



Abschlussbericht zum Projekt Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz 2005-09

LiquiSorp

Pilotanlage zur sorptionsgestützten Klimatisierung mit flüssigen Sorbentien unter besonderer Berücksichtigung von Niedertemperaturwärme als Antriebsenergie

Auftraggeber

badenova AG & Co. KG
Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz
Tullastraße 61
79108 Freiburg

Auftragnehmer

Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE
Abteilung Thermische und Optische Systeme
Gruppe Solares Bauen
Heidenhofstraße 2
79110 Freiburg

Bearbeitung

Daniel Geßner
Dr. Jens Pfafferott
Christian Neumann
Carsten Hindenburg (SolCoolAirCon)

Projektlaufzeit: 01.06.2005 bis 31.12.2007.

Freiburg, 31. Januar 2008

Inhalt

1	Einleitung	3
2	Projekthinhalte / Projektverlauf	4
2.1	Arbeitspakete des Projekts	4
2.2	Aufgetretene Änderungen vom geplanten Projektinhalt/-verlauf	4
2.3	Projektverlauf	5
3	Wissenschaftliche Begleitung	6
3.1	Anlagenbeschreibung	6
3.2	Anlagen-Monitoring	7
3.3	Auswertung eines Betriebsjahres	10
3.4	Energieeffizienz der SGK-Anlage	14
3.5	Vergleich mit einer Referenzanlage	23
3.6	Ressourcenverbrauch in einem typischen Jahr	25
4	Betriebsbegleitende Optimierung	27
4.1	Versuche im Sommer 2006 zum Desorberbetrieb	27
4.2	Versuche im Sommer 2007 zum Sorptionsprozess	33
4.3	Fazit	38
5	Wirtschaftlichkeit	40
5.1	Variante 1 – 3	42
5.2	Variante 4 – 6	44
5.3	Variante 7 und 8	46
5.4	Fazit	48
6	Betriebserfahrungen und Empfehlungen	49
7	Ergebnisse und Ausblick	50
8	Literatur	52

Dieser Bericht umfasst 52 Seiten. Eine Veröffentlichung der Ergebnisse darf nicht unvollständig oder in sinnentstellendem Zusammenhang erfolgen.

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Abteilung Thermische Anlagen und Gebäudetechnik
Gruppe Solares Bauen
Telefon
Telefax
E-Mail

++49 761 4588-5129
++49 761 4588-9000
jens.pfafferott@ise.fraunhofer.de

Freiburg, 31. Januar 2008

Daniel Geßner

Dr. Jens Pfafferott

Sebastian Herkel

Wissenschaftlicher
Mitarbeiter
Solares Bauen

Projektleiter
Solares Bauen

Gruppenleiter
Solares Bauen

1 Einleitung

Das Projekt „LiquiSorp - Pilotanlage zur sorptionsgestützten Klimatisierung mit flüssigen Sorbentien unter besonderer Berücksichtigung von Niedertemperaturwärme als Antriebsenergie“ wurde durch den Innovationsfond Klima- und Wasserschutz der badenova AG & Co. KG (*badenova*) gefördert.

Das Fraunhofer ISE hat das Projekt koordiniert und die wissenschaftliche Begleitforschung geleistet. Projektpartner waren Menerga Apparatebau GmbH (*menerga*) als Hersteller der Klimaanlage, das Universitätsklinikum Freiburg (*Uniklinik*) als Betreiber der Klimaanlage. Beraten wurde das Fraunhofer ISE durch SolCoolAirCon - Consulting Services - Consulting for Energy Efficient Buildings - SolarThermal - SolarCooling - SolarAirConditioning (*SolCoolAirCon*).

Ziel des Projektes war einerseits der Aufbau und Betrieb einer sorptionsgestützten Klimatisierungsanlage (SGK) mit flüssigen Sorbentien und einem Nennvolumenstrom von ca. 10000 m³/h, wobei Niedertemperaturwärme als Antriebsenergie genutzt werden sollte.

Andererseits sollte die Technologie der SGK-Systeme mit flüssigen Sorbentien zur Marktreife entwickelt und optimiert werden.

Im Projektverlauf konnte die Uniklinik als Betreiber einer sorptionsgestützten Klimaanlage gewonnen werden. In Zusammenarbeit wurde eine SGK-Anlage in der Medizinischen Klinik mit einem Nennvolumenstrom von 12.500 m³/h realisiert. Die Wärmeverbraucher der Klimaanlage sind in das Fernwärmenetz der Uniklinik eingebunden. Die Anlage wurde am 10. Mai 2006 von *menerga* in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE und SolCoolAirCon in Betrieb genommen. Seither begleitet das Fraunhofer ISE die Anlage wissenschaftlich begleitet und überwacht intensiv die richtige Funktion.

Aufgrund der hohen Betriebsstunden, 24 Stunden pro Tag und 365 Tage im Jahr, konnten innerhalb der Projektlaufzeit viele relevante Messdaten aufgezeichnet und ausgewertet werden. Die Messdaten wurden mit einem für das Fraunhofer ISE speziell entwickelten Auswertesoftware auf Plausibilität geprüft, bevor sie zur Auswertung verwendet wurden.

Während das erste Betriebsjahr (Sommer 2006) durch die Inbetriebnahme der Anlage und Versuche im Desorberteil geprägt war, lag im zweiten Betriebsjahr (vom 01.10.2006 bis zum 31.09.2007) der Schwerpunkt auf der Betriebsoptimierung des Gesamtsystems. So wurde im Sommer 2007 eine thermische Jahresarbeitszahl COP_{desiccant} von 1,5 erzielt.

Durch die gute Zusammenarbeit der Projektpartner und die wissenschaftliche Begleitung auf Basis des Energiemonitorings der Klimaanlage konnte im Verlauf des Projektes die Technologie zur Marktreife entwickelt und das Projekt mit guten Ergebnissen bzw. Erkenntnissen erfolgreich abgeschlossen werden.

2 Projektinhalte / Projektverlauf

Projektinhalte und Projektverlauf entsprechen weitgehend dem Projektantrag.

2.1 Arbeitspakete des Projekts

- *Konzeption und Planung der Anlage*

Die Anlage wurde für die Medizinische Klinik des Universitäts-Klinikums Freiburg geplant und konzipiert. Die zu klimatisierende Fläche beträgt ca. 700 m² und umfasst einen Empfangsbereich, Flure und sechs innen liegende Räume mit hohen internen Lasten. Der Sorptionsteil wurde für den kontinuierlichen Betrieb ausgelegt, da die Niedertemperaturwärme des Wärmeverbundnetzes der Uniklinik jederzeit zur Verfügung steht.

- *Bau und Installation der Anlage*

Die Anlage wurde von menerga gebaut und von der Firma Axima GmbH (*Axima*) im Tiefkeller unter der Medizinischen Klinik im Austausch einer ca. 30 Jahre alten Lüftungsanlage installiert und luftseitig an das bestehende Kanalsystem angeschlossen.

- *Installation der Medienversorgung und der Messtechnik*

Die Installation der Medienversorgung, wie Frischwasseranschluss und Fernwärmeanschluss wurde von der Betriebstechnik der Uniklinik übernommen. Die Installation der Messtechnik und der gesamten Stromversorgung wurde von Axima durchgeführt.

- *Wissenschaftliche Begleitung im Anlagenbetrieb*

Die wissenschaftliche Begleitung umfasst die Inbetriebnahme, das Monitoring, die Datenauswertung und – darauf basierend – die Optimierung der SGK-Klimaanlage. Die Klimaanlage wurde durch menerga in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE und SolCoolAirCon in Betrieb genommen. Das Monitoring der Anlage wurde vom Fraunhofer ISE installiert und gepflegt. Die anlagen- und regelungstechnische Optimierung und die Begleitung im Betrieb (u.a. Online-Visualisierung der Daten, Schwachstellenanalyse und Betriebsanalyse) wurden durch das Fraunhofer ISE und menerga mit Unterstützung durch SolCoolAirCon durchgeführt.

- *Das Berichtswesen* wurde vom Fraunhofer ISE durchgeführt. Im Rahmen des Projekts wurden zwei Diplomarbeiten verfasst: „Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit von Lüftungsanlagen mit sorptionsgestützter Klimatisierung mit flüssigen Sorbentien“ (Till Mansfeld) und „Betriebsanalyse von sorptionsgestützten Klimaanlagen mit flüssigen Sorbentien“ (Daniel Geßner).

2.2 Aufgetretene Änderungen vom geplanten Projektinhalt/-verlauf

- *Änderungen des Projektinhalts*

Die Projektinhalte wurden komplett bearbeitet.

Zusätzlich wurde eine Wirtschaftlichkeitsanalyse erstellt. Die Wirtschaftlichkeitsanalyse vergleicht die SGK-Klimaanlage „LiquiSorp“ mit einer konventionellen RLT-Anlage mit Kompressionskältemaschine KKM.

- *Änderungen vom Projektverlauf*

Der Zeitplan konnte weitgehend eingehalten werden. Im Projekt kam es zu zwei Verzögerungen, die den Verlauf aber nur unwesentlich beeinträchtigten:

1. Anfänglich konnte der geplante Zeitrahmen nicht eingehalten werden, da sich die Suche nach einem Betreiber verzögerte. Als mit der Uniklinik ein Betreiber gefunden war, konnte der Zeitrückstand eingeholt werden.
2. Im Sommer 2006 traten unerwartet Betriebsprobleme aufgrund eines Biofilms in der Adiabatik auf. Trotz einer intensiven Suche nach der Ursache für dieses Wachstum, konnte nicht abschließend geklärt, woher die Keime für die Bildung des Biofilms stammen. Die Keime können entweder durch die Abluft oder durch eine Verunreinigung während der Montage eingetragen worden sein. Ähnliche Probleme mit einer Verkeimung sind aus vergleichbaren Anlagen mit Verdunstungskühlung nicht bekannt. Damit kann geschlossen werden, dass der Biofilm nicht auf die Technologie zurückzuführen ist, sondern tatsächlich mit dieser speziellen Anlage zu tun hatte. Nach einer gründlichen Reinigung und Desinfizierung im Winter 2006 / 2007 wurde die SGK-Anlage im Sommer 2007 problemlos und ohne irgendeine Form der Verkeimung betrieben.
3. Die Volumenstromzähler in den Heizkreisen zur Berechnung der gebrauchten Wärmemengen zum Lufterhitzen und zur Soleerwärmung ließen sich lange Zeit nicht korrekt auslesen. Erst ab Oktober 2006 standen fehlerfreie Messwerte zur Verfügung.

2.3 Projektverlauf

Bild 1 zeigt den tatsächlichen Projektverlauf.

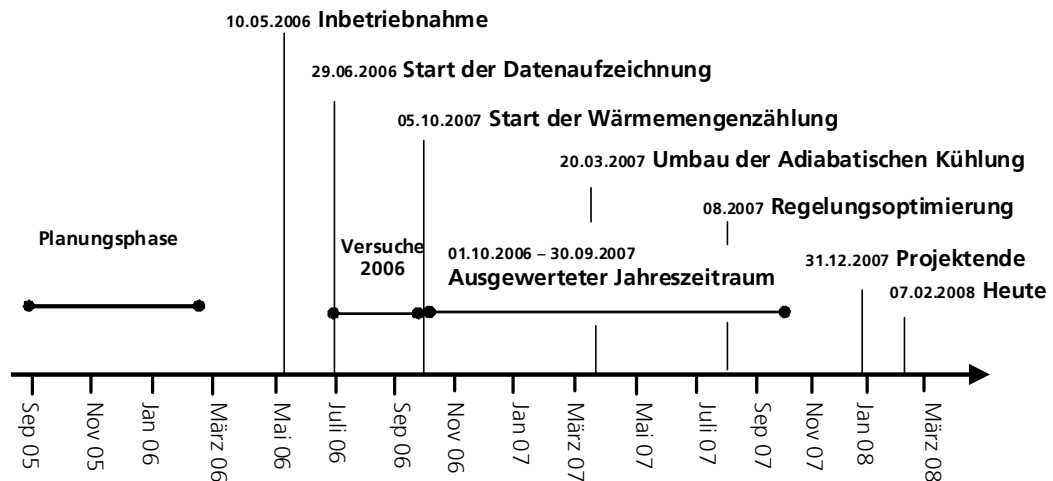


Bild 1: Projektverlauf.

3 Wissenschaftliche Begleitung

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung wurde ein Messwerterfassungssystem mit Online-Visualisierung aufgebaut, um sowohl das Monitoring als auch eine betriebsbegleitende Optimierung der Anlage realisieren zu können.

Zudem wurden Versuche durchgeführt, um (1) eine Verbesserung der Leistungszahl COP bzw. der Jahresarbeitszahl JAZ und (2) eine anlagen- und regelungstechnische Optimierung zu erzielen. Randbedingung für die Optimierung der SGK-Anlage (Verbesserung der Energieeffizienz und Einsparung der eingesetzten Ressourcen) ist die Einhaltung der Behaglichkeit im Raum nach DIN EN 13779.

3.1 Anlagenbeschreibung

Das Grundprinzip der sorptionsgestützten Klimatisierung mit flüssigen Sorbentien wird in [Bine 08/02] und [Röben02] beschrieben. Bild 2 zeigt das vereinfachte Anlagenschema.

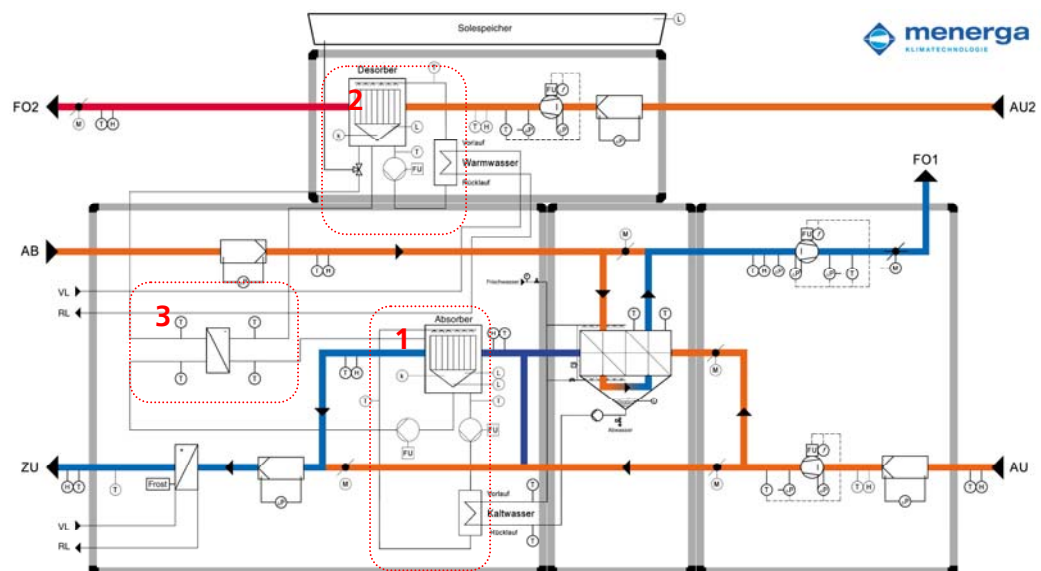


Bild 2: Anlagenschema der sorptionsgestützten Klimatisierung in der Uniklinik. Die 4 Baugruppen sind in den grauen Rahmen (mit schwarzen Ecken) dargestellt.

Die Baugruppe rechts beinhaltet die Ventilatoren zur Luftförderung, in der Mitte sitzt der Rekuperator, er dient zur Wärmerückgewinnung und zur indirekten Kühlung der Zuluft durch Verdunstungskühlung in der Abluft. Diese zwei Bauteile, in ähnlicher Konfiguration, sind seit ca. 15 Jahren als Standardgerät (Adsolair) auf dem Markt erhältlich.

Die innovativen Baugruppen der Anlage sind der Absorber (links) zur Entfeuchtung der Außenluft und der Desorber (oben) zur Regeneration des flüssigen Sorptionsmittels.

Die Sole wird im kontinuierlichen Betrieb zwischen Absorber und Desorber ausgetauscht. Damit müssen Entfeuchtungs- und Regenerationsbetrieb nicht unterbrochen werden. Der kontinuierliche Betrieb wird durch je einen Sorptionsmittel-Kreisläufe (rot-gepunktete Rahmen) für (1) den Entfeuchtungsbetrieb, (2) den

Regenerationsbetrieb und (3) den Austausch der Sole zwischen den Baugruppen. Im Austauschkreis wird die Sole über den Sole-Sole-Wärmerückgewinner geführt, um die reiche, warme Sole aus dem Desorber vor dem Eintritt in den Absorber zu kühlen (Stichwort „Wärmeverschleppung“) und die arme, kühle Sole für die Desorption vorzuheizen. Der kontinuierliche Betrieb des Sorptionsteils funktioniert nur dann, wenn zu jeder Zeit Wärme für die Regeneration zur Verfügung steht. Hier wird die Wärme aus dem Wärmenetz der Uniklinik bezogen.

Durch den kontinuierlichen Betrieb muss die Sole nicht gespeichert werden. Im Projektverlauf wurde lediglich ein Ausdehnungsgefäß nachgerüstet, um die Volumenänderung der Sole im Absorberbetrieb aufzunehmen.

Absorber und Desorber der SGK-Anlage sind identisch aufgebaut: Die Sole wird in einem Kreislauf aus dem Sumpf des Bauteils gepumpt und über einer Pallring-Schüttung verrieselt. Während die Sole an der Pallring-Schüttung nach unten läuft, nimmt sie im Absorber Wasser aus der Luft auf bzw. gibt im Desorber Wasser an die Luft ab. Im Moment der Aufnahme bzw. der Abgabe von Wasser steht die Sole in direktem Kontakt zur Luft. Bei der Aufnahme von Wasser (Absorption) gibt die Sole Wärme ab. (Die Zuluft erwärmt sich dabei.) Zur Regeneration im Desorber muss die Sole erwärmt werden. Zur Erwärmung der Sole benötigt die Heizwasserseite ein Temperaturniveau von ca. 80 °C, um eine Soletemperatur von 75 °C zu garantieren. Diese Wärmezufuhr ist die Antriebsenergie für die Entfeuchtung der Zuluft.

3.2 Anlagen-Monitoring

Zum Monitoring wurden zwei Messwerterfassungssysteme installiert:

1. Der Webdatenlogger „Freezmo“ von menerga basiert auf einem Embedded-PC, liest Messwerte aus der DDC, speichert diese und stellt die Daten web-basiert zur Verfügung. Freezmo liefert damit (ungeprüfte) Rohdaten zur Weiterverarbeitung. Zur Prüfung und Auswertung von Rohdaten wurde am Fraunhofer ISE eine Auswertesoftware in der Programmiersprache Python entwickelt. Diese Software überprüft die Rohdaten auf Datenlücken, Min/Max-Grenzwerte und Plausibilität. Mit diesen aufbereiteten Daten ist eine Kontrolle des Anlagenbetriebs möglich.
2. Ein Messrechner mit einer weitgehend standardisierten Software des Fraunhofer ISE wurde aufgrund von Aufzeichnungsausfällen des Webdatenloggers Mitte Juni nachgerüstet. Der Messrechner liest Daten aus und speichert und überträgt diese. Mit den Rohdaten des Messrechners wurde eine Online-Visualisierung aufgesetzt, die für die Projektpartner freigegeben ist. Die Visualisierung besteht aus einem am Fraunhofer ISE programmierten und entwickelten Java-Applet. Das Java-Applet wird mit einem VisualEditor erzeugt. Das Java-Applet ist in eine Internetseite eingebunden und präsentiert aktuelle Messdaten (blau) der Anlage in einem Anlagenschema, siehe Bild 3. Zusätzlich zum Java-Applet werden Diagramme einzelner Zustandsgrößen, z.B. Außentemperatur, in Zeitreihen (hier Bild 4 und Bild 5) und Carpetplots (siehe Kapitel 4) dargestellt. Auch Ergebnisse der Tagesauswertung der vergangenen Woche sind in tabellarischer Form einzusehen (hier Tabelle 1).

Diese beiden Systeme sind redundant, so dass der Ausfall eines Messwerterfassungssystems durch das andere System aufgefangen werden kann.

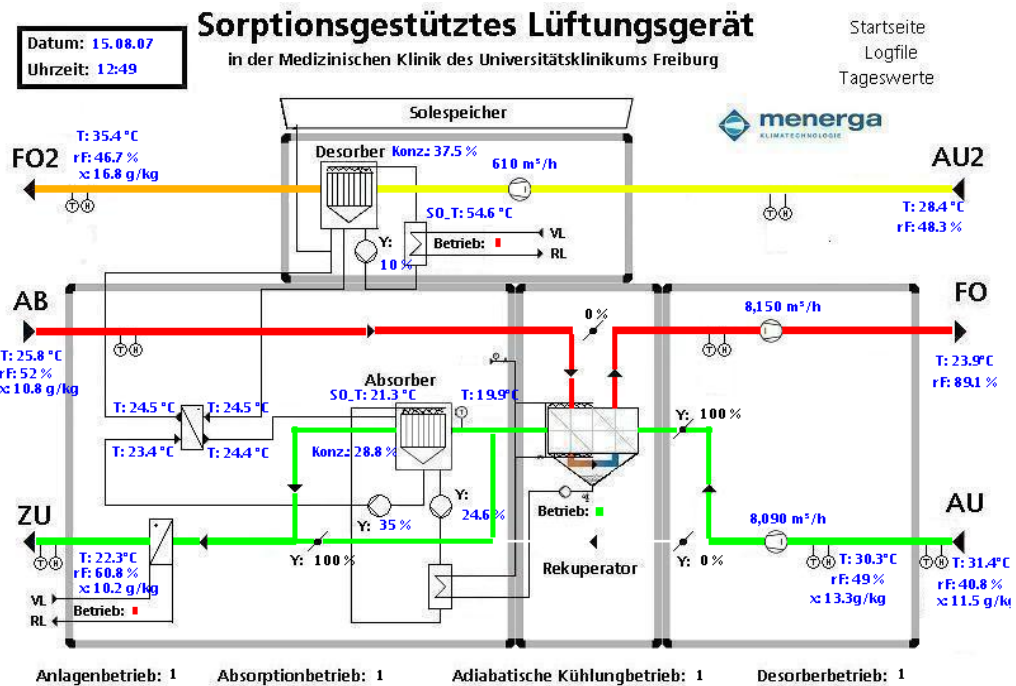


Bild 3: Java-Applet der Visualisierung, <http://liquisorp.ise.fhg.de>

Die Zeitreihendiagramme (Bild 4 und Bild 5) werden jeden Tag automatisch neu erzeugt. Dargestellt sind die Außen- (rot), die Zu- (grün) und die Abluftzustände (blau) des Monats August (aus liquisorp.ise.fhg.de).

