter Steuerung noch unausgeschöpftes Potenzial. Trotzdem – obgleich in 2006 nur von April bis Dezember in Betrieb – haben beide Kollektorfelder in diesem Zeitraum mit einem Ertrag von etwa 265 kWh/m<sup>2</sup>a einen für solare Klimatisierung beachtenswerten Wert erbracht. Dies ist auch auf die Nutzung der solaren Wärme für Heizungsunterstützung und Brauchwasserbereitung zurückzuführen, einem Systemansatz, der von den üblichen reinen Kühlprojekten mit solarer Versorgung deutlich abweicht.

Ein typischer Juni-Messtag ist in Abbildung 31 dargestellt. Dieser Tag ist besonders gut für einen Vergleich der beiden Kollektorfelder geeignet, da sie beide an diesem Tag den gleichen Ertrag – bezogen auf die Aperturfläche – erbringen.

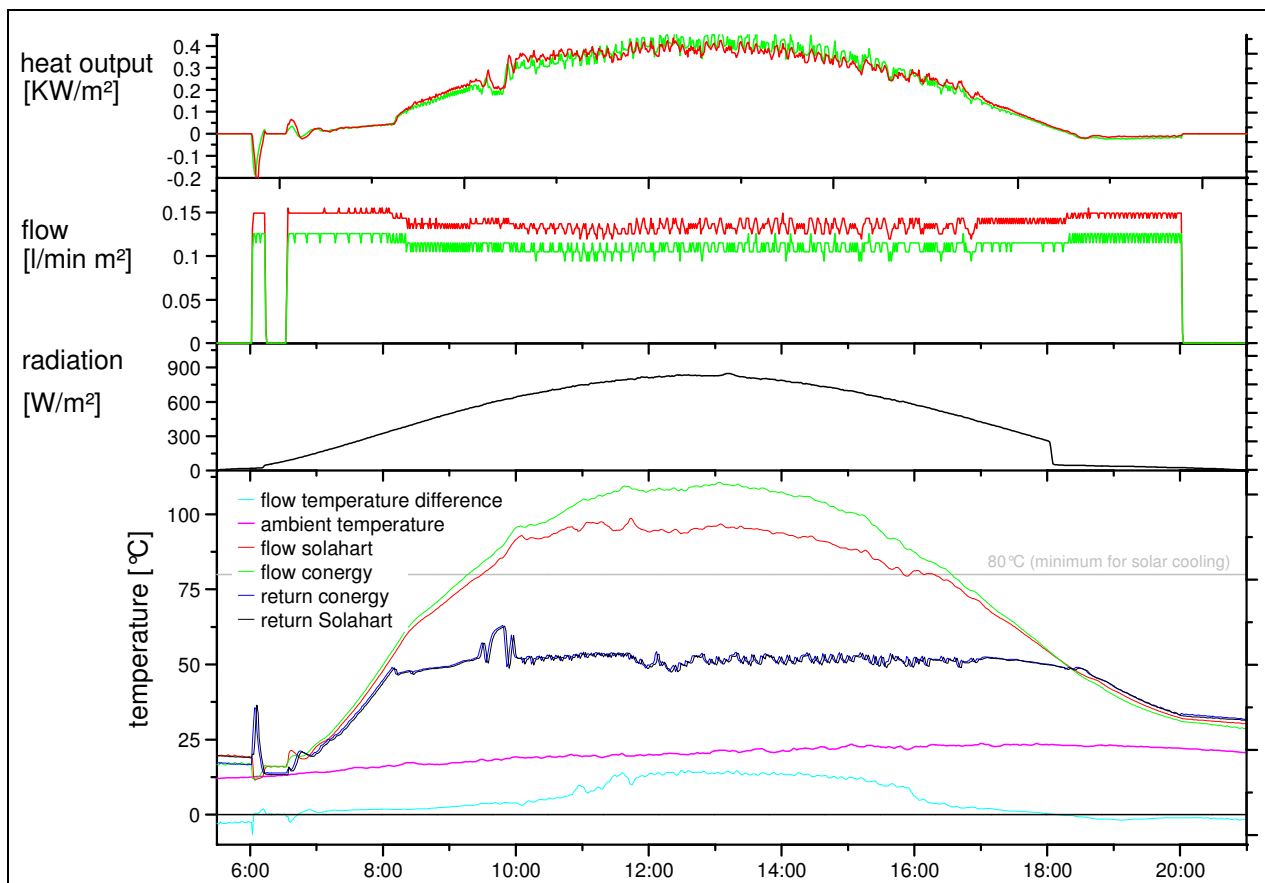


Abbildung 31: Klimatische Bedingungen sowie Verhalten der beiden Kollektorfelder am 11.06.2006  
(Conergy: grüne Kurven, Solahart: rote Kurven)