Temperaturen der AB-, Zu- und der Aussenluft

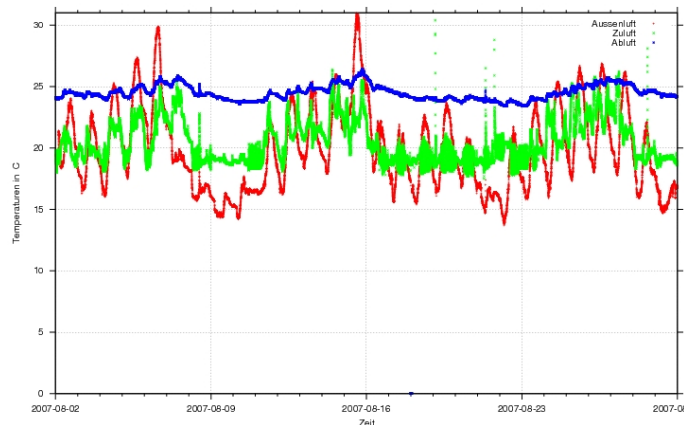


Bild 4: Zeitreihendiagramm der (Luft-)Temperaturen.

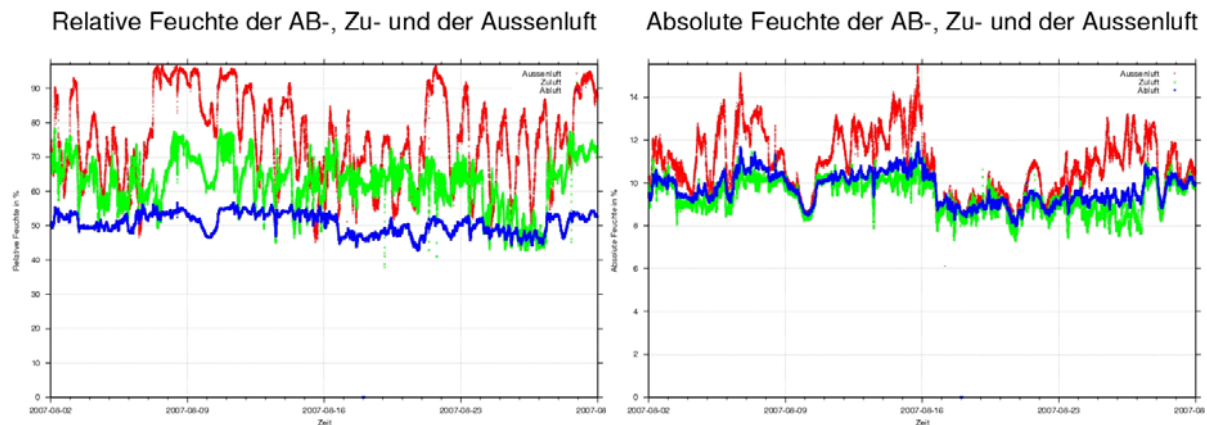


Bild 5: Zeitreihendiagramme der relativen Feuchten und der absoluten Feuchten.

Tabelle 1 zeigt einen Ausschnitt aus der Tagesauswertung (aus liquisorp.ise.fhg.de). In der Tabelle sind die Summen der Verbräuche und die Arbeitszahlen für die Tage im August 2007 abgebildet.

Tabelle 1 Tagesauswertung.

Datum	Verbräuche					Kennzahlen			
	Stromverbrauch in kWh		Wasser- verbrauch in Liter	Fernwärme in kWh		COP			Anlagenstrom- kennzahl in W/m²
	Gesamt	Sorption		Heizregister	Soleerhitzer	thermisch	gesamt	primär	
August	3720	385	32013	124	4704	1.1102	1.0262	1.1741	0.8140
31.08.2007	68	0	941	21	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.5516
30.08.2007	72	2	403	0	2	53.785	23.303	11.631	0.5822
29.08.2007	71	5	58	0	20	0.4278	0.3418	0.2941	0.4810
28.08.2007	100	7	864	1	21	4.3185	3.2194	2.5046	0.6801
27.08.2007	132	21	1105	0	195	1.3729	1.2392	1.3412	0.8971
26.08.2007	145	31	1549	0	457	0.8324	0.7795	0.9212	0.9841
25.08.2007	132	25	1452	0	391	0.8679	0.8157	0.9730	0.8963
24.08.2007	128	23	1203	0	342	0.7658	0.7176	0.8495	0.8702
23.08.2007	158	17	1347	17	223	0.8154	0.7578	0.8784	0.9309
22.08.2007	134	9	1191	27	34	1.9281	1.5206	1.2820	0.6984
21.08.2007	142	14	979	27	132	0.2327	0.2104	0.2287	0.8349
20.08.2007	84	7	980	0	35	1.3893	1.1587	1.0711	0.5715
19.08.2007	84	1	1171	2	0	0.0000	122.89	40.964	0.5718
18.08.2007	75	0	942	0	0	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
17.08.2007	75	2	683	0	8	6.1428	4.8690	4.1369	0.5104
16.08.2007	129	12	1169	0	34	4.1442	3.0701	2.3687	0.8768
15.08.2007	154	24	1623	0	260	1.8656	1.7078	1.9092	1.0517
14.08.2007	165	28	1283	0	346	0.8327	0.7704	0.8831	1.1206
13.08.2007	151	20	1104	0	192	1.2630	1.1437	1.2467	1.0321
12.08.2007	149	21	1205	2	305	0.6933	0.6486	0.7646	1.0253
11.08.2007	149	20	1018	6	299	0.3939	0.3693	0.4375	1.0199
10.08.2007	83	1	249	4	0	13.531	2.2370	0.8539	0.5764
09.08.2007	70	1	0	4	0	0.5488	0.2798	0.1531	0.4785
08.08.2007	135	10	794	12	42	0.6604	0.5324	0.4647	0.9602
07.08.2007	151	19	1192	0	309	0.4813	0.4534	0.5441	1.1107
06.08.2007	144	14	1355	0	192	2.1527	2.0061	2.3419	0.9841
05.08.2007	149	17	1447	0	283	1.2222	1.1529	1.3884	0.9963
04.08.2007	147	18	1147	4	305	0.8047	0.7599	0.9174	1.0145
03.08.2007	136	9	1215	0	170	0.7434	0.7060	0.8655	0.9636
02.08.2007	127	6	1130	0	106	1.6362	1.5488	1.8821	0.8651
01.08.2007	84	1	1214	1	3	36.070	27.804	22.658	0.5873

3.3 Auswertung eines Betriebsjahres

Dieses Kapitel stellt die Auswertung eines gesamten Jahrs von Oktober 2006 bis September 2007 vor:

- Die Auswertung geht einerseits auf die Behaglichkeit im Raum ein. Die Behaglichkeit ist das „Produkt“ der Klimaanlage.
- Andererseits wird die Energieeffizienz der SGK-Anlage bewertet. Die eingesetzten Ressourcen sind der „Antrieb“ der Klimaanlage.

In den Monaten Juni und Juli 2007 gab es – trotz des redundant aufgebauten Messwerterfassungssystems – einen Datenausfall von rund 200 Stunden bzw. 14 % der Zeit.

Behaglichkeit im Raum

Bild 6 zeigt die Stundenmittelwerte der Außen-, Zu-, und Abluftzustände im h-x-Diagramm.

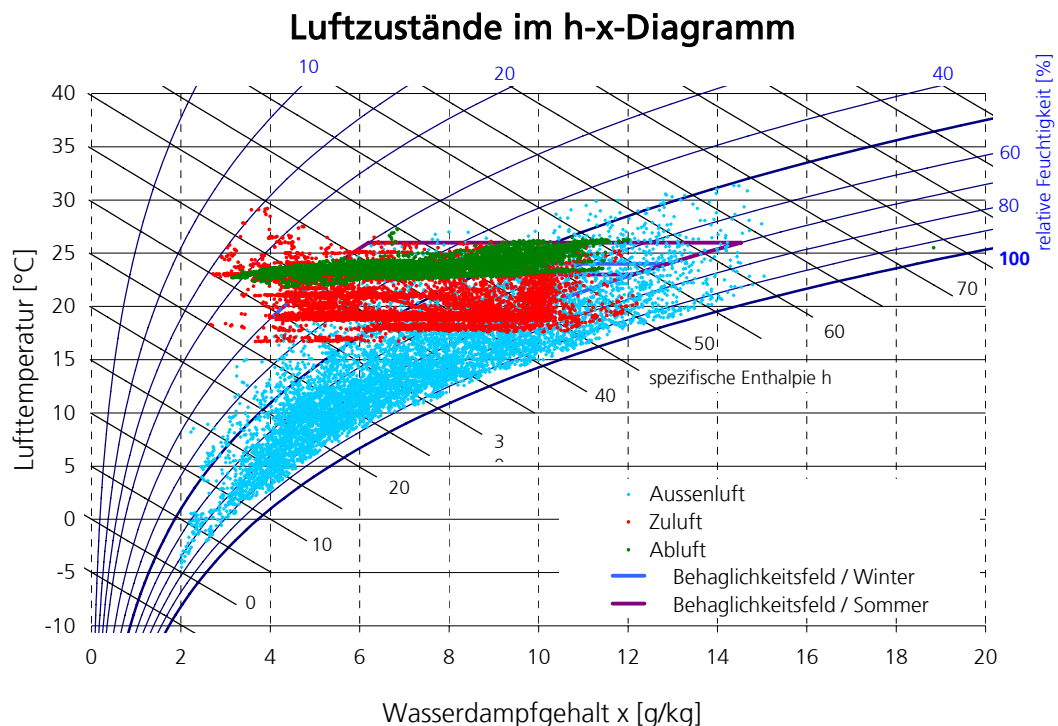


Bild 6: Außen-, Zu- und Abluftzustände der Klimaanlage als Stundenmittelwerte. Durch die vielen Datenpunkte sind die Behaglichkeitsfelder für den Winter- und den Sommerfall kaum zu erkennen. Das winterliche Behaglichkeitsfeld schließt Lufttemperaturen zwischen 19 °C und 23 °C, das sommerliche Behaglichkeitsfeld schließt 22 °C bis 25 °C mit ein. Beide Behaglichkeitsfelder liegen zwischen relativen Luftfeuchten von 30 % und 65 %.

Die grüne Punktwolke zeigt die Abluftzustände. Diese Zustände können im Mittel als repräsentativ für die Raumluftzustände angesehen werden. Die Ablufttemperatur liegt zwischen 22 °C und 25 °C und die relative Feuchte der Abluft liegt zwischen 20 % und 65 %. Die Behaglichkeit im Raum wird bis auf wenige Stunden im Winter eingehalten.

Die SGK-Anlage wurde ohne Befeuchtung installiert (Teil-Klimaanlage), was während trockener Wintertage (geringe absolute Luftfeuchte) zu einer Abweichung von der Behaglichkeit führt.

Um die Außenluftzustände (blaue Punktwolke) auf die Zuluftzustände (rote Punktwolke) zu konditionieren, wird der Außenluft Energie zu- bzw. abgeführt.

Die Luft wird durch Heizen, Kühlen und Entfeuchten konditioniert. Dafür wurden die nachfolgend aufgeführten Ressourcen eingesetzt.

Benötigte Ressourcen

Die SGK-Anlage mit flüssigen Sorbentien von menenga benötigt eine Strom-, Wärme- und Wasserversorgung:

- Wärme wird für die Lufterhitzung im Winter und im Sommer für die Soleerwärmung zur Regeneration im Desorber gebraucht.
- Wasser wird für die Verdunstungskühlung der Abluft benötigt. Damit wird die Zuluft indirekt gekühlt und gleichzeitig die arme Sole im Solekreis des Absorbers gekühlt.
- Strom wird für die Ventilatoren, Pumpen, Klappen und die Mess- und Regelungstechnik gebraucht.

Die Jahressumme der Wärmemenge wird luftseitig bilanziert:

- Die zugeführte Energie (durch Fernwärme und Wärmerückgewinnung WRG) betrug im Bewertungszeitraum 125,6 MWh/a, davon rund 16 MWh/a aus dem Nachheizregister über Fernwärme.
- Die abgeführte Energie (Entfeuchtung und Kühlung) betrug im Bewertungszeitraum 20,6 MWh/a.

In Bild 7 sind die monatlichen Summen der zugeführten Energie als Wärmemenge (Q_{heiz}) und die abgeführte Energie als Kälteenergie ($Q_{\text{kälte}}$) dargestellt.

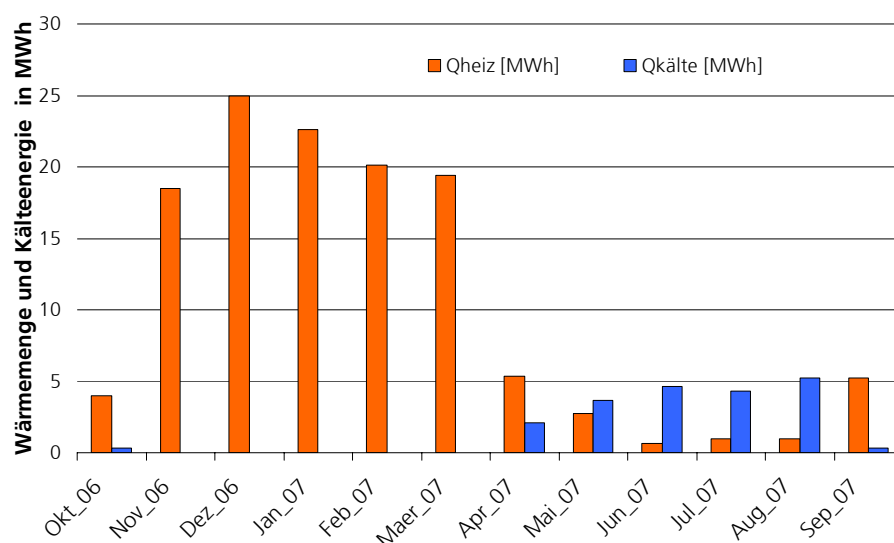


Bild 7: Monatliche Wärmeverbrauch und abgeführten Kälteenergie. In den Monaten Mai 2007 bis August 2007 ist die Wärmerückgewinnung zwar auch in kalten Nächten aktiv. Dennoch ist

eine Nachheizung mit Fernwärme nötig. Das ist ein Sonderfall und dem Rund-um-die-Uhr-Betrieb der Anlage in der Uniklinik geschuldet.

Zur Konditionierung der Luft wurden im Bewertungszeitraum ca. 30 MWh Strom, ca. 30 MWh Fernwärme und ca. 136 m³ Wasser für den Anlagenbetrieb benötigt.

Der Fernwärmeverbrauch (30 MWh, wasserseitig bilanziert) verteilt sich auf das Heizregister mit 16 MWh und die Regeneration der Sole mit 14 MWh. In Bild 8 ist der monatliche Heizwärmeverbrauch, verteilt auf die Verbraucher Heizregister ($Q_{\text{wasser,hr}}$) und Soleerhitzer ($Q_{\text{wasser,sh}}$) dargestellt.

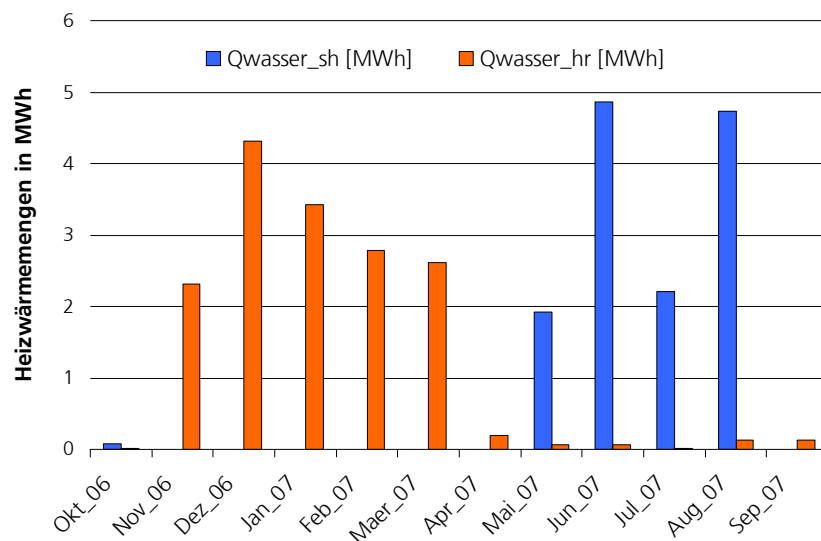


Bild 8: Monatlicher Heizwärmeverbrauch

Bild 8 zeigt eine gleichmäßige Verteilung des Wärmeverbrauchs der Anlage über das gesamte Jahr: Im Sommer wird die Wärme zur Regeneration der Sole benötigt und im Winter wird die Außenluft nachgeheizt. Nur in den Übergangsmonaten September, Oktober und April wird wenig Heizwärme benötigt.

Eine weitere Ressource ist das Wasser zur Bereitstellung der Kälteenergie zur Kühlung der Zuluft und der Sole. Die Kälteenergie wird durch die adiabatische Verdunstungskühlung bereitgestellt. Hierfür wird Wasser in der Abluft versprüht. Das Wasser entzieht der Abluft die zur Verdunstung notwendige Wärme.

Im Wärmetauscher (Rekuperator) wird die Zuluft durch die kühlere Abluft gekühlt. In Bild 9 sind die monatlichen Summen des zur Kühlung gebrauchten Wassers dargestellt. Der spezifische Wasserverbrauch liegt im Jahresmittel bei 6,55 m³ Wasser / MWh Kälte.

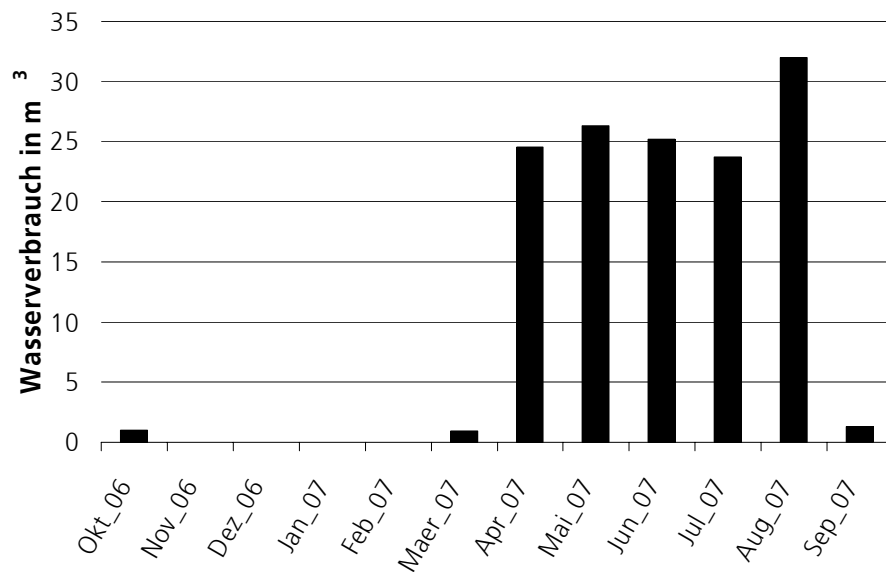


Bild 9: Wasserverbrauch der SGK-Anlage

Der Stromverbrauch der Anlage hängt stark von der Betriebsart ab. Im Betrieb der Freien Lüftung und der Teil-WRG ist der Druckverlust der Anlage am geringsten und damit auch der Strombedarf für die Ventilatoren. Am meisten Strom benötigt die Anlage im Kühlbetrieb mit Entfeuchtungsanforderung und gleichzeitiger Regeneration, da hier der Strombedarf des Desorberventilators und der Wasserpumpe der Adiabatik mit dem höheren Druckverlust bei der Durchströmung der einzelnen Bauteile zusammenfallen.

Bild 10 zeigt den monatlichen Stromverbrauch der Gesamtanlage (blau) und des Sorptionsteils (mangenta). Der Stromverbrauch der Sorption beinhaltet den Desorberventilator, die Wasserpumpe der Kühlung, die drei Solepumpen und die zusätzliche Mess- und Regelungstechnik. Keine Berücksichtigung findet der Stromverbrauch zur Überwindung des höheren Druckverlusts der Anlagenteile.

Zusätzlich ist die Anlagenstromkennzahl (grau) als Quotient des monatlichen Stromverbrauchs durch das monatlich geförderte Luftvolumen dargestellt. Der Monatsmittelwert schwankt zwischen 0,4 und 0,98 Wh/m³ und liegt im Jahresmittel bei 0.59 Wh/m³.

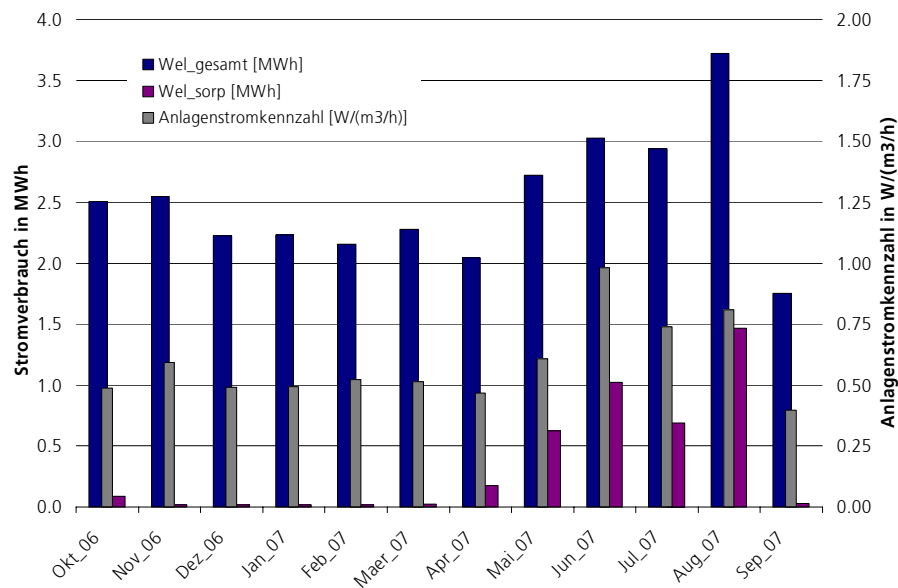


Bild 10: Monatlicher Stromverbrauch der Anlage und Anlagenstromkennzahl. Der Stromverbrauch des Sorptionsteils in der Winterzeit wird für die notwendige Mess- und Regelungstechnik aufgewendet.

Auf Basis dieses Ressourcenverbrauchs wird im Folgenden die Effizienz der SGK-Anlage bewertet.

3.4 Energieeffizienz der SGK-Anlage

Hier werden lediglich thermische und elektrische Energie bewertet. Der Wasserverbrauch wird als separater Ressourcenverbrauch bewertet.

Die Energieeffizienz soll dabei mit der Leistungszahl COP

$$\text{COP} = \frac{\text{Nutzen[W]}}{\text{Aufwand[W]}} \quad (1)$$

beschrieben werden, wobei der Nutzen immer als Enthalpiedifferenz (negativ durch Entfeuchten und / oder Kühlen, positiv durch Heizen und / oder Befeuchten) zwischen Außen- und Zuluft beschrieben wird. Der Aufwand kann nach unterschiedlichen Ansätzen definiert werden: Eingesetzte Wärme, eingesetzte Wärme plus Hilfsenergie oder eingesetzte Primärenergie.

Die Bilanzgrenze für das Gesamtsystem wird in Bild 11 skizziert und umfasst alle Energieverbraucher der SGK-Anlage.

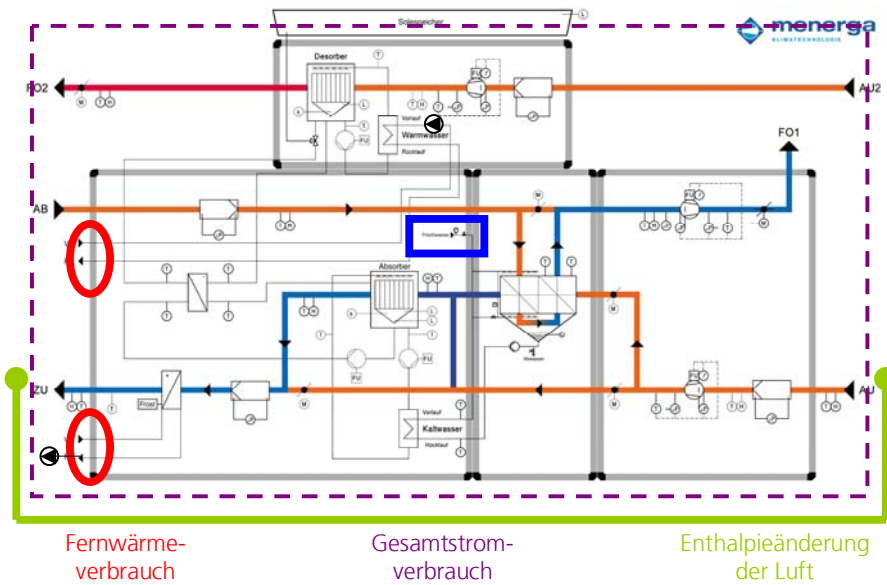


Bild 11: Bilanzgrenze für die Berechnung von Leistungs- und Arbeitszahlen.

Zwar kann die Leistung messtechnisch erfasst werden, bei Änderungen des Betriebszustandes ist dieser Momentanwert aber kaum aussagekräftig. Daher werden in der Auswertung größere Zeiträume bewertet. Damit wird die Arbeitszahl AZ eingeführt. Die bekannteste Arbeitszahl ist die Jahresarbeitszahl JAZ

$$JAZ = \frac{\text{Nutzen[kWh/a]}}{\text{Aufwand[kWh/a]}} \quad (2)$$

Im stationären Betrieb sind Leistungs- und Arbeitszahl identisch. Unter der Annahme, dass der Anlagenbetrieb im Zeitintervall (hier 10 Minuten, s.u. „Modellbildung“) nahezu stationär ist, gilt:

$$AZ_{10\text{Minuten}}^{\text{stationärerBetrieb}} = \text{COP} \quad (3)$$

Leistungszahlen für den Sorptionsbetrieb

Zur Analyse des Sorptionsteil wird die Leistungszahl COP nach drei Methoden bestimmt, wobei der Nutzen jeweils die negative Enthalpieänderung der Luft ist. Als Aufwand wird entweder nur die eingesetzte Wärme oder die eingesetzte Wärme plus den eingesetzten Strom für den Sorptionsteil (Hilfsenergie) definiert. Das dritte Modell berücksichtigt die Primärenergie als Aufwand. Die Messdaten werden dazu in Form von Minutenwerten ausgewertet:

$$\text{COP}_{\text{thermisch}} = \frac{\Delta h_{\text{Luft}}^- [\text{Wh/1Minute}]}{Q_{\text{Fernwärme}} [\text{Wh/1Minute}]} \quad (4)$$

$$\text{COP}_{\text{gesamt}} = \frac{\Delta h_{\text{Luft}}^- [\text{Wh/1Minute}]}{Q_{\text{Fernwärme}} [\text{Wh/1Minute}] + E_{\text{Strom,Hilfsenergie}} [\text{Wh/1Minute}]} \quad (5)$$

$$\text{COP}_{\text{primär}} = \frac{\Delta h_{\text{Luft}}^- [\text{Wh/1Minute}]}{Q_{\text{p,Fernwärme}} [\text{Wh/1Minute}] + E_{\text{p,Strom,Hilfsenergie}} [\text{Wh/1Minute}]} \quad (6)$$

Der Primärenergiefaktor $\text{kWh}_{\text{Primärenergie}}/\text{kWh}_{\text{Endenergie}}$ ist für Strom 3 und für Fernwärme 0,7.

Da die Energieeffizienz der Luftkonditionierung im Sommerfall bewertet werden soll, wird in dieser Analyse der Stromverbrauch für die Luftförderung und der Wärmeverbrauch für das Heizregister sowie der damit verbundene Hilfsstromverbrauch nicht berücksichtigt, Bild 12.

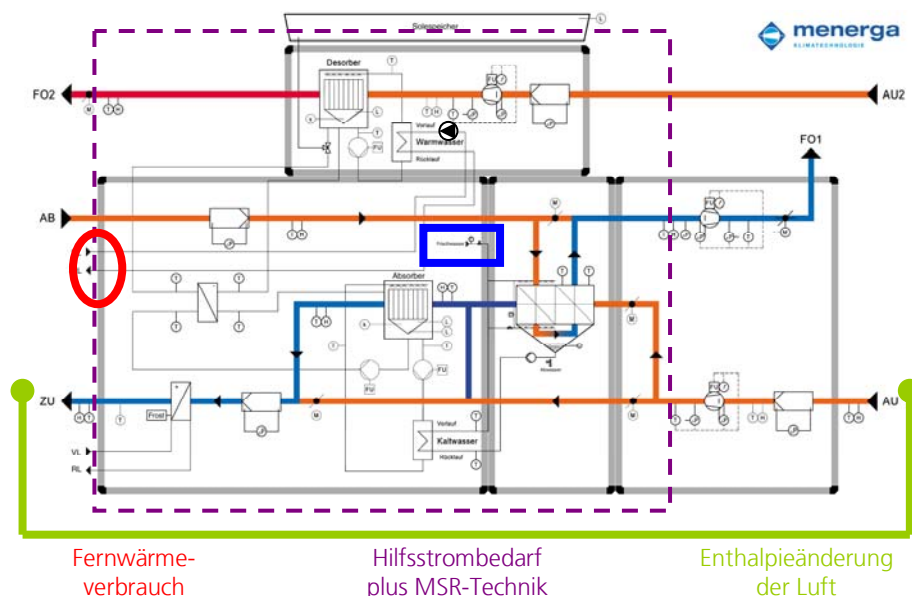


Bild 12: Bilanzgrenze für die Berechnung von Leistungs- und Arbeitszahlen im Sorptionsbetrieb. Der Stromverbrauch für die Luftförderung wird nicht berücksichtigt. Ebenso bleibt der Frischwasserverbrauch (blau) unberücksichtigt. Alle Wärmetauscher (Sole-Wärmetauscher, Wärmerückgewinnung und Solekühlung) liegen innerhalb der Bilanzgrenze.

Je kleiner ein Zeitraum gewählt wird, desto stärker bildet die Arbeitszahl den stationären Betrieb und damit den COP ab (z.B. 10 Minuten-Zeitintervall). Je größer der Zeitraum gewählt wird, desto stärker bildet die Arbeitszahl den realen Anlagenbetrieb und damit die Monats- bzw. Jahresarbeitszahl ab.

Bild 13 zeigt die mittleren Leistungszahlen pro Monat und für das Jahr. Die Zahlen wurden als Monatsarbeitszahl (MAZ) für den Sorptionsteil (nur negative Enthalpieänderung) berechnet. Dieser Zeitraum ist sinnvoll, weil der Absorber unabhängig vom Desorber betrieben werden kann und damit Wärmeverbrauch und Kältebereitstellung / Entfeuchtung entkoppelt sind. Im Monatsmittel ist die Bilanz aber in sehr guter Näherung ausgeglichen.

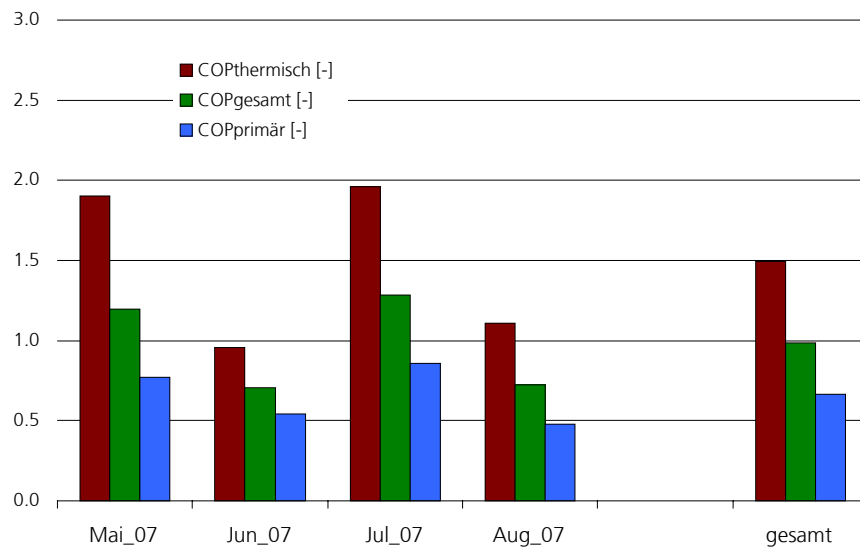


Bild 13: Mittlere Leistungszahlen / Moantsarbeitszahlen für den Sorptionsteil der SGK-Anlage für die einzelnen Sommermonate und das ganze Jahr.

Die mittleren, monatlichen Leistungszahlen COP sind von internen und externen Wärmelasten sowie von den Außenluftzuständen abhängig und verändern sich daher von Monat zu Monat:

- Mittlere $COP_{thermisch}$ größer als 1,5 wurden in den trockeneren Monaten Mai und Juli 2007 erreicht, weil weniger Fernwärme für die Desorption benötigt wurde und ein großer Teil der Enthalpieänderung durch die adiabate Verdunstungskühlung erreicht wird.
- In Monaten mit höherem Entfeuchtungsbedarf liegt die Arbeitszahl entsprechend niedriger, hier: In den Monaten Juni und August 2007 liegt der mittlere $COP_{thermisch}$ um den Wert 1.

In [Henning 04] werden unterschiedliche Anlagenkonzepte mit thermisch angetriebenen Kälteerzeugung vorgestellt. Zwar stehen dort für SGK-Systeme mit flüssigen Sorbentien noch keine Leistungszahlen zur Verfügung. Aber für SGK-Systeme mit Sorptionsrad wird ein $COP_{thermisch}$ von 0,7 genannt. Dabei wird ausdrücklich auch auf den erhöhten Druckverlust im Sorptionsrad / Rotationswärmetauscher hingewiesen.

In dem EU-Projekt SOLAIR „Increasing the market implementation of Solar air-conditioning systems for small and medium applications in residential and commercial buildings“ wird der Begriff $COP_{desicant}$ für die Bewertung von offenen SGK-Systemen verwendet. Der Wert kann auch als (thermische) Jahresarbeitszahl für den Sorptionsteil – analog zum Momentanwert $COP_{thermisch}$ – bezeichnet werden, wobei zu berücksichtigen ist, dass hier einzelne Betriebszustände verwendet werden und nicht ein durchgängiger Anlagenbetrieb beschrieben wird:

$$COP_{desicant} = \frac{\sum_{n=1}^{8760} \Delta h_{Luft,n}^-}{\sum_{n=1}^{8760} Q_{Wärme für Re generation,n}} \quad (7)$$

$COP_{desicant}$ liegt bei 1,5.

Hinweis / Plausibilität: Dieser Wert ist mit Gl. (7) auf Basis von 1-Minute-Messwerten – in Anlehnung an Gl. (4) – berechnet worden. Werden die aufbereiteten 10-Minuten-Messwerte aus Tabelle 3 für den stationären Betrieb verwendet, ergibt sich erwartungsgemäß ein etwas kleinerer Wert: $COP_{desicant} = 1,23$.

Studien [Röben02] haben gezeigt, dass SGK-Anlagen im Sorptionsbetrieb in durchschnittlichen Jahren eine mittlere Leistungszahl $COP_{desicant}$ von 1,4 erreichen können und damit primärenergetisch deutlich effizienter arbeiten als konventionelle Anlagen auf Basis von Kompressionskältemaschinen. Der Wert von 1,5 zeigt, welches Potential in der Technik der Flüssigsorption steckt.

Im Vergleich zu Referenzsystemen sollte auch der Hilfsstrombedarf und der zusätzliche Stromverbrauch der Ventilatoren zur Überwindung des höheren Druckverlustes im Absorber und Desorber berücksichtigt werden. Dies kann durch eine primärenergetische Bewertung erfolgen. Die Jahreszahl $JAZ_{Sorption}$ für den Kühl- und Entfeuchtungsbetrieb wird dazu wie folgt definiert:

$$JAZ_{Sorption} = \frac{\sum_{n=1}^{8760} \Delta h_{Luft,n}^-}{\sum_{n=1}^{8760} (Q_{p,Fernwärme,Sorption,n} + E_{p,Strom,Sorption,n} + E_{p,Strom,zus.Ventilator,n})} \quad (8)$$

Zur Berechnung des Stromverbrauchs werden die Betriebszeiten aus Tabelle 2 und die Energieverbräuche aus Tabelle 3 herangezogen. Der Strom-Mehrverbrauch im Sorptionsbetrieb ist dabei in guter Näherung die Differenz zwischen der Betriebsart „freie Lüftung“ und den Betriebsarten „nur Kühlung“, „nur Entfeuchtung“ bzw. „Kühlung + Entfeuchtung“.

Es werden rund 13,6 MWh Nutzenergie (Δh_{Luft}^-) bereitgestellt. Dafür werden rund 11,3 MWh Fernwärme und 3,7 MWh Strom für den Betrieb des Sorptionsteil und zusätzlich 3,9 MWh Strom für die Ventilatoren zur Überwindung des erhöhten Druckverlustes in den einzelnen Betriebsarten eingesetzt. Werden diese Aufwendungen primärenergetisch bewertet, ergibt sich $JAZ_{Sorption} = 0,45$.

Hinweis: Anders als $COP_{desicant}$ (siehe oben) und $JAZ_{thermisch}$ (siehe unten) kann $JAZ_{Sorption}$ nicht mit den 1-Minute-Messwerten bestimmt werden. Hierzu werden stattdessen die aufbereiteten 10-Minuten-Messwerte aus Tabelle 3 herangezogen. Die $JAZ_{Sorption}$ ist im realen Betrieb nach Gl. (8) etwas größer als 0,45.

Jahresarbeitszahl

Die Energieeffizienz der Gesamtanlage kann mit der primärenergetischen Jahresarbeitszahl der Klimaanlage bewertet werden. Sie wird aus dem Quotienten Gesamtnutzen zu Gesamtaufwand gebildet. Der Gesamtnutzen wird luftseitig bilanziert und beschreibt – wie oben erwähnt – die Enthalpiedifferenz zwischen Außen- und Zuluft. Der Gesamtaufwand entspricht bei $JAZ_{thermisch}$ dem Heizwärmeverbrauch:

$$JAZ_{thermisch} = \frac{\sum_{n=1}^{8760} (|\Delta h_{Luft,n}^-| + \Delta h_{Luft,n}^+)}{\sum_{n=1}^{8760} Q_{Fernwärme,n}} \quad (9)$$

Die Jahresarbeitszahl $JAZ_{thermisch}$ liegt im Bewertungszeitraum bei 4,9.

Hinweis / Plausibilität: Dieser Wert ist mit Gl. (9) auf Basis von 1-Minute-Messwerten – in Anlehnung an Gl. (4) – berechnet worden. Werden die aufbereiteten 10-Minuten-Messwerte aus Tabelle 3 für den stationären Betrieb verwendet, ergibt sich erwartungsgemäß ein etwas kleinerer Wert: $JAZ_{\text{thermisch}} = 4,8$.

Der Gesamtaufwand für $JAZ_{\text{primär}}$ wird aus dem (1) Stromverbrauch für die Ventilatoren, alle Pumpen und Hilfsantriebe, die MSR-Technik und die Fernwärmeanbindung und dem (2) Heizwärmeverbrauch bezogen auf die Primärenergie berechnet.

$$JAZ_{\text{primär}} = \frac{\sum_{n=1}^{8760} (|\Delta h_{\text{Luft},n}^-| + \Delta h_{\text{Luft},n}^+) \text{ kWh}_{\text{Nutzenergie}}}{\sum_{n=1}^{8760} (Q_{p,\text{Fernwärme},n} + E_{p,\text{Strom},n}) \text{ kWh}_{\text{Primärenergie}}} \quad (10)$$

Die Jahresarbeitszahl $JAZ_{\text{primär}}$ liegt im Bewertungszeitraum bei 1,3.

Modellbildung

Zur Analyse der Energieeffizienz von Klimaanlage wird der Energiebedarf in charakteristischen Betriebszuständen benötigt.

Zur Ermittlung des Ressourcenverbrauchs werden Datensätze für die einzelnen Betriebsarten aus dem Gesamtdatensatz für den Auswertzeitraum Oktober 2006 bis September 2007 verwendet.

Die Berechnung der Leistungszahlen in den einzelnen Betriebsarten für die SGK-Anlage an der Uniklinik Freiburg erfolgt in fünf Schritten:

(1) *Betriebsarten definieren*. Dazu wird im Folgenden der Verbrauch an Strom, Wärme und Wasser für einzelne Betriebsarten aus den Messwerten ermittelt. Es werden sieben Betriebsarten ausgewertet:

- Wärmerückgewinnung (WRG) mit Nachheizregister (HR),
- WRG ohne Nachheizregisterbetrieb,
- Wärmerückgewinnung mit Bypass (Teil-WRG),
- Freie Lüftung,
- (nur) Kühlung,
- (nur) Entfeuchtung und
- Entfeuchtung mit Kühlbetrieb.

(2) *Messdatenintervall = 10 Minuten*. Eine Voranalyse der Messdaten hat gezeigt, dass ein Zeitschritt von 10 Minuten ein gutes Messdatenintervall ist, um die Leistungszahlen zu bestimmen: Einerseits ist dieser Zeitschritt lang genug, um kurzzeitige Änderungen in der Betriebsdynamik (z.B. verzögerter Desorberbetrieb bei beginnender Entfeuchtung) zu mitteln und so einen quasi-stationären Betrieb zu beschreiben. Andererseits ist der Zeitschritt kurz genug, um den Wechsel zwischen Betriebsarten (z.B. Entfeuchtung + Kühlen → Kühlen) sauber zu erfassen.