Bei einer Durchschnittstemperatur von 18,3 °C und einer Höchsttemperatur von 23,7 °C bei einer kumulierten Einstrahlung von 6,75 kWh/m<sup>2</sup>d bei einer maximalen Einstrahlung von etwa 850 W/m<sup>2</sup> erreichen die Kollektorfelder einen Ertrag von 2,83 kWh/m<sup>2</sup>d. Der Volumenstrom des Solahart-Feldes liegt etwa 15 % über dem des Conergy-Feldes, welches bis zu 13 °C höhere Temperaturen erreicht.

Besonders erfreulich erscheint dabei die Tatsache, dass beide Kollektorfelder – auch bei moderater Sonneneinstrahlung von unter  $800 \text{ W/m}^2$  – im Zeitraum von etwa 10:00...16:00 das geforderte Temperaturniveau erreichten und die zum Betrieb der DEC-Anlage nötige Regenerationswärme liefern konnten [Hal07a].

## 8 Fazit und Empfehlungen

Bei der solaren DEC-Klimatisierung handelt es sich zweifelsohne um eine Erfolg versprechende und zukunftssträchtige Technologie vor allem für die Anwendung in größeren gewerblichen Bauten. Von einer ausgereiften Technologie in Planung, Inbetriebnahme und Praxisbetrieb eines modernen Büro- und Produktionsgebäudes kann nach den beschriebenen Erfahrungen aber weder auf Komponenten- noch auf Systemebene ausgegangen werden. Die dafür nötige Planungs-, Ausführungs- und Betriebssicherheit scheint ebenfalls noch nicht erreicht. Das untersuchte solare DEC-System zeigt noch keinen, hinsichtlich Energieeffizienz optimierten Betrieb, insbesondere vor dem Hintergrund des Zusammenspiels mit weiteren Kühleinrichtungen und der multivalenten Nutzung der Solarkollektoren für Kühlung, Heizung und Warmwasser (wie es beides der typische Einsatzfall für derartige Gebäude sein wird). Auch im Zusammenspiel des Solarsystems mit der DEC-Anlage kann noch Optimierungspotenzial realisiert werden, insbesondere angesichts der Tatsache, dass die solare Wärmeleistung nicht zu beliebigen Zeitpunkten auf Anforderung verfügbar ist. Die solarbetriebenen DEC-Anlagen ermöglichen (u. a. aufgrund der Systemkomplexität) noch keine Inbetriebnahme, die vergleichbar ist mit konventionellen Anlagen. Dies wird sehr deutlich durch die Tatsache, dass die aufgetretenen Probleme in beiden Betriebsjahren ohne umfangreiche wissenschaftliche Begleitung nicht erkannt worden wären und nicht ohne weiteres hätten behoben werden können. Dies trifft ebenso auf den praktischen Betrieb der solarbetriebenen DEC-Anlagen zu, in denen bisher keine entsprechenden Selbstüberwachungskonzepte realisiert wurden.

Für eine erfolgreiche, weitere Verbreitung der Solar-DEC-Systeme erscheinen zunächst folgende Punkte als erforderlich:

- Verbesserung und sinnvolle Standardisierung des Planungsprozesses, der Ausführung und der Inbetriebnahme solch komplexer Anlagen.
- Technologische Verbesserungen auf Komponenten- aber insbesondere auf Systemebene unter Berücksichtigung der Tatsache, dass ein Solar-DEC-System wiederum nur einen Teil des Gebäudetechnik-Systems darstellt und in dieses optimal integriert werden muss.
- Erhöhung der Zuverlässigkeit im Betrieb, insbesondere hinsichtlich Kälteleistung und Energieeffizienz, beispielsweise durch Umsetzung entsprechender Selbstüberwachungskonzepte, die der komplexen (System-)Technik Rechnung tragen (Solarsystem  $\Leftrightarrow$  DEC-System  $\Leftrightarrow$  Gebäude-HVAC)

## Quellenangaben

- [Car07] Carrillo Andres, A.; Cejudo Lopez, J.M.; Dominguez Munoz, F.: *Modelling of a Desiccant Air Handling Unit Powered by a Solar System: Comparison with a Conventional VAV System*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona (E), 18.-19.10.2007
- [Cla08] Clauß, V.; Tamm, C.: *Betriebserfahrungen und systemtechnische Optimierung einer 10kW Absorptionskältemaschine*, 5. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 14.-15. April 2008, Veröffentlichungen der Hochschule für Technik Stuttgart, Band 89 (2008), Stuttgart
- [Eic08] Eicker, U.: *Technologien und Perspektiven solarthermischer Kühlung*, 5. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 14.-15. April 2008, Veröffentlichungen der Hochschule für Technik Stuttgart, Band 89 (2008), Stuttgart
- [Eik02a] Eicker, U.; Huber, M.; Schürger, U.; Schumacher, J.; Trinkle, A.: *Komponenten- und Anlagenverhalten solar betriebener sorptionsgestützter Klimaanlage*, in: KI – Luft- und Kältetechnik, 11 (27), 2002
- [Eik02b] Eicker, U.: *Entwicklungstendenzen solarthermischer Kühlverfahren*, in: Fachhochschule Stuttgart (Hrsg.): Tagungsband 2. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Veröffentlichung der Fachhochschule Stuttgart, Band 56, 2002
- [Eik06] Eicker, U.; Schürger, U.; Schumacher, J.: *Betriebserfahrungen und Untersuchungen von DEC-Anlagen: Regelungsoptimierung und Energieanalysen*, in: Fachhochschule Stuttgart (Hrsg.): Tagungsband 4. Symposium Solares Kühlen in der Praxis. Veröffentlichung der Fachhochschule Stuttgart, Band 74, 2006
- [Erp99] Erpenbeck, T.: *Sorptionsgestützte solare Klimatisierung - Experimentelle und theoretische Analyse von Potential und Systemverhalten*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1999
- [EVE07] Energieverbrauch Weltweit: [http://www.energieverbraucher.de/ew\\_images/hausgeraete/08\\_Lastspitze-web.jpg](http://www.energieverbraucher.de/ew_images/hausgeraete/08_Lastspitze-web.jpg), (letzter Zugriff: September 2007).
- [Fra00] Franzke, U.; Stangl, M.: *Optimierung der Komponenten des DEC-Klimasystems*, Abschlußbericht, ILK Dresden, 2000
- [Fra05] Franzke, U.; Seifer, C.: *Solar Assisted Air Conditioning of Buildings*, Abschlußbericht, ILK Dresden, 2005
- [Hal07a] Haller, A.; Trinkl, C.; Zörner, W.; Hanby, V.: *Analyse regenerativer Energietechnik in einem Multifunktionsgebäude*, 17. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 09.-11.05.2007
- [Hal07b] Haller, A.; Trinkl, C.; Wittmann, R.; Zörner, W.; Hanby, V.: *Solar Desiccant Air-Conditioning: Practical Experience Regarding Operation and Performance*, 2<sup>nd</sup> Int. Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona (E), 18.–19.10.2007
- [Hen04] Henning H.-M. (Ed.): *Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings*, Springer, New York (USA), 2004
-