(3) *Betriebszeit*. Im Folgenden werden ausschließlich Daten zur Auswertung genutzt, in denen die Betriebsart der Anlage für mindestens 10 Minuten aktiv war. In Tabelle 2 sind die Betriebsstunden der sieben Betriebsarten aufgeführt, die zur Auswertung verwendet werden.

Tabelle 2: Betriebsstunden der einzelnen Betriebsarten.

	Betriebszeit in Stunden	prozentualer Anteil von 8.760 Stunden
WRG + HR	1.367	23
WRG	181	3
Teil-WRG	2.657	45
freie Lüftung	431	7
nur Kühlung	254	4
nur Entfeuchtung	86	1
Entfeuchtung + Kühlung	895	15

Insgesamt wurden 5.870 Stunden bzw. knapp 70% der Betriebszeit ausgewertet. Die anderen Zeiträume beschreiben entweder Zwischenzustände (z.B. Umschalten von einer Betriebsart in eine andere Betriebsart) oder fehlen aufgrund des Ausfalls der Messtechnik.

(4) *Ressourcenverbrauch und Nutzenergie.* Aus den Datensätzen der einzelnen Betriebsarten werden Stundenmittelwerte der Nutzenergie (Enthalpieänderung der Zuluft) sowie des Strom-, Wärme- und Wasserverbrauchs ermittelt. Die Werte sind im Bild 14 und in Tabelle 3 dargestellt.

Ressourcenverbrauch der Betriebsarten

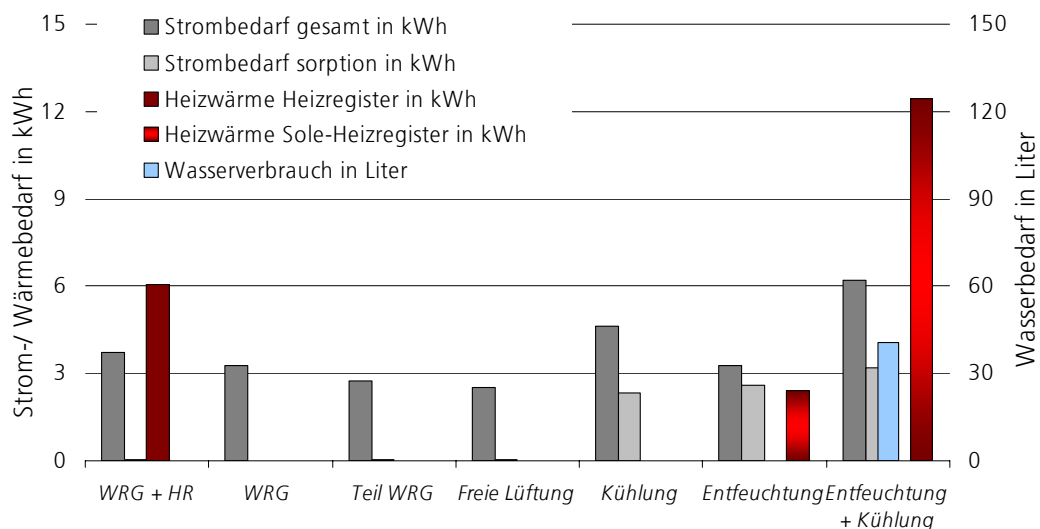


Bild 14: Ressourcenverbrauch der einzelnen Betriebsart pro Betriebsstunde.

Der Gesamtstromverbrauch für die einzelnen Betriebsarten variiert, weil je nach Betriebsart Strom für die Heizkreispumpen, die Adiabatik-Wasserpumpe, die Solepumpen und den Desorberbetrieb benötigt wird und die Ventilatoren zur Luftförderung unterschiedlich hohe Druckverluste überwinden müssen. Der Gesamtstromverbrauch für die Betriebsart „freie Lüftung“ beschreibt also den Mindeststrombedarf zur Förderung der Luft und für die MSR-Technik.

Tabelle 3: Nutzenergie und Ressourcenverbrauch der einzelnen Betriebsart pro Betriebsstunde

	WRG + HR	WRG	Teil-WRG	freie Lüftung	nur Kühlung	nur Entfeuchtung	Khlg. + Entftg.
Enthalpieänderung der Luft in kWh	+ 37,1	+ 18,3	+ 9,5	0 ***	- 8,9	- 2,2	- 12,5
Stromverbrauch gesamt in kWh, inkl. Lüftung	3,7	3,2	2,7	2,5	4,6	3,3	6,2
Fernwärmeverbrauch Heizregister in kWh	6,03	---	---	---	---	---	---
Stromverbrauch nur Sorption in kWh	0,03 *	0,005 *	0,02 *	0,02 *	2,3	2,6	3,2
Fernwärmeverbrauch Soleerwärmung in kWh	---	---	---	---	---	2,4 ****	12,4
Wasserverbrauch in Liter	---	---	---	---	57 **	127 **	40,7

* Nur MSR-Technik.

** Der stündliche Wasserverbrauch ist im reinen Kühlbetrieb und im reinen Entfeuchtungsbetrieb größer als beim Entfeuchten mit Kühlbetrieb. Dies beruht auf folgendem Zusammenhang: Die reine Kühlung und die reine Entfeuchtung sind meist Zwischenzustände, die am Anfang bzw. am Ende des Betriebszustandes „Entfeuchtung + Kühlung“ auftreten. Geht die Kühlung in Betrieb, wird zunächst die Adiabatik mit Wasser befüllt. Dieser Füllvorgang verbraucht verhältnismäßig viel Wasser, während des Kühlbetriebs / Entfeuchtungsbetriebs nur noch das verdunstete Wasser nachgespeist wird. Im Bezug auf den Wasserverbrauch ist die Wahl des 10-Minutenintervalls als Auswertintervall also ungenügend.

*** Dieser Wert ist nicht identisch mit Null. Messtechnisch werden zwar Enthalpieänderungen erfasst, diese sind aber klein und daher fehlerbehaftet.

**** Da diese Betriebszustände – trotz der Verwendung von 10-Minuten-Messwerten – häufig Übergangszustände beschreiben, fällt dieser Wert zu klein aus: In diesem Betriebszustand wird der Desorber meist (noch) nicht angefordert. Nur an 15 von 86 Stunden war tatsächlich der Desorber in Betrieb. Der Entfeuchtungsleistung steht also (noch) kein Wärmeverbrauch gegenüber. (Wird hier wegen dieses „Kapazitätseffektes“ die Leistungszahl zu hoch eingeschätzt, wird sie im Betriebszustand „Kühlung + Entfeuchtung“ entsprechend zu niedrig bewertet. Der Mittelwert über mehrere Betriebszustände ist repräsentativ.)

(5) *Leistungszahl*. Der Ressourcenverbrauch aus Tabelle 3 wird verwendet, um die mittleren Leistungszahlen für die einzelnen Betriebsarten nach Gleichung (4) bzw. (6) mit einem Intervall von 10 Minuten statt 1 Minute zu bestimmen:

- Die Leistungszahlen $COP_{\text{thermisch}}$ und $COP_{\text{primär}}$ werden nur für den Sorptionsteil bestimmt und beschreiben die Energieeffizienz im Kühl- und Entfeuchtungsbetrieb bei offenen SGK-Systemen. Hier wird – entsprechend der Definition – also u.a. der Stromverbrauch für die Luftförderung nicht berücksichtigt.
- Die Jahresarbeitszahlen $JAZ_{\text{thermisch}}$ und $JAZ_{\text{primär}}$ nach Gleichung (9) bzw. (10) berücksichtigen demgegenüber – entsprechend der Definition – u.a. auch den Stromverbrauch für die Luftförderung.
- Zur Bewertung der Lüftungseffizienz der Klimaanlage kann die so genannte Anlagenstromkennzahl $a_{\text{Lüftung}}$ herangezogen werden:

$$a_{\text{Lüftung}} = \frac{P_{\text{Strom}} [\text{W}]}{\dot{V}_{\text{Lüftung}} [\text{m}^3/\text{h}]} \quad (11)$$

Tabelle 4: Energieeffizienz für die einzelnen Betriebsarten.

	WRG + HR	WRG	Teil-WRG	freie Lüftung	nur Kühlung	nur Entfeuchtung	Khlg. + Entftg.
$\text{COP}_{\text{thermischL}} [W_N/W_A]$	kein SGK-Anlagenbetrieb				∞^3	0.92	1.01
$\text{COP}_{\text{primärL}} [W_N/W_{A,p}]$					1.26	0.23	0.69
$\text{JAZ}_{\text{thermischL}} [Wh_N/Wh_A]$	6.15	--- ¹	--- ¹	--- ¹	--- ¹	1.62	1.01
$\text{JAZ}_{\text{primärL}} [Wh_N/Wh_{A,p}]$	2.16	1.87	1.15	0 ²	0.64	0.32	0.40
$a_{\text{Lüftung}} [\text{Wh}/\text{m}^3]$	0.56	0.52	0.44	0.43	0.79	0.50	1.02

¹ Die Jahresarbeitszahlen $\text{JAZ}_{\text{thermisch}}$ „ohne Wert“ konnten nicht gebildet werden, da in diesen Betriebszuständen keine Fernwärme eingesetzt wird. Die Werte nehmen rechnerisch die Werte ∞ für die Betriebsarten „WRG“, „Teil-WRG“ und „nur Kühlung“ und 0 für „freie Lüftung“ an.

² Rein rechnerisch ist $\text{JAZ}_{\text{primär}}$ für die Betriebsart „freie Lüftung“ größer als Null, denn auch in diesem Betrieb kann eine kleine Enthalpieänderung zwischen Außen- und Zuluft gemessen werden.

³ Die mittlere Leistungszahl $\text{COP}_{\text{thermisch}}$ für die Betriebsart „nur Kühlung“ liegt bei unendlich, da die Kühlung ausschließlich über die indirekte Verdunstungskühlung erzeugt wird und keine Fernwärme zur Erzeugung der Kälteleistung benötigt wird.

Die mittlere Leistungszahl $\text{COP}_{\text{thermisch}}$ für die Betriebsarten „nur Entfeuchtung“ und „Kühlung + Entfeuchtung“ liegen bei 1, wobei in der Betriebsart „Kühlung + Entfeuchtung“ der Energieumsatz deutlich höher ist als in der Betriebsart „nur Entfeuchtung“.

Die mittleren (Jahres-)Leistungszahlen $\text{COP}_{\text{thermisch}}$ für die beiden Betriebsarten „nur Entfeuchtung“ und „Kühlung + Entfeuchtung“ liegen deutlich niedriger als der in Bild 13 gezeigte Wert, denn in Bild 13 wird $\text{COP}_{\text{thermisch}}$ für alle 3 Betriebsarten berücksichtigt. Dort kommt ein Anteil der Betriebsart „nur Kühlung“ hinzu. Diese Betriebsart liefert einen Nutzen Δh_{Luft} , ohne dass dafür thermische Energie $Q_{\text{Fernwärme}}$ aufgewendet werden muss.

Die Jahresarbeitszahl JAZ für einzelne Betriebsarten ist strenggenommen eine mittlere Leistungszahl für die jeweilige Betriebsart entsprechend Gleichung (3). Die „wahren“ Jahresarbeitszahlen $\text{JAZ}_{\text{thermisch}}$ nach Gleichung (9) und $\text{JAZ}_{\text{primär}}$ nach Gleichung (10) liegen bei 4,9 bzw. 1,3 und bilden damit jeweils den (gewichteten) Durchschnittswert der mittleren Leistungszahlen.

Bei freier Lüftung beträgt die Anlagenstromkennzahl 0.43 W/(m³/h). Dieser Wert liegt deutlich unter den in DIN 18599, Teil 7 formulierten Standardwerten. Die Standardwerte sind unterteilt in Abluftventilatoren 0.35, Zuluftventilatoren mit Erwärmung 0.44 und Zuluftventilatoren mit (Teil-)Klimaanlagen 0.56 W/(m³/h). Diese Standardwerte kombiniert für eine Zu-/Abluftanlage liegen bei 0.79 W/(m³/h) mit Erwärmung und bei 0.91 W/(m³/h) mit (Teil-) Klimaanlagen.

3.5 Vergleich mit einer Referenzanlage

In der Bewertung der Energieeffizienz stehen wir vor dem Problem, dass eine klare Zuordnung „Diese Technik ist besser als eine andere Technik.“ oder „Diese Anlagentechnik erreicht eine Jahresarbeitszahl von 3,2.“ nicht ohne weiteres möglich ist.

Während viele Einzelkomponenten unter festgelegten Randbedingungen bewertet werden, ist dies bei komplexen Systemen kaum noch möglich. So werden beispielsweise Leistungszahlen von Wärmepumpen unter Laborbedingungen für die Betriebszustände „kalte Seite 0 / 10°C“ und „warme Seite 35 / 55°C“ bestimmt. Bei Lüftungs- bzw. Klimaanlage können zwar auch Auslegungszustände für Außenluft „32°C und 60% rel. Feuchte“, Abluft „26 °C und 12 g/kg abs. Feuchte“ und Zuluft „22 °C und Feuchte nach Anforderung“ definiert werden, diese sind aber von Projekt zu Projekt neu zu vereinbaren.

Hier wird daher der folgende Weg gewählt: Nicht die Technik, sondern die Anlage vor Ort wird mit einer Referenzanlage verglichen.

Dazu wird die Leistungszahl in zwei Betriebspunkten aus den Messwerten berechnet und mit zwei Referenzanlagen (Rechenwerte) verglichen:

- Betriebspunkt „25.05.2007“ (nahezu stationärer Anlagenbetrieb):
Luftvolumenstrom: 8.000 m³/h
AU Außenluft: 29,9°C und 43% rel. Feuchte
ZU Zuluft: 20,5°C und 53% rel. Feuchte
AB Abluft: 25,6°C und 45% rel. Feuchte
FO Fortluft: 23,0°C und 87% rel. Feuchte (für Vergleich nicht relevant)
- Betriebspunkt „15.08.2007“ (nahezu stationärer Anlagenbetrieb):
Luftvolumenstrom: 8.000 m³/h
AU Außenluft: 30,8°C und 47% rel. Feuchte
ZU Zuluft: 22,5°C und 61% rel. Feuchte
AB Abluft: 30,8°C und 47% rel. Feuchte
FO Fortluft: 24,1°C und 88% rel. Feuchte (für Vergleich nicht relevant)

Für diese Betriebszustände (also keine Auslegungszustände) kann die LiquiSorp-Anlage (Messwerte) mit Referenzanlagen (Rechenwerte) verglichen werden.

Tabelle 5: Nutzenergie, Ressourcenverbrauch und Energieeffizienz für zwei ausgesuchte Betriebspunkte für den Vergleich mit Referenztechnologien. Die Werte beschreiben den 10-Minuten-Mittelwert. Für einen überschlägigen Vergleich mit den Werten aus Tabelle 3, Spalte „Khlg.+Entfg.“ müssen diese Zahlen also mit 6 multipliziert werden. (Die Tabelle zeigt nur die Werte, die für einen Vergleich mit der Referenzanlage herangezogen werden.)

	Model	Betriebspunkt 25.05.2007	Betriebspunkt 15.08.2007	Betriebspunkt 25.05.2007 Kombination ¹	Betriebspunkt 15.08.2007 Kombination ¹
Enthalpieänderung der Luft in kWh	- 2,08	- 7,22	- 6,45	- 7,22	- 6,45
Stromverbrauch nur Sorption in kWh	0,53	1,00 ²	0,00 ²	0,53	0,53
Fernwärmeverbrauch Soleerwärmung in kWh	2,06	3,73	0,076	3,73	2,07
$COP_{thermisch}[W_N/W_A]$	1,01	1,93	84,96 ³	1,93	3,12
$COP_{primär}[W_N/W_{A,p}]$	0,69	1,29	121,37 ³	1,71	2,12

¹ „Kombination“ bedeutet das einzelne Werte nach dem Modell (siehe oben) berechnet werden.

² Der Stromverbrauch der Anlage wird in 1 kWh-Schritten aufgezeichnet. Dieses Intervall kann zufällig in diese Zeiträume fallen oder nicht. Der wahre Wert des Stromverbrauchs liegt entweder höher oder niedriger.

³ Rein rechnerisch sind diese Werte so hoch, da kaum Wärmeverbrauch und kein Stromverbrauch ermittelt werden konnte.

Die Energieeffizienz wird für die beiden folgenden Referenztechnologien berechnet:

- „AdsolairPlus“: Lüftungsgerät mit adiabater Kühlung und integrierter Kompressionskälteanlage mit Oberflächenkühler zur Entfeuchtung.

Gerechnet wird mit adiabater Kühlung im Sommerbetrieb, Kühlung und Entfeuchtung über die integrierte Kompressionskälteanlage (Zuluftverdampfer) und Nacherwärmung über das Heizregister (40/22°C) unter Nutzung der Kondensationswärme der Kompressionskälteanlage. Der COP wird hier mit 5 angenommen.

- „Vergleichsgerät“: Lüftungsgerät einfache Baureihe mit einfachem Kreuzstrom-WRG sowie konventionellem Kühl- und Heizregister mit externer Medienversorgung.

Gerechnet wird mit Kühlrückgewinn im Sommerbetrieb, Kühlung und Entfeuchtung über das Kühlregister (6/12°C) und Nacherwärmung über das Heizregister (70/50°C).

Hinweis: Neben dem eigentlichen Aufwand zur Enthalpieänderung der Zuluft (Kühlen und Entfeuchten) sind auch der Mehrstromverbrauch für Hilfsantriebe und der zusätzliche Stromverbrauch für die Ventilatoren zur Überwindung des höheren Druckverlustes zu berücksichtigen. Diese Zahlen liegen sowohl für die LiquiSorp-Anlage aus Messwerten als auch aus der Auslegungsrechnung vor. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird dieser Mehrverbrauch jedoch weder in den Messwerten (Tabelle 5) noch für die beiden Referenzanlagen berücksichtigt.

Tabelle 6: Leistungszahlen im Vergleich.

	Betriebspunkt 25.05.2007		Betriebspunkt 15.08.2007	
	$COP_{\text{thermisch}} [W_N/W_A]$	$COP_{\text{primär}} [W_N/W_{A,p}]$	$COP_{\text{thermisch}} [W_N/W_A]$	$COP_{\text{primär}} [W_N/W_{A,p}]$
LiquiSorp-Anlage ¹	1,93	1,71	3,12	2,12
AdsolairPlus	---	1,26 ²	---	2,02 ³
Vergleichsgerät	---	0,49 ⁴	---	0,55 ⁵

¹ aus Tabelle 5.

² AdsolairPlus, 25.05.2007: Nutzen 24,9 kW sensibel, 19,9 kW latent. Aufwand: 0 kW adiabate Kühlung und 11,8 kW integrierte KKM zur Entfeuchtung, kein Hilfsstrombedarf, kein zusätzlicher Druckverlust, Primärenergie.

³ AdsolairPlus, 15.08.2007: Nutzen 22,1 kW sensibel, 16,8 kW latent. Aufwand: 0 kW adiabate Kühlung und 6,4 kW integrierte KKM zur Entfeuchtung, kein Hilfsstrombedarf, kein zusätzlicher Druckverlust, Primärenergie.

⁴ Vergleichsgerät, 25.05.2007: Nutzen 24,9 kW sensibel, 21,3 kW latent. Aufwand: 65,7 kW Kühler und 22,2 kW Heizung, kein Hilfsstrombedarf. $COP=2,5$ (all inclusive), Primärenergie.

⁵ Vergleichsgerät, 15.08.2007: Nutzen 22,0 kW sensibel, 18,4 kW latent. Aufwand: 51,4 kW Kühler und 15,3 kW Heizung, kein Hilfsstrombedarf. $COP=2,5$ (all inclusive), Primärenergie.

Fazit: In diesem Vergleich erreicht die LiquiSorp-Anlage die höchste Energieeffizienz. Der $COP_{\text{primär}}$ der LiquiSorp-Anlage ist in beiden Betriebspunkten deutlich höher als der $COP_{\text{primär}}$ des konventionellen Vergleichsgerätes. Der Vergleich zwischen der LiquiSorp-Anlage und AdsolairPlus fällt weniger deutlich aus: Im Betriebspunkt „15.08.2007“ zeigt sich, dass die LiquiSorp-Anlage nur eine unwesentlich höhere Leistungszahl erreicht als die Anlage mit integrierter Kompressionskältemaschine. Wird der höhere Druckverlust auf der Luftseite berücksichtigt, fällt der $COP_{\text{primär}}$ für die LiquiSorp-Anlage etwas niedriger aus als für AdsolairPlus. Die sorptionsgestützte Entfeuchtung ist also nur dann energetisch günstiger, wenn tatsächlich Abwärme als Antriebsenergie für die Desorption genutzt wird.

Hinweis: Dabei ist unbedingt zu berücksichtigen, dass hier ein realer Betrieb mit idealen Rechenwerten verglichen wird.

3.6 Ressourcenverbrauch in einem typischen Jahr

In Kapitel 3.5 wird die Leistungszahl der LiquiSorp-Anlage mit der Energieeffizienz von zwei Referenzanlagen verglichen.

Im Folgenden soll die Jahresarbeitszahl abgeschätzt werden. Dazu wird der Ressourcenverbrauch in einem typischen Jahr berechnet. Damit kann wiederum der Strom-, Wärme- und Wasserbedarf abgeschätzt werden und mit Standardsystemen verglichen werden. Auf dieser Basis wird die Wirtschaftlichkeit (Kapitel 5) berechnet.

Um den Ressourcenverbrauch in einem typischen Jahr bestimmen zu können, werden die Leistungszahlen aus Tabelle 4 auf das Testreferenzjahr 13 MANNHEIM angewendet. Dazu wird für das Testreferenzjahr bestimmt, wie oft welcher der 7 Betriebszustände (vgl. Tabelle 2 und Tabelle 3) auftritt. Mit den mittleren Leistungszahlen für diese Betriebszustände kann dann der Ressourcenverbrauch / -bedarf bestimmt werden, Tabelle 7.

Der Berechnung dieser Verbrauchs- bzw. Bedarfswerte liegt eine wichtige Randbedingung zugrunde: Die Betriebszustände im Jahr 2006/2007 sind repräsentativ für Betriebszustände im Testreferenzjahr. Das bedeutet, dass die mittleren Leistungszahlen für die einzelnen Betriebsarten übernommen werden können.

Der Stromverbrauch berücksichtigt den Hilfsstrombedarf für alle Aggregate und den zusätzlichen Ventilatorstromverbrauch zur Überwindung des erhöhten Druckverlustes in der SGK-Anlage. Im Stromverbrauch wird aber nicht der Stromverbrauch für die eigentliche Lüftungsanlage (Referenzwert „freie Lüftung“) berücksichtigt. Damit sind die beiden Anlagenkonzepte direkt miteinander vergleichbar.

Tabelle 7: Vergleich der LiquiSorp-Anlage mit einer konventionellen Klimaanlage mit Kompressionskältemaschine, Entfeuchtung über Taupunktunterschreitung und Nacherhitzung der Luft für das Testreferenzjahr 13.

	Strombedarf [MWh/a]	Wärmebedarf [MWh/a]	Wasserbedarf [m³/a]
LiquiSorp-Anlage	5,8	25,5	137
Konventionelle Klimaanlage	25,5	41,3	--- *

* Ohne Wasser für Betrieb eines Kühlturms.

Erwartungsgemäß liegt der Strombedarf der LiquiSorp-Anlage deutlich unter dem Strombedarf einer konventionellen Klimaanlage.

Interessanterweise liegt auch der Wärmebedarf deutlich unter dem Wärmebedarf einer konventionellen Klimaanlage. Das ist auf folgende Gründe zurückzuführen:

- Zwar wird für das KKM-Modell auch mit einem Wärmerückgewinnungsgrad η_{WRG} von 75% gerechnet. Die LiquiSorp-Anlage erreicht aber $\eta_{WRG}=87\%$. Differenz ca. 20 MWh/a..
- Der Wärmeverbrauch für den Desorptionsbetrieb wird durch das Modell unterschätzt. Im realen Betrieb liegt dieser Wärmeverbrauch fast doppelt so hoch. Differenz ca. 4 MWh/a.
- Grundsätzlich gilt: Je geringer die Entfeuchtungsbreite, desto effektiver arbeitet eine Entfeuchtung über Taupunktunterschreitung. Wegen der geringen Entfeuchtungsbreiten ist hier also die SGK-Anlage „im Vorteil“.

4 Betriebsbegleitende Optimierung

Die betriebsbegleitende Optimierung wurde auf Basis der täglichen Auswertung der gemessenen Rohdaten sowie der Versuche im Sommer 2006 und im Sommer 2007 vorgenommen. Die Visualisierung stellte sich dabei als sehr gutes Werkzeug zur Bewertung dynamischer Prozesse heraus.

Hinweis: Die Anlage bzw. der Anlagenbetrieb wurde also nur auf Basis der Messdaten und nicht mit Hilfe einer Anlagenmodellierung optimiert.

Im Sommer 2006 wurden ausschließlich Versuche zur Optimierung des Regenerationsbetriebs (Desorberbetrieb) durchgeführt. Im Sommer 2007 wurde der gesamte Sorptionsteil analysiert und optimiert.

Die Optimierung im Sommer 2007 zielt darauf ab, die Entfeuchtungsleistung zu erhöhen, ohne dass die Zulufttemperatur steigt. Dabei wird versucht, Energie einzusparen bzw. die Leistungszahl zu erhöhen und damit den gesamten Sorptionsprozess wirtschaftlicher zu gestalten.

Dabei spielt die Wärmeverschleppung (Optimierung des internen Sole/Sole-Wärmetauschers im Winter 2006/2007) und die Änderung der Regelungssequenzen (Prozessparameter für den Desorber in 2006 und für den Gesamtprozess in 2007) eine große Rolle.

Hinweis zur Regelungstechnik: Der Austausch der Sole im Sorptionskreis (geregelt durch die Variation der Pumpenanforderung) ist eine Regelungssequenz der Entfeuchtung und wurde gezielt erst im Sommer 2007 zur Optimierung geändert.

4.1 Versuche im Sommer 2006 zum Desorberbetrieb

Im ersten Sommer nach Inbetriebnahme wurden die ersten Versuche mit dem Ziel durchgeführt, den Regenerationsprozess der Sole im Desorber zu optimieren.

Grundsätzlich gilt: Der Desorberbetrieb kann nur durch eine abgestimmte (und iterative) Wahl der Prozessparameter Solemassenstrom, Soletemperatur und Luftvolumenstrom optimiert werden.

Versuchsplan: Im Versuchsplan stand als erste Stelle die Analyse des Energieverbrauchs des Desorbers in zwei verschiedenen Regelungsvarianten.

- Bei der ersten Variante wurden die Regelungssequenzen in der Reihenfolge Luftvolumenstrom, Soletemperatur und Solemassenstrom durchfahren.
- Bei der zweiten Variante wurden die ersten beiden Sequenzen getauscht, Soletemperatur, Luftvolumenstrom und Solemassenstrom war dann die Reihenfolge.

Bei beiden Varianten wurde der Solemassenstrom als letzte Sequenz gefahren. Ergebnisse gab es keine da die Entfeuchtung aufgrund der Außenbedingungen nicht angefordert wurde und auch die Wärmemengenzähler noch keine vernünftigen Werte lieferten.

Fazit: Da zur Luftförderung Strom verbraucht wird – und im Sommer aufgrund der Netzüberlastung ein möglichst geringer Stromverbrauch erreicht werden soll – und die Soletemperaturerhöhung durch Fernwärme bereitgestellt wird – und im Sommer aus der Kraft-Wärme-Kopplung ohnehin zur Verfügung steht – werden weitere Ver-

suche mit der zweiten Variante durchgeführt: Temperatur – Volumenstrom – Solemassenstrom.

Eine Sonderumstellung des Absorbersolemassenstroms wurde aufgrund der zu hohen Zulufttemperatur durchgeführt. Die Anforderung der Absorbersolepumpe wurde verringert um ein zu starkes Erhitzen der Luft zu vermeiden.

Die Optimierung sollte sich unter diesen Randbedingungen also zunächst auf die Variation der Prozessparameter konzentrieren. Auch die Variation des Luftvolumenstroms führte aufgrund fehlender Entfeuchtungsanforderung zu keinem Ergebnis.

Die folgende Auswertung beschäftigt sich mit dem Solemassenstrom und -temperatur. Diese beiden Parameter wurden im Desorberbetrieb variiert und die Regeneration analysiert:

- Temperatur der Desorption [°C] und
- Sole-Massenstrom durch den Desorber [kg/s] bzw. Anforderung der Desorber-Solepumpe [%].

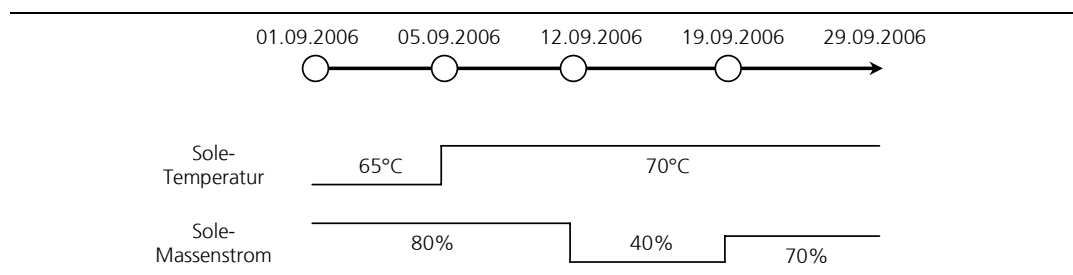


Bild 15: Versuchsdurchführung – Variation der Betriebsparameter für die Desorption.

Der Luftvolumenstrom durch den Desorber [m³/h] ändert sich entsprechend der Regelung, wurde aber in dieser Zeit nicht gezielt variiert.

Vor Versuchsdurchführung wurde ein Versuchsplan für den September 2006 aufgestellt und zwischen den Partnern abgestimmt, in dem die Änderungen der Regelung und der zeitliche Verlauf dokumentiert wurden.

Bild 16 stellt ein so genanntes Carpet-Plot dar, in dem diese Parameteränderungen im September 2006 in Schwarz im Versuchszeitraum eingezeichnet sind: Orange gekennzeichnet sind Anfang und Ende eines Anlagenstillstandes. Ausgewertet wird hier der Zeitraum vom 01.09.2006 bis zum 29.09.2006.

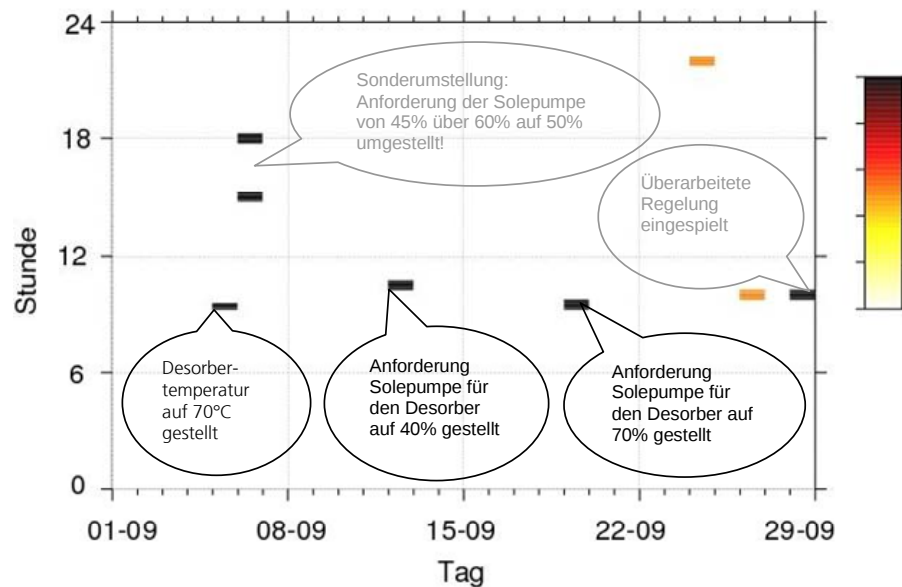


Bild 16: Carpet-Plot mit Zeitpunkten, zu denen ein Parameter geändert wurde. Ein Carpet-Plot wird wie eine 3D-Graphik gelesen, auf der Y-Achse sind die Stunden, auf der X-Achse die Tage und auf der Z-Achse, hier in Form einer Farbskala, sind die Werte des Datenpunkts dargestellt.

Betrieb des Desorbers im Versuchszeitraum

In Bild 17 ist die Klappenstellung des Desorbers dargestellt, hier erkennt man die Zeiträume in Schwarz, in denen der Desorber in Betrieb war. Der Desorberbetrieb wird angefordert, wenn im Absorber die Solekonzentration soweit absinkt, dass die gewünschte Entfeuchtungsleistung nicht mehr erbracht wird. Aus diesem Grund deckt sich der Desorberbetrieb (z.B. am 04. und 05.09.006) mit hohen absoluten Außenluftfeuchten.

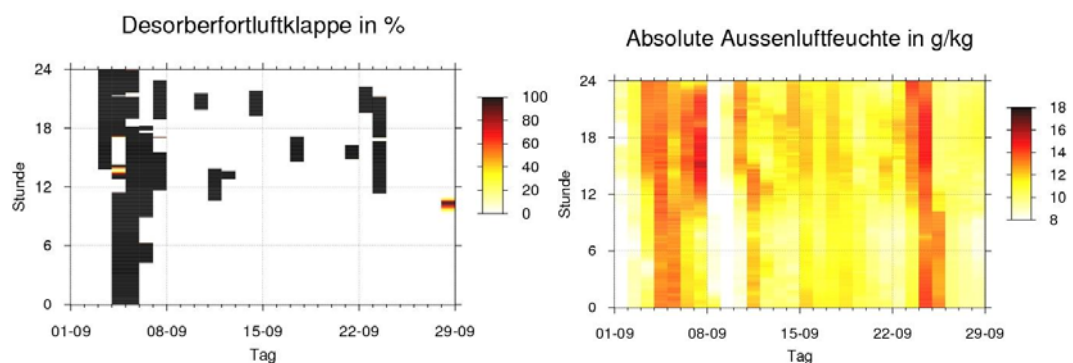


Bild 17: Carpet-Plot der Klappenstellung und der Absoluten Außenluftfeuchte.

Änderung der Soletemperatur (Versuch)

Bis zum 05.09.2006 um 9:30 Uhr war die maximale Soletemperatur im Desorber auf 65 °C eingestellt, danach wurde sie auf 70 °C erhöht. Diese Temperaturniveaus sind in Bild 18 (links) gut zu erkennen.

Der Regenerationsprozess wird mit festen Solevolumenströmen gefahren. Der Solevolumenstrom wird über die Anforderung der Solepumpe im Desorber geregelt, Bild 18 (rechts).

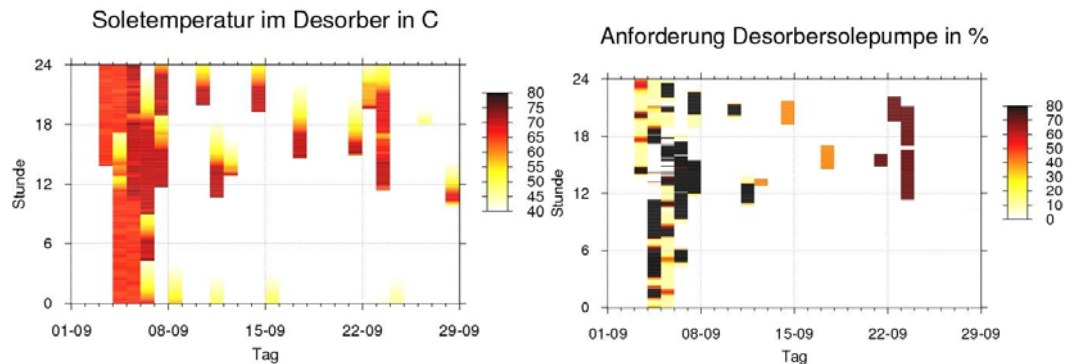


Bild 18: Carpet-Plot der Soletemperatur im Desorber und der Anforderung der Desorbersolepumpe.

Die ausgetriebene Wassermasse aus der Sole [kg/min] im Desorber hängt sehr stark von der Soletemperatur ab, Bild 19.

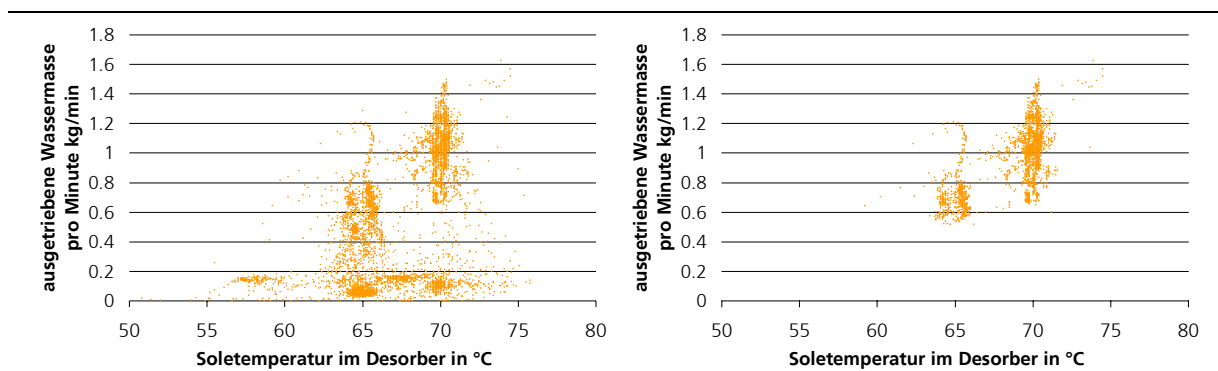


Bild 19: Ausgetriebene Wassermasse und Soletemperatur im Desorber. Links: Alle Messdaten. Rechts: Nur Messdaten für den Volllastbetrieb.

Mit höherer Temperatur kann eine größere Wassermasse ausgetrieben werden:

- Soletemperaturen unter 55°C reichen nicht aus, um die Sole zu regenerieren. Die Entfeuchtungsleistung sinkt unter 0,2 kg/min.
- Bei Soletemperaturen um 65°C (und einer Anforderung von 80% an die Solepumpe für den Desorber) liegt die Entfeuchtungsleistung zwischen 0,6 und 1,2 kg/min.
- Bei Soletemperaturen um 70°C liegt die Entfeuchtungsleistung - abhängig vom Sole-Massenstrom (vgl. Bild 20) – zwischen 0,8 und 1,4 kg/min.

Anforderung an die Solepumpe für den Desorber (Versuch)

Der Sole-Massenstrom durch den Desorber [kg/s] bzw. die Anforderung an die Solepumpe [%] für den Desorber wurde am 12.09.2006 um 10:30 auf den festen Wert von 40 % gestellt und am 19.09.2006 um 9:30 auf 70 % erhöht, vgl. Bild 18 (rechts).

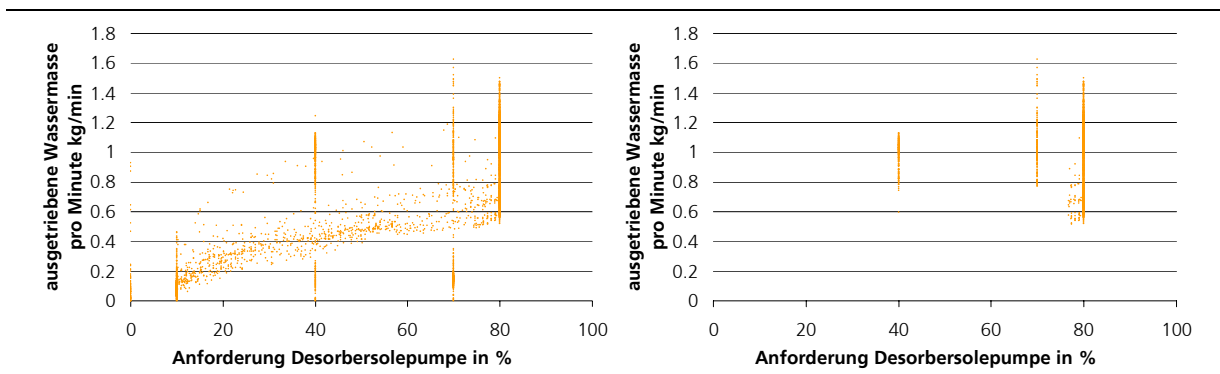


Bild 20: Ausgetriebene Wassermasse und Anforderung der Solepumpe für den Desorber. Links: Alle Messdaten. Rechts: Nur Messdaten für den Volllastbetrieb.

Mit einem höheren Sole-Massenstrom – und damit verbunden einer höheren Wärmeleistung und einem besseren Wärmetransport in der Schüttung – kann eine größere Wassermasse ausgetrieben werden:

- Bei einer Anforderung von 40% (und einer Soletemperatur von 70°C) liegt die Entfeuchtungsleistung zwischen 0,8 und 1,1 kg/min.
- Bei einer Anforderung von 70% (und einer Soletemperatur von 70°C) liegt die Entfeuchtungsleistung zwischen 0,9 und 1,3 kg/min.
- Bei einer Anforderung von 80% liegt die Entfeuchtungsleistung – abhängig von einer Sole-Temperatur von 65 bzw. 70°C (vgl. Bild 19) – zwischen 0,6 und 1,5 kg/min.

Volumenstrom im Desorber (aus der Regelung)

Der Desorber wird immer mit 450 m³/h angefahren. Mit der Entfeuchtungsanforderung muss auch der Volumenstrom (hier bis zu 3.500 m³/h) steigen. Das ist entsprechend in der Regelung implementiert, Bild 21 (links).

Bild 21 (rechts) zeigt, dass die Auffeuchtungsleistung im Desorber Maximalwerte von bis zu 30 g/kg erreicht.

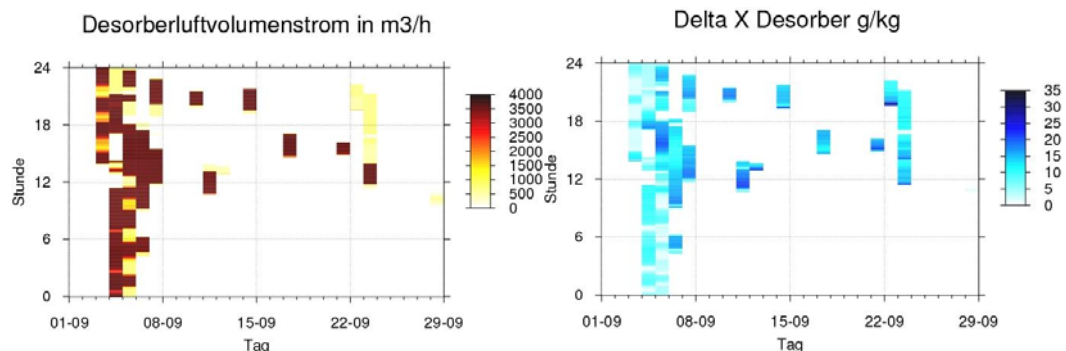


Bild 21: Carpet-Plot des Luftvolumenstroms der Regeneration und die Auffeuchtung im Desorber.