- 
- [Hen08] Henning H.-M. (Ed.): *Solare Kühlung und Klimatisierung – Stand und zukünftige Perspektiven*, 18. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 23.-25. April 2008
- [Hin02] Hindenburg, C.: *Solar autarke sorptionsgestützte Klimaanlage mit Solarluftkollektoren - Betriebserfahrungen des ersten Jahres*, Veröffentlichungen des Fraunhofer ISE, Freiburg, 2002
- [Jak08] Jakob U.: *Cooler Klima dank sengender Sonne*, in: Sonne Wind & Wärme, 02/2008
- [KLI07a] Klingenburg: *Seco Sorptions-/ Enthalpieregeneratoren Installation, Inbetriebnahme und Wartung*, www.klingenburg.de, SEC\_T01D.pdf
- [KLI07b] Klingenburg: *Regenerative Wärmerückgewinnung mit Rotationswärmetauschern*, www.klingenburg.de, RWT\_T01D.pdf
- [KLI07c] Klingenburg: <http://www.klingenburg.de/de/produkte/befeuchter-prinzip.html>, (letzter Zugriff: September 2007)
- [Koh07] Kohlenbach, P.; Bongs, C.; Ward, J.; White, S.: *Performance Modelling of a Desiccant Cooling System*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona (E), 18.-19.10.2007
- [Mök02] Möckel, R.: *Numerische und experimentelle Untersuchung an einer Sorptionsgestützten Klimaanlage*, Dissertation, Technischen Universität Hamburg-Harburg, 2002
- [Oli07] Oliveti, G.; Arcuri, N.; Bruno, R.: *Energy Performance of a Plant using an Adsorption Desiccant Wheel and a Field of Solar Collectors for the Winter and Summer Air-Conditioning of a Building*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona (E), 18.-19.10.2007
- [Pod00] Podesser, E.; Stiglbrunner, R.: *Errichtung und Betrieb einer Desiccant-Klimaanlage zur Technologie-Demonstration im Forschungshaus des Ökopark Hartberg*, Bericht IEF-B-09/00, Joanneum Research, Institut für Energieforschung, Graz (A), 2000
- [Pod02] Podesser, E.: *Kühlen mit Biomasse und Sonne*, in: Erneuerbare Energie, No. 2, 2002
- [Rat00] Rathey, A.: *Entwicklung optimierter Regelverfahren für Raumlufttechnische Anlagen mit Hilfe des Simulationssystems TRNSYS*, Dissertation, Technischen Universität Dresden, 2000
- [Rui07] Ruivo, C.R.; Costa, J.J.; Figueiredo, A.R.: *Modelling the Behaviour of Desiccant Wheels*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona (E), 18.-19.10.2007
- [Saf08] Safarik, M.: *Solare Kühlprojekte mit Wasser-LiBr Absorptionskältetechnik*, 5. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, 14.-15. April 2008, Veröffentlichungen der Hochschule für Technik Stuttgart, Band 89 (2008), Stuttgart
- [Sch03] Schürger, U.; Eicker, U.; Huber, M.: *Teststand für Sorptionsrotoren – Erkenntnisse und Auswertungen*, 13. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2003
- [Spa07] Sparber, W.: *Overview on worldwide installed Solar Cooling Systems*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona (E), 18.-19.10.2007



- [Sun05] SunSystems: Hydraulikplan, *IFG Service-Center-Halle-J*, Plannummer 03d003\_HS03-e, Stand 07.12.2005
- [Tri08a] Trinkl, C.; Wittmann, R.; Zörner, W.: *Betriebserfahrungen und Optimierungen der solaren sorptionsgestützten Kühlung im Güterverkehrszentrum Ingolstadt*, 5. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Hochschule für Technik Stuttgart, 14.-15.4.2008
- [Tri08b] Trinkl, C.; Wittmann, R.; Zörner, W.: *Zur Problematik der solar-unterstützten DEC-Klimatisierung in der Praxis*, 18. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein (D), 23.-25.04.2008
- [Vit07] Vitte, Th.; Chatagnon, N; Brau, J.: *Hybrid Control Strategy for Solar Desiccant Cooling System*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Solar Air-Conditioning, Tarragona (E), 18.-19.10.2007
- [VOS05] Voss K. u.a. (Hrsg.): *Bürogebäude mit Zukunft – Konzepte, Analysen, Erfahrungen*, TÜV-Verlag, Köln, 2005
- [WAG05] Wagner A.: *Energieeffizienz in Bürogebäuden – die KfW-Gebäude in Frankfurt am Main*, Europäischer Kongress „Energie einsparen im Gebäudebestand – mehr Wert entwickeln!“ auf der BAU 2005, München, 17./18.01.2005
- [WBU07] Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung: [http://www.wbgu.de/Images/jg2003\\_abb1.gif](http://www.wbgu.de/Images/jg2003_abb1.gif), (letzter Zugriff: September 2007).
- [WOL07a] WOLF Anlagen-Technik GmbH & Co. KG (Hrsg.): *DEC-Anlage Typ DEC 101*, Datenblatt, pbb Produktbeschreibung, September 2007.
- [Zör05] Zörner W.: *Wärmepumpen-Anlagen im industriellen Einsatz*, 3. Forum Wärmepumpe, Berlin, 13./14.10.2005