Bild 22 zeigt deutlich („vertikale Linie“), dass der Desorber fast immer mit einem Luftvolumenstrom von 450 bzw. 3.500 m³/h betrieben wurde, also meist die Minimal- / Maximalwerte annimmt und selten im Zwischenbetrieb gefahren wird.

Die Entfeuchtungsleistung variiert in diesem Betriebspunkt bei Volllast entsprechend der Einstellung von Soletemperatur und Sole-Massenstrom zwischen 0,6 und 1,5 kg/min.

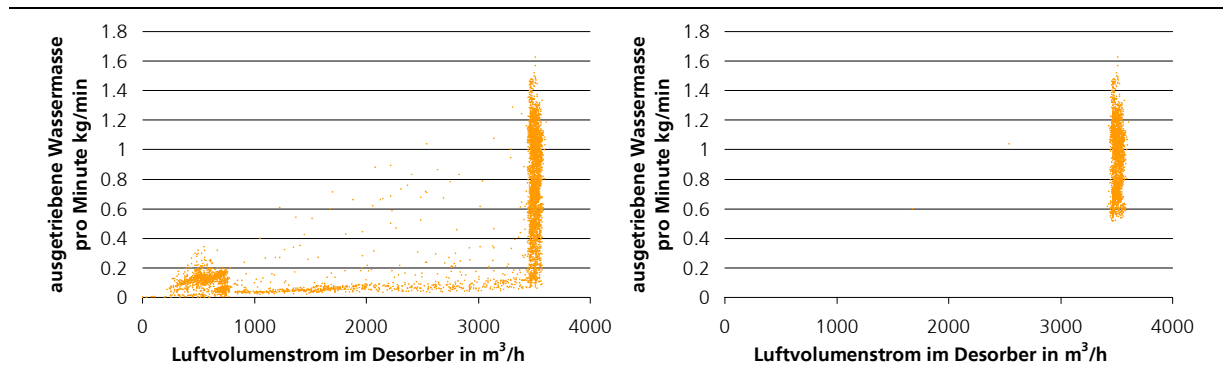


Bild 22: Ausgetriebene Wassermasse und Luftvolumenstrom im Desorber. Links: Alle Messdaten. Rechts: Nur Messdaten für den Volllastbetrieb.

Erwartungsgemäß steigt die Entfeuchtungsleistung stark mit der Soletemperatur und dem Luftvolumenstrom durch den Desorber und etwas weniger stark ausgeprägt mit dem Sole-Massenstrom durch den Desorber.

Auswertung: Entfeuchtungsleistung im Absorber und Zulufttemperatur

Eine Anforderung an SGK-Anlagen ist es, bei der Entfeuchtung mit Desorptionsbetrieb (Also im stationären Betrieb, wenn Absorber und Desorber gleichzeitig in Betrieb sind.) hohe Zulufttemperaturen zu vermeiden.

Bild 23 zeigt die Entfeuchtungsleistungen im Absorber für den Versuchszeitraum im September 2006. Die hohen Entfeuchtungsleistungen von bis zu 5 g/kg haben die Erwartungen erfüllt und bestätigen die Auslegung der Anlage.

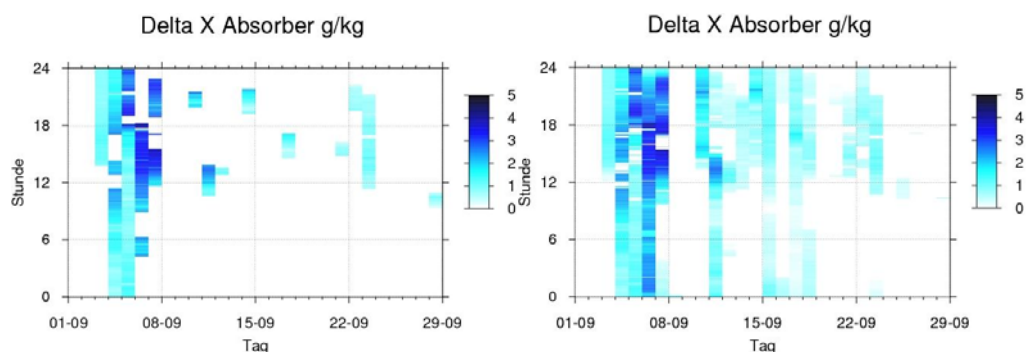


Bild 23: Entfeuchtungsleistung des Absorbers. Links: Messdaten nur bei Desorberbetrieb. Rechts: Alle Messdaten bei Absorberbetrieb.

Bild 24 zeigt, dass die Zulufttemperatur an feuchten Tagen (04. bis 07.09.2006) bis zu 30 °C ansteigt. Dies ist in erster Linie auf die „Schleppwärme“ aus dem Desorber im stationären, zeitgleichen Betrieb von Absorber und Desorber zurückzuführen. Außerdem wurde im Sommer 2006 die Sole im Absorberkreis noch nicht optimal gekühlt.

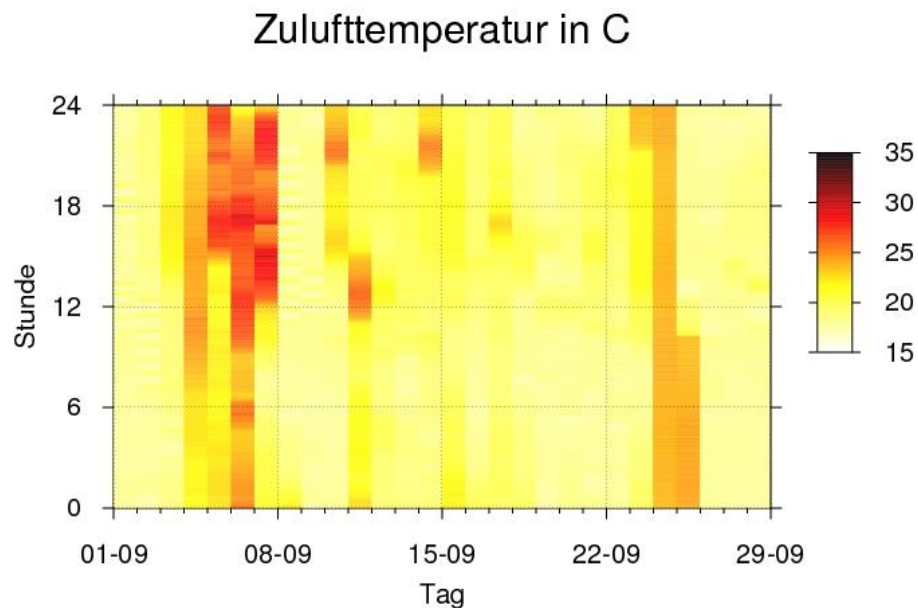


Bild 24: Zulufttemperatur im Versuchszeitraum.

Zwischenfazit „September 2006“

Der Desorberbetrieb kann durch die Versuche als Funktion von Sole-Temperatur, Sole-Massenstrom und – eingeschränkt – Luftvolumenstrom durch den Desorber charakterisiert werden.

Die Entfeuchtungsleistungen im Absorber entsprechen den Erwartungen. Allerdings sind die Zulufttemperaturen zu hoch.

Dazu wurde einerseits die Regelung überarbeitet. Die neuen Algorithmen wurden im Herbst 2006 implementiert. Andererseits konnte im Winter 2006 / 2007 die Anlage auch technisch optimiert werden, um – bei gleich hoher Entfeuchtungsleistung - hohe Zulufttemperaturen zu vermeiden. Der UA-Wert des Wärmerückgewinners im Soletauscherkreis wurde verbessert und der Solekühler im Absorber von einem Biofilm gereinigt.

4.2 Versuche im Sommer 2007 zum Sorptionsprozess

Im Sommer 2007 wurde die Entfeuchtung mit den im Vorjahr implementierten Regelungsänderungen für die Desorption und dem von menerga optimierten Wärmerückgewinner im Soleaustauschkreis getestet.

Die Versuche im Sommer 2007 sollten entsprechend einer ähnlichen Versuchsplanung wie im Sommer 2006 durchgeführt werden. Anlagentechnische und messtechnische Probleme sowie eine ungünstige Witterung erforderten mehrmals schnelle Entscheidungen. Dieses situative Vorgehen lieferte trotz der ungünstigen Randbedingungen gute Ergebnisse zur Optimierung des Sorptionsprozesses.

Sommerbetrieb, mit anlagentechnischen Problemen im Juni / Juli

Anfänglich konnte die Absorptionswärme im Absorber noch nicht abgeführt werden, da der Solekühler des Absorbers von der Herstellerfirma in den Wintermonaten zur Reinigung ausgebaut wurde. Bei der Reinigung wurde der Kühler beschädigt

und es wurde vorerst nur ein zu kleiner Wärmetauscher geliefert, der die geforderte Kühlleistung nicht übertragen konnte. Dies führte (wie im Sommer 2006) zu verhältnismäßig hohen Zulufttemperaturen bei hoher Entfeuchtungsleistung.

Nach Wiedereinbau des Sole/Sole-Wärmetauschers Ende März, musste im Juli 2007 die Hardware zur Füllstandsmessung und zur Konzentrationsmessung der Sole im Sorptionsteil repariert werden. Zudem musste ein defektes Ventil ausgetauscht werden.

Anfang Juni 2007 bis Mitte Juli 2007 kam es zu mehreren Ausfällen der Messtechnik und der redundant laufende Messrechner des Fraunhofer ISE wurde nachgerüstet.

Trotz dieser Probleme war die Anlage zu jeder Zeit betriebsbereit.

Bild 25 (links) zeigt den Absorber- bzw. Entfeuchtungsbetrieb. Die Entfeuchtung war von Ende Juni bis Mitte Juli 07 nicht aktiv, da die Außenluftbedingungen in dieser Zeit keine Entfeuchtung (rechts) erforderlich machten.

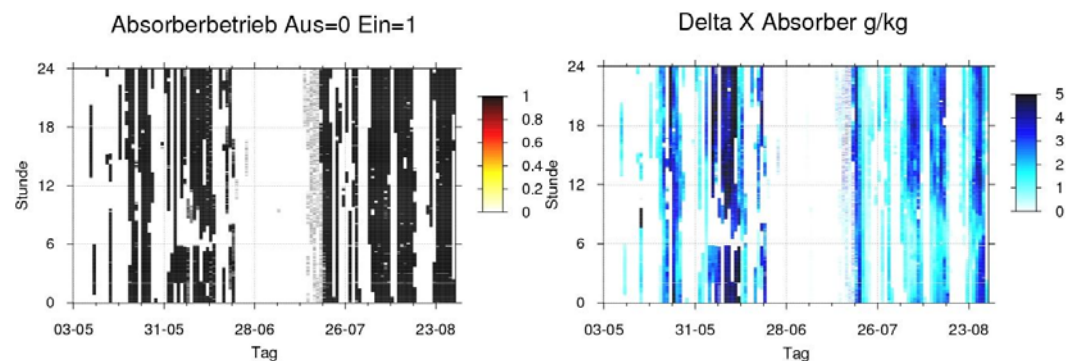


Bild 25: Entfeuchtungsbetrieb (links) und erreichte Entfeuchtungsleistung (rechts) im Sommer 2007.

Versuch 1: Versuche zur Entfeuchtungsanforderung im Juni / Juli 2007

Sollwerte der Abluftfeuchte liegen bei 11 g/kg und 52 %, Standardwerte für die Raumlftfeuchte. Vom 04.05.2007 bis 13.06.2007 wurde die Anlage mit erhöhten Entfeuchtungsanforderungen (mit 9 g/kg und 45 %) betrieben, um mehr und aussagekräftigere Messdaten für den Entfeuchtungsbetrieb zu erhalten.

In der Woche vom 10.06.2007 bis 17.06.2007 ist die Änderung der Entfeuchtungsanforderung sehr deutlich in der Entfeuchtungsleistung zu erkennen, Bild 26 (rechts). Über einen längeren Zeitraum (vom 10.06.2007 bis 13.06.2007) werden Entfeuchtungsleistungen von mehr als 5 g/kg erreicht, obwohl die Anlage nicht auf diese Entfeuchtungsanforderung ausgelegt ist. Am 13.06.2007 wurde die Anforderung wieder um 2g/kg auf den Standard-Sollwert geändert.

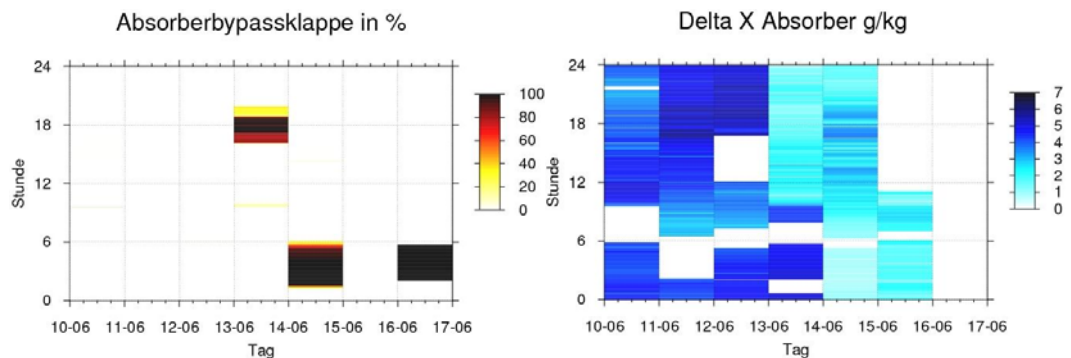


Bild 26: Klappenstellung der Absorberbypassklappe (links) und Entfeuchtungsleistung (rechts).

Bild 27 zeigt, dass in dieser Woche die Zuluft immer dann über 20 °C steigt (links), wenn viel Sole zwischen Absorber und Desorber ausgetauscht wird (rechts). Durch die hohe Entfeuchtungsleistung des Absorbers ist die Absorptionsenthalpie und – wegen des zu kleinen Sole/Sole-Wärmetauschers – damit auch die „Schleppwärme“ aus dem Desorber so groß, dass die Sole im Absorber nicht ausreichend gekühlt wird. Die Zuluft wird im Absorber also nicht nur getrocknet, sondern auch erwärmt. Dieser Zustand ergab sich unter verschärften Entfeuchtungsanforderungen die im normal betrieb so nicht vorkommen und für die diese Anlage nicht ausgelegt wurde.

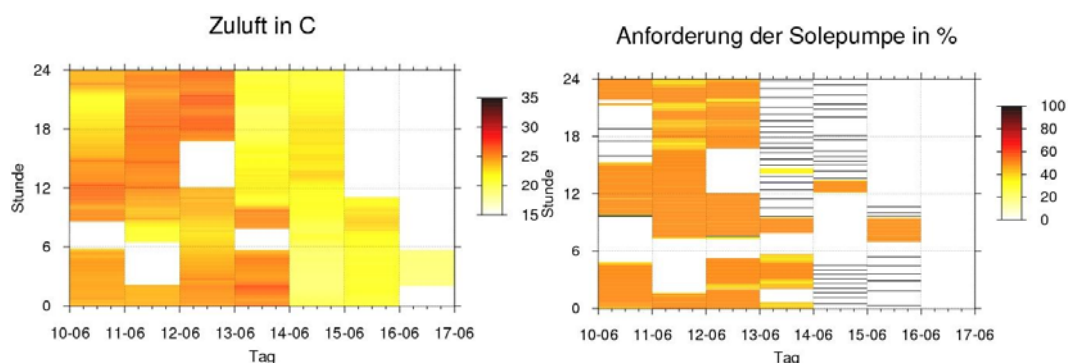


Bild 27: Zulufttemperatur (links) und Anforderung der Soleaustauschpumpe (rechts).

In Bild 26 ist Mitte der Woche (dunkelblau → hellblau, am 13.06.2007, mittags) die Umstellung der Entfeuchtungsanforderung zu erkennen, da die Entfeuchtungsleistung sinkt. Und in Bild 27 entsprechend die niedrigeren Zulufttemperaturen (orange → gelb, am 13.06.2007, mittags). Die Solepumpe erhält wegen der geringeren Entfeuchtungsanforderung (höhere Zuluftfeuchte) keine Anforderung mehr, vgl. Bild 27 (rechts).

Zwischenfazit „Juni 2007“

Bei höheren Entfeuchtungsanforderungen (kein Auslegungszustand) nimmt die Zuluft noch zu hohe Temperaturen an, denn die Schleppwärme aus dem Desorber kann nicht abgeführt werden.

Bei normalen Entfeuchtungsanforderungen (Auslegungszustand) liegt die Zulufttemperatur bei normalen Werten ein.

Versuch 2: Optimierung der Entfeuchtungsregelung im August 2007

Die Regelung wurde auf Basis dieser Erfahrungen im August 2007 noch einmal angepasst. Da im August 2007 die Außenluft verhältnismäßig trocken war (siehe Bild 28), wurde vom 03.08.2007 bis 27.08.2007 die Entfeuchtungsanforderung nochmals zu niedrigeren Sollwerten geändert, um die Anlage im Sorptionsbetrieb betreiben und optimieren zu können.

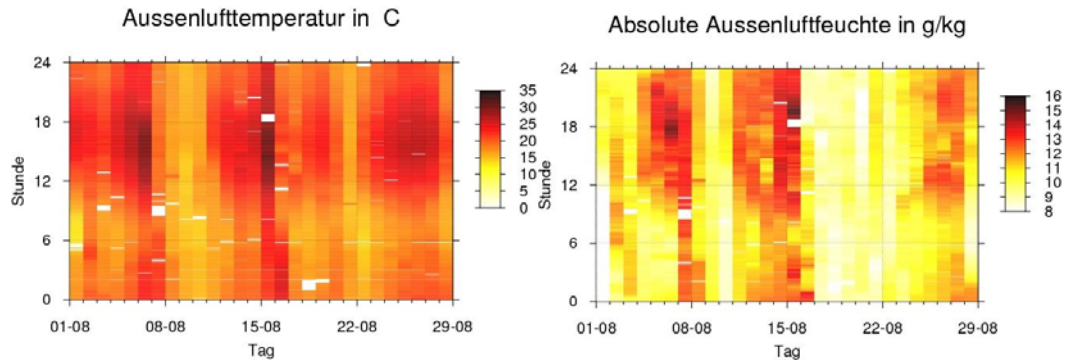


Bild 28: Aussenlufttemperatur (links) und absolute Aussenluftfeuchte (rechts).

Am 06.08.2007 und 07.08.2007 wurde die Entfeuchtungsregelung grundlegend geändert und am 14.08.2007 wurde die Anforderung der Solepumpe des Absorbers wieder erhöht, vgl. Bild 28. In Bild 29 sind die Regelungsänderungen auf einer Zeit-
 leiste aufgezeigt. Mit diesen Änderungen konnten die Entfeuchtungsleistung und die Kühlung der Sole des Absorbers stark verbessert werden.

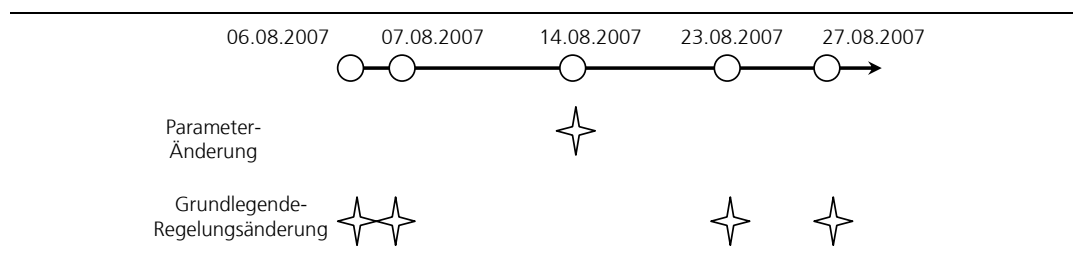


Bild 29: Zeitleiste der Änderungen – Parameter- oder Regelungsänderung.

Aufgrund dieser grundlegenden Regelungsänderungen wurde die Zuluft sogar so weit abgekühlt, dass der Nacherhitzer angefordert wurde. Da beim Entfeuchtungsbetrieb bei SGK-Anlagen ein Erhitzen der Zuluft nicht gewünscht ist, wurde daraufhin die Regelung am 23.08.2007 und 27.08.2007 noch einmal überarbeitet. Ein zu starkes Kühlen und – damit verbunden – ein (ungewolltes) Nachheizen im Kühlbetrieb sollte vermieden werden.

Hinweis: Der Parameter „Konzentrationsdifferenz zwischen Absorber und Desorber“ als Sollwert für die Regelung zum Austausch der Sole wurde am 23.08.2007 implementiert. Ein fester Wert konnte in der LiquiSorp-Anlage unter verschiedenen Randbedingungen bis heute nicht getestet werden.

Im Folgenden werden die Betriebszustände im der Monat August diekutiert, weil hier entscheidende Änderungen statt gefunden haben.

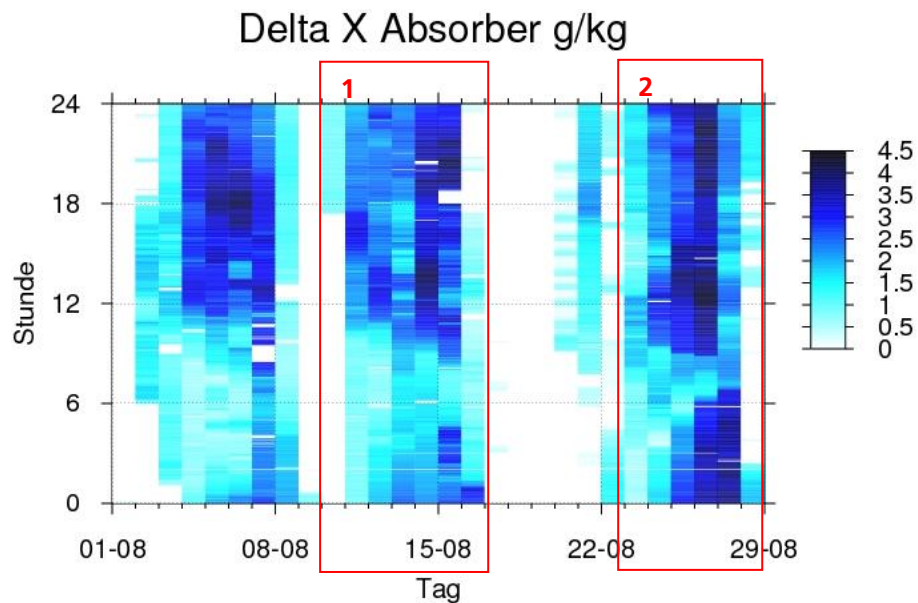


Bild 30: Entfeuchtungsleistung des Absorbers im August 2007

Bild 30 zeigt in den beiden markierten Zeiträumen gleich hohe Entfeuchtungsleistungen. In diesen Zeiträumen unterscheidet sich die absolute Außenluftfeuchte deutlich: Zeitraum (1) größer 12 g/kg und Zeitraum (2) kleiner 12 g/kg, vgl. Bild 28 (rechts). Die Entfeuchtungsleistung nimmt identische Werte an da der maximale Solemassenstrom am 14.08.2007 von 50 % auf 80 % geändert wurde, Bild 31 (rechts).

Bild 31 (links) zeigt, dass die Zulufttemperaturen sich in den beiden Zeiträumen kaum unterscheiden.

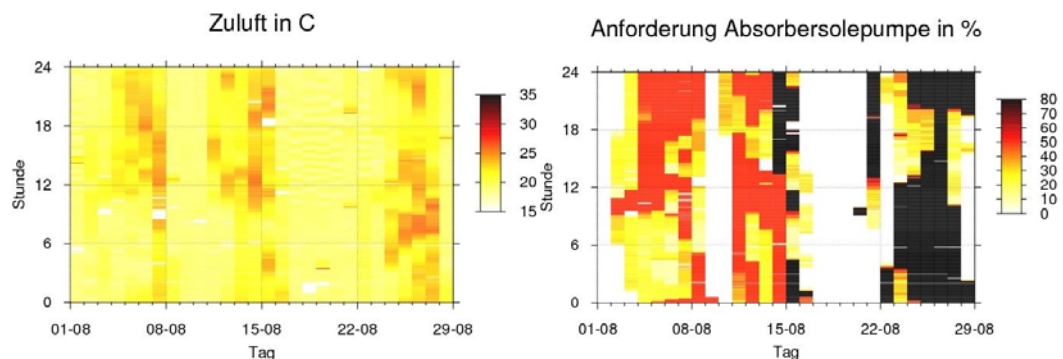


Bild 31: links ist die Zulufttemperatur; rechts die Anforderung der Absorbersolepumpe

Unabhängig von der absoluten Außenluftfeuchte kann also in beiden Zeiträumen eine nahezu gleich hohe Entfeuchtungsleistung bei nahezu gleichen Zulufttemperaturen erreicht werden. (Dies wurde erreicht durch die Änderung der Regelungssequenzen am 07.08.2007 und im speziellen durch die Erhöhung des Solemassenstroms im Absorber am 14.08.2007.)

Hinweis: Entfeuchtung bei niedrigeren Außenfeuchten stellt eine höhere Anforderung an den Sorptionstechnik als bei höheren Außenfeuchten.

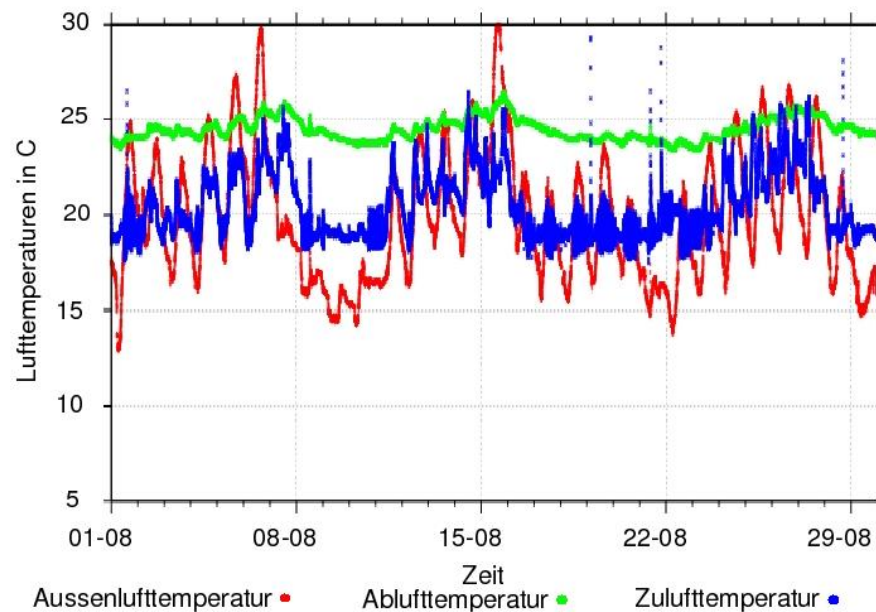


Bild 32: Lufttemperaturen der SGK-Anlage

In Bild 32 sind die Aussenluft- (rot), die Ab- (grün) und die Zulufttemperaturen (blau) der LiquiSorp-Anlage für August 2007 dargestellt. Am 27.08.2007 wurde die Entfeuchtungsanforderung wieder auf Normalwerte (11g/kg absolute Abluftfeuchte und 52% relative Abluftfeuchte) gestellt. Die Umstellung ist im Diagramm deutlich erkennbar: Die Zulufttemperatur sinkt.

4.3 Fazit

Durch die Versuche im Sommer 2006 zur Optimierung der Regeneration der Sole und die Versuche im Sommer 2007 zur Optimierung der Entfeuchtung der Luft konnte die Regelung der Pilotanlage stark verbessert werden.

Der Kühl- und Entfeuchtungsbetrieb konnte durch folgende wesentliche Änderungen optimiert werden:

- 2006: Schwerpunkt Desorber

Die Regelungssequenzen (Solemassenstrom, Soletemperatur und Luftvolumenstrom) des Desorbers wurden so eingestellt, dass eine Verbesserung des Regenerationsprozesses und des Energieverbrauchs erwartet wird.

Anlagentechnisch mussten keine Änderungen durchgeführt werden. Nur der interne Kunststoff-Wärmerückgewinner zwischen Absorber und Desorber wurde optimiert. Was zur Senkung der Soletemperatur vom Desorber zum Absorber geführt hat.

- 2007: Schwerpunkt Entfeuchtungsregelung

Im Sommer 2007 wurde die Entfeuchtungsregelung in ihrer Gesamtheit optimiert. In erster Linie galt es das Zusammenspiel zwischen Absorber und Desorber zu verbessern, um die Erwärmung der Zuluft zu verringern.

Es ist damit gelungen, bei gleichbleibender Entfeuchtungsleistung die Zulufttemperatur deutlich zu senken. Im Sommer 2006 wurde eine Zulufttemperatur von bis zu 30 °C erreicht, diese wurden im Sommer 2007 auf ca. 26 °C reduziert.

Die Zeiträume mit erhöhter Entfeuchtungsanforderung haben gezeigt, dass der Wirkungsgrad des internen Wärmetauschers eine große Rolle zur Einhaltung der Zulufttemperatur spielt. Um weitergehende Aussagen machen zu können, sollte die Anlage im Sommer 2008 im Auslegungszustand betrieben werden.

5 Wirtschaftlichkeit

Die Wirtschaftlichkeit wurde unter Anwendung der Annuitätsmethode der VDI 2067 für verschiedene Varianten betrachtet. Die Nutzungsdauer ist mit 20 Jahren und der Kapitalzins mit 5% angenommen. Die Annuitätsmethode berücksichtigt verschiedene Kostengruppen, wie kapitalgebundene Kosten (Kapitalkosten), betriebsgebundene Kosten (Betriebskosten), verbrauchsgebundene Kosten (Verbrauchskosten) und sonstige Kosten.

Hinweis: In der Wirtschaftlichkeitsrechnung wird im Folgenden von einem Strom-, Wärme und Wasserbedarf gesprochen, weil es sich um rechnerische Werte handelt. Die Modelle zur Berechnung der Bedarfskennwerte basieren auf den Verbrauchswerten aus dem Bewertungszeitraum 2006 / 2007. Hierzu werden die in Kapitel 3.4 „Energieeffizienz der SGK-Anlage“ vorgestellten COP-Modelle herangezogen.

- Die kapitalgebundenen Kosten sind der Anteil der Investitionskosten unter Berücksichtigung der Nutzungsdauer und des Kapitalzinses bezogen auf ein Betriebsjahr.
- Die betriebsgebundenen Kosten beinhalten jährliche Kosten für Wartung, für Instandhaltung, für Versicherung und für Verwaltung, diese werden anteilig der Investitionskosten berechnet und sind hier mit 1% der Investitionskosten angenommen.
- Die verbrauchsgebundenen Kosten werden durch den jährlichen Ressourcenverbrauch der einzelnen Varianten und den Kosten für Strom, Fernwärme und Wasser berechnet. Die Kosten für Ressourcen sind Richtpreise der badenova und sind generell ohne jährliche Anschlussgebühren aufgeführt, da diese bei allen Varianten in selber Höhe berücksichtigt werden müssen. Interessant wird die Anschlussgebühr für Kunden die durch Einsatz der SGK-Anlage Ihren sommerlichen Leistungspik im Stromverbrauch vermeiden und dadurch Ihre Gebühren senken können. Die Stromkosten wurden nach Angabe der Anschlussleistung und des jährlichen Strombedarfs mit 0.076 €/kWh angegeben. Die Preise für Fernwärme liegen bei 0.0618 €/kWh. Beim Wasser gibt es Einheitspreise, für Frischwasser liegt dieser Preis bei 1.72 €/m³ und für Abwasser bei 1.62 €/m³. Da das Frischwasser in der adiabatischen Verdunstungskühlung bei dieser Anlage zu ca. 50 % zum Abschleppen genutzt wird, berechnet sich der Wasserpreis aus Frischwasserpreis plus ½ mal Abwasserpreis ($1.72 + \frac{1}{2} \cdot 1.62 = 2.53$ €/m³).
- Sonstige Kosten werden in dieser Analyse für alle Varianten gleich hoch angesetzt und können deshalb vernachlässigt werden.

Zur Berechnung des jährlichen Ressourcenbedarfs der einzelnen Varianten wurden drei Grundmodelle betrachtet. Grundlage dieser drei Grundmodelle ist das Testreferenzjahr, um eine Vergleichbarkeit herzustellen.

1. Grundmodell I stellt eine Lüftungsanlage mit einer Wärmerückgewinnung (75%), einem Vorheizregister, einem Oberflächenkühler und einem Nachheizregister dar. Der Oberflächenkühler wird mit kaltem Wasser einer konventionellen Kompressions-Kälte-Maschine durchströmt, Bild 33. Der jährliche Energiebedarf der einzelnen Anlagenbauteile wurde anhand der DIN 18599 berechnet.

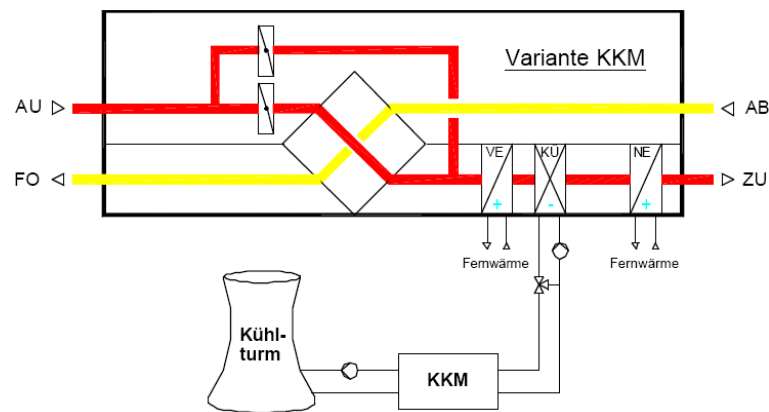


Bild 33: Schematische Darstellung zum Grundmodell I, [Mansfeld06]

2. Grundmodell II stellt die sorptionsgestützte Klimatisierungsanlage (Bild 34) mit einer Wärmerückgewinnung (75%), der Adiabaten Kühlung, dem Absorber, dem Heizregister und dem Desorber dar, Bild 33. Der jährliche Energiebedarf wird teilweise mit der DIN 18599 berechnet. Der Energiebedarf des innovativen Sorptionsteils wird mit einem Regressionsmodell berechnet. Das Regressionsmodell wurde im Rahmen der Diplomarbeit von Till Mansfeld [Mansfeld06] mit den Messdaten der SOBIC-Anlage aufgestellt.

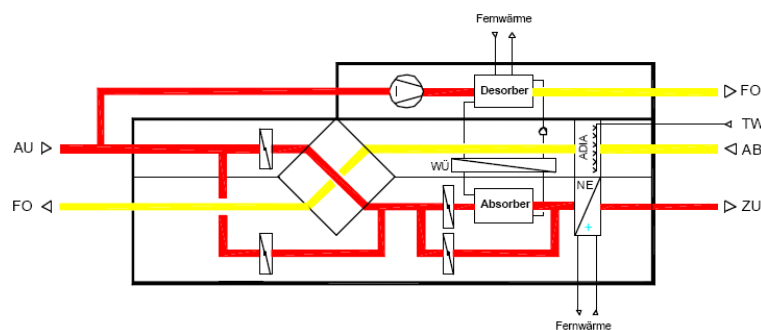


Bild 34: Schematische Darstellung zum Grundmodell II und III, [Mansfeld06]

3. Das Grundmodell III stellt auch die sorptionsgestützte Klimatisierungsanlage mit den identischen Einbauten wie Grundmodell II dar und wurde basierend auf den Messdaten der sorptionsgestützten Klimaanlage in der Uniklinik aufgestellt. Der Energiebedarf wurde mit den in Kapitel 3.4 ermittelten Stundenwerten des Ressourcenbedarfs der Betriebsarten berechnet. Die Betriebsstunden der einzelnen Betriebsarten wurden abhängig von den Außenbedingungen des Testreferenzjahrs ermittelt, wobei die Betriebsarten abhängig von den Außenbedingungen bestimmt werden.

Auf die drei Grundmodelle aufbauend wurden acht Varianten zur Analyse der Wirtschaftlichkeit aufgestellt und durch eine fortlaufende Nummer (NR) gekennzeichnet. Alle Varianten wurden ohne den Grundstromverbrauch der Ventilatoren und der Mess- und Regelungstechnik aufgestellt.

Hinweis: Es wird angenommen, dass der Grundstromverbrauch bei allen Varianten den gleichen Wert annimmt und kann damit im Vergleich vernachlässigt werden.

5.1 Variante 1 – 3

Die ersten drei Varianten basieren auf den Grundmodellen I, II und III. Die Investitionskosten der Anlagen der ersten drei Varianten wurden einem Vergleichsangebot der Firma AXIMA Suez GmbH aus der Planungsphase des Projektes entnommen.

In Tabelle 8 sind die drei ersten Varianten aufgeführt.

Variante 1 (KKM Model "V1"):

- Grundmodell I
- Keine Berücksichtigung des Grundstromverbrauchs
- Energiebedarf berechnet aus DIN 18599.

Variante 2 (SGK Model "V1.1"):

- Grundmodell II
- Keine Berücksichtigung des Grundstromverbrauchs und des Mehrstromaufwands der Ventilatoren durch den höheren Druckverlust der Anlage.
- Energiebedarf berechnet aus DIN 18599 und Regressionsmodell für Sorptionsteil [Mansfeld06].

Variante 3 (SGK Model "V2.1"):

- Grundmodell III
- Keine Berücksichtigung des Grundstroms, aber Berücksichtigung des Mehrstromaufwandes durch den höheren Druckverlust der Anlage. Der Mehrstromaufwand liegt bei dieser Anlage bei 5243 kWh pro Jahr.
- Energiebedarf wird berechnet mit Stundenwerten der Modellierung aus Kapitel 3.4 und der Betriebsstunden.

Tabelle 8: Wirtschaftlichkeitsberechnung der Varianten 1, 2 und 3

Wirtschaftlichkeitsberechnung der jeweiligen Varianten		NR	1	2	3
		ART	KKM Model "V1"	SGK Model "V1.1"	SGK Model "V2.1"
		INFO	Grundmodel I	Grundmodel II	Grundmodel III
Kostengruppe	Einheit				
Nutzungsdauer	a		20	20	20
Kapitalkosten					
Investitionskosten Gerät (Pauschal)	€		114969	145000	145000
Kapitalzins	%		5	5	5
Kapitalkosten	€/a		9225	11635	11635
Betriebskosten					
Wartungskosten-Anteil von Investitionskosten	%/100		0.01	0.01	0.01
Instandhaltungs-Anteil von Investitionskosten	%/100		0.01	0.01	0.01
Versicherungs-/ Verwaltungs-Anteil von Investitionskosten	%/100		0.01	0.01	0.01
Betriebskosten	€/a		3449	4350	4350
Verbrauchskosten	Energiebedarf				
Wärme Rückgewinner	kWh/a		168983	Keine Angaben	152419
Wärme Nacherhitzer	kWh/a		15393	25583	21556
Wärme Vorerhitzer	kWh/a		25928	0	0
Wärme Desorption Fernwärme	kWh/a		0	14033	4002
Lüftungsgerät (elektrisch)	kWh/a		0	Keine Angaben	5243
KKM/AKM/Rückkühlung (elektrisch)	kWh/a		15398	0	0
Sorption (elektrisch) /Pumpen	kWh/a		2089	2379	587
Wasserverbrauch (AK)	m3/a		0	Keine Angaben	137
Kosten der Ressourcen*					
Preis pro kWh thermisch Fernwärme	€/kWh		0.0618	0.0618	0.0618
Preis pro kWh elektrisch	€/kWh		0.076	0.076	0.076
Preis pro m3 Wasser	€/m3		2.53	2.53	2.53
Verbrauchskosten thermisch	€		2554	2448	1580
Verbrauchskosten elektrisch	€		1329	281	443
Verbrauchskosten Wasser	€		0	Keine Angaben	347
Verbrauchskosten	€		3883	2629	2369
Gesamt-kosten/Jahr	€/a		9225	11635	11635
Betriebskosten	€/a		3449	4350	4350
Verbrauchskosten	€/a		3883	2629	2369
Gesamtkosten/Jahr	€/a		16557	18614	18354
prozentualer Vergleich	%		100	112	111

Beim prozentualen Vergleich der ersten drei Varianten in der letzten Zeile der Tabelle 8, ist die Bezugsgröße die Summe der Jahresgesamtkosten des KKM Models „V1“. Der Vergleich zeigt, dass die Variante 1 durch ihre niedrigeren Investitionskosten die wirtschaftlichste Variante darstellt. Die Verbrauchskosten der Varianten 2 und 3 sind geringer als die der Variante 1. Dennoch reicht die Ressourceneinsparung der Varianten 2 und 3 nicht aus die höheren Investitionskosten der Pilotanlage zu kompensieren. Die Varianten 2 und 3 sparen hauptsächlich Strom wodurch die prozentuale Verbrauchskosteneinsparung zwischen Variante 1 und 2 bei 23 % und die zur Variante 3 bei 29 % liegt.

Hinweis: Auch die Varianten 2 und 3, die Modelle der sorptionsgestützten Klimatechnik unterscheiden sich im Ressourcenbedarf. Bei Variante 2, Model basierend auf den Messdaten der Sobic-Anlage mit solarer Wärmeversorgung, wird mehr Strom und Wärme für die Bereitstellung des Entfeuchtungspotentials benötigt als bei Variante 3. Diese ist auf die zur Modellierung verwendeten Datensätze zurückzuführen. Die verwendeten Datensätze repräsentieren zwei, konstruktiv und hydraulisch, verschieden aufgebaute Sorptionsteile, siehe Grundmodel II und III.

Alle drei Varianten wurden mit dem tatsächlichen Volumenstrom der Anlage in der Medizinischen Klinik gerechnet. Die Anforderung der Ventilatoren der Klimaanlage wird in 2 Stufen betrieben. Tagsüber werden 8500 m³ Luft in der Stunde gefördert, nachts wird der Volumenstrom auf 5000 m³/h gedrosselt. Dies ergibt einen Tagesmittelwert von 6130 m³/h.