### Quellenangaben für Tabelle 3 auf Seite 19

- [1] Website <http://www.sorptionsgestuetzte-klimatisierung.de>, (letzter Zugriff: 03.11.2004)
- [2] N.N.: *Cooled by the Sun - Solar project blows hot and cold at American university*, ArmeniaWeek website <http://www.armeniaweek.com>, (letzter Zugriff: 03.11.2004)
- [3] Henning, H.: *Solare Gebäudeklimatisierung*, website <http://www.eduvinet.de>, (letzter Zugriff: 03.11.2004)
- [4] Guler, M.: *Sorptionsgestützte Klimatisierung (DEC-Technik): Systemtechnik und Wirtschaftlichkeit mit Abwärme-, Fernwärme- und Solarnutzung anhand ausgeführter Anlagen*, 1. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Fachhochschule Stuttgart (D), 2001
- [5] Website GRAMMER SOLAR + BAU GmbH: <http://www.grammer-solar-bau.de>, (letzter Zugriff: 03.11.2004)
- [6] Berner, J.: *Mit Sonnenenergie kühlen Kopf bewahren* in: *Sonnenenergie* 4/2001
- [7] Website of the American University of Armenia <http://www.aua.am>, (letzter Zugriff: 03.11.2004)
- [8] Schwärzler, C.: *Solare DEC-Pilotklimaanlage des ILK*, Fachinstitut Gebäude-Klima e. V., Bietigheim-Bissingen (D), 1998

- 
- [9] Schneider, D.; Huber, M.: *Planung und Ausführung einer offenen sorptionsgestützten Klimaanlage mit solaren Luftkollektoren für eine Fabrikhalle in Althengstett*, 1. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Fachhochschule Stuttgart, 2001
- [10] Podesser, E.: *Kühlen mit Biomasse und Sonne*, in: Erneuerbare Energie 2/2002
- [11] Podesser, E.; Stiglbrunner, R.: *Errichtung und Betrieb einer Desiccant-Klimaanlage zur Technologie-Demonstration im Forschungshaus des Ökopark Hartberg*, Report IEF-B-09/00, Institut für Energieforschung, Graz (A), 2000
- [12] Wolkenhauer, H.: *Solarunterstützte Klimatisierung – Systemkomponenten, Regelungskonzepte, Beispielanlagen, Machbarkeitsanalyse*, BHKS-Almanach, 2002
- [13] Wolkenhauer, H. (u. a.): *Energieeinsparung durch Einbeziehung solarunterstützter Klimatisierung in zukünftige Planungsprozesse*, Fachinstitut Gebäude-Klima e.V., Bietigheim-Bissingen (D), 2002
- [14] Website of Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme <http://www.ise.fhg.de>, (letzter Zugriff: 03.11.2004)
- [15] Huber, M.: *Energie- und Wirtschaftlichkeitsanalyse einer industriellen sorptionsgestützten Klimaanlage mit solaren Luftkollektoren*, 2. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Fachhochschule Stuttgart, 2002
- [16] Website of Elektrizitätswerk Minden-Ravensberg GmbH <http://www.emr.de> (letzter Zugriff: 03.11.2004)
- [17] Erpenbeck, T.: *Sorptionsgestützte solare Klimatisierung - Experimentelle und theoretische Analyse von Potential und Systemverhalten*, PhD-Thesis, Universität Karlsruhe (D), 1999
- [18] Heinrich, G.; Franzke, U. (ed.): *Sorptionsgestützte Klimatisierung – Entfeuchtung und DEC in der Klima-Kälte-Technik*, C. F. Müller Verlag, Heidelberg (D), 1997
- [19] Hindenburg, C.: *Anlagenplanung und Betrieb einer offenen sorptionsgestützten Klimatisierungsanlage bei der IHK Südlicher Oberrhein in Freiburg*, 2. Symposium Solares Kühlen in der Praxis, Fachhochschule Stuttgart, 2002
- [20] Hindenburg, C. et al: *SSGKTEST - Ein neuer Teststand für solare sorptionsgestützte Klimatisierungssysteme*, 11. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein (D), 2001
- [21] Henning, H.; Erpenbeck, T.; Hindenburg, C.: *Sorptionsgestützte Klimatisierung mit Solarenergie - Betriebserfahrungen und Systemauslegung*, Workshop Solar Sorptive Cooling, Mühlheim a.d. Ruhr (D), 1997
- [22] Henning, H.; Franzke, U.; Lamp, P.: *Solare Gebäudeklimatisierung - Ziele, Inhalte und erste Ergebnisse der neuen Task 25 der Internationalen Energie-Agentur (IEA)*, 10. Symposium Thermische Solarenergie, Staffelstein (D), 2000
- [23] Schürger, U.; Huber, M.; Eicker, U.: *Teststand für Sorptionsregeneratoren an der Fachhochschule Stuttgart - Hochschule für Technik*, Research Report 2001, Fachhochschule Stuttgart, 2002