Zwischenfazit

Für die LiquiSorp-Anlage reichen die 20 Jahre Nutzungsdauer nicht aus, um die höheren Investitionskosten der sorptionsgestützten Klimaanlage abzufangen. Doch muss im Vergleich der Varianten 1, 2 und 3 berücksichtigt werden, dass die Investitionskosten für Anlagen mit einem Nennvolumenstrom von 12500 m³/h angesetzt wurden. Der Ressourcenbedarf der drei Varianten in Tabelle 8 ist nur mit dem tatsächlichen geförderten Volumenstrom berechnet worden.

5.2 Variante 4 – 6

In Variante 4, 5 und 6 sind die Investitionskosten von Anlagen mit einem Nennvolumenstrom von 9000 m³/h in der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt. Die Investitionskosten der sorptionsgestützten Klimatisierung Variante 5 und 6 wurden als Richtpreis von der Firma menerga angegeben. Die Investitionskosten einer Anlage mit KKM wurden als 20 % geringer angenommen, dies entspricht dem prozentualen Unterschied der Investitionskosten der Variante 1 zur Variante 2 und Variante 3.

Variante 4 (KKM Model "V2"):

- Der Energiebedarf entspricht der Variante 1
- Geringere Investitionskosten (9000 m³/h Nennvolumenstrom-Anlage).

Variante 5 (SGK Model "V1.2"):

- Der Energiebedarf entspricht der Variante 2
- Geringere Investitionskosten (9000 m³/h Nennvolumenstrom-Anlage).

Variante 6 (SGK Model "V2.2"):

- Der Energiebedarf entspricht der Variante 3
- Geringere Investitionskosten (9000 m³/h Nennvolumenstrom-Anlage).

In Tabelle 9 sind die Varianten 4, 5 und 6 dargestellt und hier ist auch der prozentuale Vergleich in der letzten Zeile zu finden.

Tabelle 9: Wirtschaftlichkeit der Varianten 4, 5 und 6

Wirtschaftlichkeitsberechnung der jeweiligen Varianten		VNR	4	5	6
		ART	KKM Model "V2"	SGK Model "V1.2"	SGK Model "V2.2"
		INFO	Grundmodel I geringere Investkosten	Grundmodel II geringere Investkosten	Grundmodel III geringere Investkosten
Kostengruppe	Einheit				
Kapitalkosten	Nutzungsdauer	a	20	20	20
	Investitionskosten Gerät (Pauschal)	€	68400	85500	85500
	Kapitalzins	%	5	5	5
Betriebskosten	Kapitalkosten	€/a	5489	6861	6861
	Wartungskosten-Anteil von Investitionskosten	%/100	0.01	0.01	0.01
	Instandhaltungs-Anteil von Investitionskosten	%/100	0.01	0.01	0.01
	Versicherungs-/ Verwaltungs-Anteil von Investitionskosten	%/100	0.01	0.01	0.01
Verbrauchs-kosten	Betriebskosten	€/a	2052	2565	2565
	Energiebedarf				
	Wärme Rückgewinner	kWh/a	168983	Keine Angaben	152419
	Wärme Nacherhitzer	kWh/a	15393	25583	21556
	Wärme Vorerhitzer	kWh/a	25928	0	0
	Wärme Desorption Fernwärme	kWh/a	0	14033	4002
	Lüftungsgerät (elektrisch)	kWh/a	0	0	5243
	KKM/AKM/Rückkühlung (elektrisch)	kWh/a	15398	0	0
	Sorption (elektrisch) /Pumpen	kWh/a	2089	2379	587
	Wasserverbrauch (AK)	m ³ /a	0	Keine Angaben	137
	Kosten der Ressourcen*				
	Preis pro kWh thermisch Fernwärme	€/kWh	0.0618	0.0618	0.0618
	Preis pro kWh elektrisch	€/kWh	0.076	0.076	0.076
	Preis pro m ³ Wasser	€/m ³	2.53	2.53	2.53
	Verbrauchs-kosten thermisch	€	2554	2448	1580
	Verbrauchs-kosten elektrisch	€	1329	181	443
	Verbrauchs-kosten Wasser	€	0	Keine Angaben	347
	Verbrauchs-kosten	€	3883	2629	2369
Gesamt-kosten/Jahr	Kapitalkosten	€/a	5489	6861	6861
	Betriebskosten	€/a	2052	2565	2565
	Verbrauchs-kosten	€/a	3883	2629	2369
	Gesamtkosten/Jahr	€/a	11423	12055	11795
prozentualer Vergleich		%	100	106	103

Zwischenfazit

Die Annahme der geringeren Investitionskosten für eine Anlage mit einem Nennvolumenstrom von 9000 m³/h gleicht die Gesamtkosten der verschiedenen Varianten pro Jahr an. Auch der Unterschied im prozentualen Vergleich wird geringer. Sinkt der Unterschied der Investitionskosten von 20 % auf z.B. 15% dann sind die Gesamtkosten pro Jahr nahezu identisch. Beträgt der Unterschied 14 % oder weniger, werden die Varianten 2 und 3 wirtschaftlicher.

5.3 Variante 7 und 8

Ergänzend wurden die Varianten 7 und 8 aufgestellt. Die Investitionskosten entsprechen der Variante 5 um eine Vergleichbarkeit mit Variante 4 herstellen zu können.

Variante 7 (SGK Model "V1.3"):

- Grundmodel III
- Der Energiebedarf wurde berechnet aus den Stundenwerten der Modellierung des Kapitels 3.4 unter Berücksichtigung verschärfter Zuluftbedingungen (zulässige Raumlufttemperatur wurden um 2 Kelvin und die zulässige absolute Feuchte wurde um 2 g/kg gesenkt).
- Geringere Investitionskosten (9000 m³/h Nennvolumenstrom-Anlage).

Variante 8 (LiquiSorp 06/07):

- Der Energiebedarf entspricht den tatsächlichen Verbrauchswerten des Jahreszeitraums Oktober 2006 bis September 2007. Zur Vergleichbarkeit wurde der Grundstrombedarf für die Zu-/Abluftventilatoren und Regelungstechnik der Anlage aus dem Gesamtstromverbrauch herausgerechnet.
- Geringere Investitionskosten (9000 m³/h Nennvolumenstrom-Anlage).

Zwischenfazit

Beim Vergleich der Variante 3 und der Variante 8 ist der höhere Ressourcenbedarf für die Kühlung und die Entfeuchtung zu erkennen. Dies macht auch Sinn, da die Anforderung der Kühlung und der Entfeuchtung durch die verschärften Raumluftbedingungen erhöht wurde. (Hinweis: Im Vergleich zum tatsächlichen Verbrauch fällt auf, dass der Fernwärmebedarf des Modells zu gering ausfällt, vgl. „Wärme Desorption“ in Tabelle 8 und Tabelle 10.)

Der prozentuale Vergleich der Varianten 7 und 8 ist auf die Variante 4 bezogen und zeigt, dass auch hier die Investitionskosten mit 20 % ausschlaggebend für die Wirtschaftlichkeit sind.

Tabelle 10: Wirtschaftlichkeit der Varianten 7 und 8

Wirtschaftlichkeitsberechnung der jeweiligen Varianten		VNR	7	8
		ART	SGK Model "V1.3"	LiquiSorp 06/07
		INFO	Grundmodell III verschärfte Raumlufumbedingungen	tatsächlicher Ressourcenbedarf
Kostengruppe		Einheit		
Kapitalkosten	Nutzungsdauer	a	20	20
	Investitionskosten Gerät (Pauschal)	€	85500	85500
	Kapitalzins	%	5	5
Betriebskosten	Kapitalkosten	€/a	6861	6861
	Wartungskosten-Anteil von Investitionskosten	%/100	0.01	0.01
	Instandhaltungs-Anteil von Investitionskosten	%/100	0.01	0.01
	Versicherungs-/ Verwaltungs-Anteil von Investitionskosten	%/100	0.01	0.01
	Betriebskosten	€/a	2565	2565
Verbrauchs-kosten	Energiebedarf			
	Wärme Rückgewinner	kWh/a	140536	109168
	Wärme Nacherhitzer	kWh/a	21556	16066
	Wärme Vorerhitzer	kWh/a	0	0
	Wärme Desorption Fernwärme	kWh/a	8999	13781
	Lüftungsgerät (elektrisch)	kWh/a	5610	5610
	KKM/AKM/Rückkühlung (elektrisch)	kWh/a	0	0
	Sorption (elektrisch) /Pumpen	kWh/a	1108	1221
	Wasserverbrauch (AK)	m3/a	323	139
	Kosten der Ressourcen*			
	Preis pro kWh thermisch Fernwärme	€/kWh	0.0618	0.0618
	Preis pro kWh elektrisch	€/kWh	0.076	0.076
	Preis pro m3 Wasser	€/m3	2.53	2.53
	Verbrauchs-kosten thermisch	€	1888	1845
	Verbrauchs-kosten elektrisch	€	511	519
	Verbrauchs-kosten Wasser	€	818	351
	Verbrauchs-kosten	€	3217	2715
Gesamt-kosten/Jahr	Kapitalkosten	€/a	6861	6861
	Betriebskosten	€/a	2565	2565
	Verbrauchs-kosten	€/a	3217	2715
	Gesamtkosten/Jahr	€/a	12643	12140
	prozentualer Vergleich	%	111	107

5.4 Fazit

Die SGK-Anlage in der Uniklinik ist nach der Annuitätsmethode nicht wirtschaftlicher als das Referenzmodell mit KKM. Die Verbrauchskosten liegen zwar niedriger, aber durch die höheren Investitionskosten sind die Kapitalkosten und die Betriebskosten (bei dieser Pilotanlage) zu hoch.

Zahlen:	Kapitalkosten	+ 21 %
	Betriebskosten	+ 21 %
	Verbrauchskosten	- 32 %

Randbedingung: Der Prozentuale Unterschied zwischen den Investitionskosten wurde mit 20% angenommen. Dies entspricht einem Vergleichsangebot von 2005. Schon heute sind die Investitionskosten der SGK-Anlage nicht mehr in dieser Höhe zu erwarten.

Hinweis: In der Wirtschaftlichkeitsanalyse ist die wahrscheinliche Erhöhung der Preise für Ressourcen nicht berücksichtigt. Die Berücksichtigung der Erhöhung der Preise für Ressourcen kommt der Ressourcen sparenden sorptionsgestützten Klimaanlage zugute. Ein weiterer wichtiger Punkt ist das absolute Niveau der angenommenen Energiepreise. Es gibt viele Betreiber, die nicht mit so günstigen Konditionen rechnen können. Bei denen würde sich dann die Anlagentechnik entsprechend früher amortisieren.

Der ökologische Vergleich zeigt, dass SGK-Anlagen aufgrund des Verzichts auf Kältemittel und gerade wegen ihres geringeren Ressourcenbedarfs eine gute alternative zu konventionellen Anlagen darstellen. Sinken die Investitionskosten durch die Markteinführung und die Produktion höherer Stückzahlen, wirkt sich der geringere Ressourcenbedarf auch auf die Wirtschaftlichkeit der SGK-Anlagen positiv aus.

6 Betriebserfahrungen und Empfehlungen

Die LiquiSorp-Anlage ist die erste sorptionsgestützte Klimaanlage mit flüssigen Sorbentien, die mit Fernwärme betrieben wird. Sie ist damit die erste Anlage mit kontinuierlich betriebemem Sorptionsteil.

Die SGK-Anlage klimatisiert 24 Stunden pro Tag an 365 Tage im Jahr die Räume der Medizinischen Klinik der Uniklinik. Dadurch konnten bereits während der Projektlaufzeit viele Betriebserfahrungen gewonnen und Empfehlungen zur anlagen- und regelungstechnischen Optimierung gegeben werden:

Tabelle 11: Betriebserfahrungen und Empfehlungen.

Problem	Lösung
Absorbersolekühlung: Durch den kontinuierlich Betrieb des Sorptionsteils wird die Sole unmittelbar zwischen Desorber und Absorber ausgetauscht. Durch den nicht-idealen internen Wärmetauscher wird (immer) „Schleppwärme“ vom Desorber (75°C für effektive Desorption) in den Absorber (20°C für Absorption mit geringer Temperaturerhöhung) übertragen. Trotz des internen Wärmetauschers lag die Soletemperatur im Absorber bei 36°C. Der Solekühler kann diese Temperaturdifferenz nicht zusätzlich zur Absorptionsenthalpie abführen. Die Schleppwärme hat im Sommer 2006 zu erhöhten Zulufttemperaturen geführt.	Konstruktive Optimierung des Sole-Sole-Wärmetauschers im Winter 2006/07.
Im Sommer 2007 lieferten die Füllstandssensoren häufig falsche Werte, z.B. Anzeige „Absorber befüllt“ bei leerem Absorber.	Einbau neuer Sensoren mit einer anderen Sensortechnik.
Der Absorber wird immer von einem Teilluftvolumenstrom durchströmt auch wenn der Absorber-Bypass geöffnet ist. Dieser Teilluftstrom wird dann ungewollt entfeuchtet. Durch diese Entfeuchtung steigt das Solevolumen.	Aufgrund des steigenden Solevolumens wurde ein Ausdehnungsgefäß in Form eines Speichers nach gerüstet.
Optimierung der Regelung / der Regelungssequenzen	siehe Kapitel 4
Im Sommer 2006 trat ein Biofilm in der adiabaten Abluftbefeuchtung auf, siehe Kapitel Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.	Die Anlage (insb. Solekühler und Adiabatik) wurde komplett gereinigt. Das Problem ist nicht technik- sondern anlagenbedingt. Keine Auswirkung auf zukünftige Anlagen.
Wegen eines defekten (Ventil-)Stellmotors trat Sole aus dem Desorber aus.	Wechsel des Stellmotors. Bei zukünftigen Anlagen wird eine Wanne unter den Sorptionsteil gebaut, um austretende Sole aufzufangen.

7 Ergebnisse und Ausblick

Die LiquiSorp-Anlage läuft gut und erfüllt die Erwartungen, die zu Beginn des Projektes formuliert wurden, z.B. Entfeuchtungsleistung von 5 bis 5,5 g/kg. Diese Entfeuchtungsleistung konnte nachgewiesen werden. Die Wetterbedingungen machten eine höhere Entfeuchtungsleistung nicht möglich, in anderen Klimaten ist aber auch eine Entfeuchtungsleistung von 7 bis 8 g/kg und mehr prinzipiell möglich.

Die SGK-Anlage wurde – im Rahmen der Versuche – häufig außerhalb des Auslegungszustandes und mit erhöhten Anforderungen betrieben. In diesen Betriebszuständen lief die Anlage erwartungsgemäß nicht optimal. Wird die Anlage im Auslegungszustand betrieben, werden hohe Entfeuchtungsleistungen bei geringen Zulufttemperaturen mit einer hohen Energieeffizienz erreicht.

Ergebnisse

Im Laufe der Projektzeit *LiquiSorp* konnte die Anlagentechnik der sorptionsgestützten Klimatisierung in Zusammenarbeit der Projektpartner optimiert und zur Marktreife entwickelt werden: menerga bietet SGK-Anlagen mit flüssigen Sorbentien seit Sommer 2007 in zwei Konfigurationen am Markt an:

- Mit kontinuierlichem Sorptionsbetrieb zur Nutzung von ständig anstehender Niedertemperaturwärme (hier: Fernwärme) und
- mit diskontinuierlichen Sorptionsbetrieb zur Nutzung von nicht ständig zur Verfügung stehender Niedertemperaturwärme (hier: Solarthermie).

Diese SGK-Anlagen werden europaweit installiert und ständig verbessert. Dazu haben die Erfahrungen im LiquiSorp-Projekt wichtige Impulse gegeben.

SGK-Anlagen mit flüssigen Sorbentien sind eine gute Alternative zur konventionellen Klimatechnik, denn die thermodynamische Zustandsänderung Kühlen und Entfeuchten wird nicht über den „Umweg“ Abkühlen der Luft - Taupunktunterschreitung – Wiedererwärmen der Luft, sondern durch Absorption von Wasser in einer Sole realisiert. Als Antriebsenergie wird lediglich Niedertemperaturwärme für die Desorption benötigt. Im Vergleich zu konventionellen Klimaanlage stellt die LiquiSorp-Anlage die gleiche Nutzenergie (Enthalpieänderung der Zuluft) mit rund einem Drittel bis zu einem Viertel – je nach Betriebszustand – des Primärenergieeinsatzes bereit. Darüber hinaus werden SGK-Anlagen ohne Kältemittel betrieben.

Die LiquiSorp-Anlage hat gezeigt, dass Leistungszahlen $COP_{\text{thermisch}}$ von 1,5 auch im realen betrieb erreicht werden. Die thermische Leistungszahl liegt deutlich über den Werten von vergleichbaren Desiccant-Cooling-Anlagen – trotz Inbetriebnahmephase und unterschiedlichen Optimierungsläufen während der Projektlaufzeit.

Die Anlage nutzt Wärme auf einem Temperaturniveau von etwa 60-75 °C als Antriebsenergie für den Desorber. Wärme auf diesem Temperaturniveau kann solarthermisch, aus (Prozess-)Abwärme, über Fernwärme oder über ein BHKW effizient bereitgestellt werden.

Die sommerliche Überlastung des öffentlichen Stromnetzes kann durch den geringeren Strombedarf im Kühlbetrieb einer SGK-Anlage verringert werden. Zudem kann im Sommer Fernwärme – falls vorhanden – zur Klimatisierung genutzt werden. Das erhöht die Auslastung der Kraft-Wärme-Kopplung.

Da die SGK-Anlage keine Wärme an die Umgebung abgibt, erhöht sich die Umgebungstemperatur (Mikroklima) in unmittelbarer Gebäudenähe nicht. Das ist gerade für innerstädtische Bereiche von Vorteil.

Im direkten wirtschaftlichen Vergleich verursacht die LiquiSorp-Anlage rund 10% höhere Jahreskosten als eine konventionelle Klimaanlage mit KKM. Eine mögliche Verringerung der Investitionskosten durch steigende Stückzahlen und der – perspektivisch – Anstieg der Energiepreise lassen erwarten, dass SGK-Anlagen wirtschaftlicher sein werden als konventionelle Klimaanlage. Je nach Abnahmestruktur bzw. Energiepreis sind SGK-Anlagen in bestimmten Einsatzfällen schon heute preiswerter zu betreiben als konventionelle Klimaanlage.

Durch einzelne anlagen- und regelungstechnische Eingriffe / Optimierungen konnte die Energieeffizienz der LiquiSorp-Anlage erhöht und wichtige Erfahrungen für zukünftige SGK-Konzepte gesammelt werden.

Die LiquiSorp-Anlage kann vollständig bilanziert werden. Das Messkonzept bietet die Möglichkeit, unterschiedliche Bilanzgrenzen so zu definieren, dass auch eine Bewertung von Einzelkomponenten möglich ist.

Auf Basis der Messwerte aus einem kompletten Betriebsjahr 2006 / 2007 ist es gelungen, Leistungszahlen für die 7 typischen Betriebszustände zu bestimmen. Auf Basis dieser Energiebilanz ist ein Vergleich mit anderen Anlagenkonzepten – auch auf Jahresebene – möglich.

Ausblick

Die Messdaten liegen in aufbereiteter Form am Fraunhofer ISE vor und können, z.B. im Rahmen eines Anschlussprojektes, zur modellbasierten Datenauswertung herangezogen werden. Damit können weitere Optimierungspotenziale aufgezeigt und bewertet werden.

Im Laufe des Projektes konnten wesentliche Verbesserungen erreicht werden, wobei die vorherrschenden Wetterbedingungen einen durchgängigen Test dieser Einstellungen nicht mehr ermöglichte. In einem möglichen Nachfolgeprojekt können z.B. über 2 Jahre gezielt Messreihen aufgenommen / Versuche durchgeführt werden, um die Optimierung zu validieren.

Der Sole/Sole-Wärmetauscher konnte zwar konstruktiv verbessert werden, er ist aber noch nicht optimal. Wegen der Trägheit in der Messtechnik ist eine in-Situ Bestimmung des Wärmerückgewinnungsgrades η_{WRG} nicht möglich. Im Rahmen eines Anschlussprojektes sollte diese kritische Komponente (Stichwort „Schleppwärme“) optimiert werden.

8 Literatur

- [Bine08/02] Projekt-Info 08/02 „Klimatisierung mit wässriger Salzlösung“. Bine Informationsdienst, 2002. <http://www.bine.info/pdf/publikation/bi0802internets02.pdf>.
- [DIN18599-7] Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 7: Endenergiebedarf von Raumluftechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau. DIN V 18599-7:2005-07. Beuth Verlag, 2005.
- [EN13779] Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen an Lüftungs- und Klimaanlage. Deutsche Fassung DIN EN 13779:2004. Beuth verlag, 2004.
- [Geßner06] Geßner, Daniel: Betriebsanalyse von sorptionsgestützten Klimaanlage mit flüssigen Sorbentien. Diplomarbeit am Fraunhofer ISE, 2006.
- [Henning 04] Henning, Hans-Martin (Ed.): Solar-Assisted Air-Conditioning in Buildings. Springer Verlag / Wien, 2004.
- [Hindenburg05] Hindenburg, C., Geßner, D., Röben, J.: Development of a liquid desiccant cooling system – the first year of operation of a pilot plant in Freiburg. Proceedings of 1st International Conference for solar air conditioning; Bad Staffelstein, 2005.
- [Mansfeld06] Mansfeld, Till: Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit von Lüftungsanlagen mit sorptionsgestützter Klimatisierung mit flüssigen Sorbentien. Diplomarbeit am Fraunhofer ISE, 2006.
- [Röben02] Röben Jürgen: Sorptionsgestützte Klimatisierung. Bine Informationsdienst, 2002. www.bine.info/pdf/infoplus/Sorption1.pdf