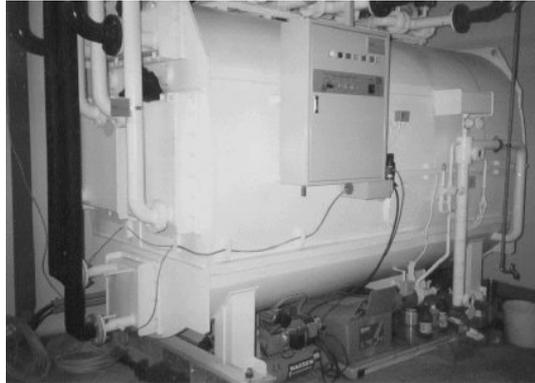


Auslegung und Betriebserfahrungen mit geschlossenen Adsorptionskältemaschinen am Beispiel Dresden und Kamenz



TU Dresden
01062 Dresden
Dr.- Ing. Andreas Gassel
Dr.- Ing. Karin Rühling
Tel.: 0351/4633423
Fax: 0351/4637105
mail: gassel@mttnv01.mw.tu-dresden.de
www.adsorber.de

1. Einleitung

Dieser Beitrag präsentiert Erfahrungen mit Adsorptionskältemaschinen. Gegenstand sind zwei Anlagen, die von den Autoren messtechnisch betreut werden. Es wird gezeigt, dass Adsorptionskältemaschinen für den Einsatz im Rahmen der solaren Klimatisierung hervorragend geeignet sind. Bei Planung und Betrieb sind jedoch einige Regeln einzuhalten.

Die Autoren setzen voraus, dass Aufbau und Funktionsprinzip dem Leser entweder bekannt oder für ihn nicht relevant sind. Bei diesbezüglichen Unklarheiten sei auf die angegebenen Literaturstellen, insbesondere auf die Internetpräsentationen verwiesen. Diese enthalten neben einer Einführung in die Thematik auch weiterführende Betrachtungen, insbesondere zur Prozessberechnung einschliesslich eines herunterladbaren Simulationsprogramms sowie eine detaillierte Vorstellung der Gesamtanlagen. Dazu gehören auch Informationen zu den Solaranlagen.

2. Motivation

Die Adsorptionskältemaschine mit dem Stoffpaar Silicagel/Wasser weist gegenüber der Absorptionskältemaschine mit dem Stoffpaar Lithiumbromid/Wasser folgende Vorteile auf:

- geringere Heiztemperatur aufgrund grösserer WÜ-Flächen, günstigerer Stoffwerte und breiteren Arbeitsbereichs
- sehr zuverlässig, da keine Kristallisationsgefahr
- potenziell besseres Teillastverhalten, da Leistung heizwärmesparend über Zyklusdauer beeinflussbar
- Kälteleistung schneller an Last anpassbar

Den Vorteilen stehen einige Nachteile gegenüber:

- gross
- teuer
- schwankende Vorlauftemperatur, da zyklische Betriebsweise
- bei einigen Betriebsparametern geringere Effizienz

Die meisten Nachteile sind technisch kompensierbar oder werden durch die Vorteile aufgewogen. Das grösste Problem ist der hohe Preis. Dieser resultiert aus der Fertigung kleiner Serien mit grossem Handarbeitsanteil im Hochlohnland Japan. Mit dem Übergang zu Grossserien und der Fertigung in Europa ist mit einer beträchtlichen Kostensenkung zu rechnen.

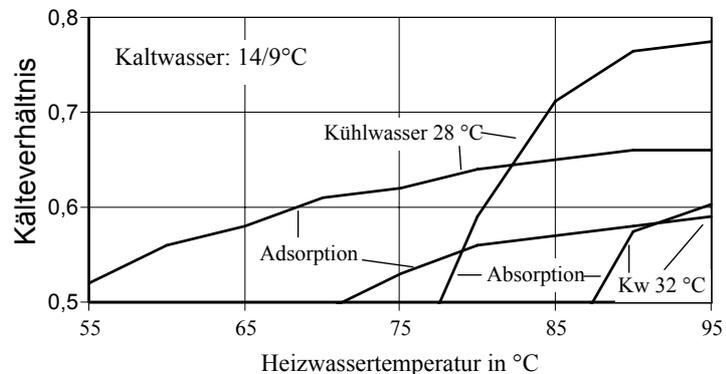


Bild 1: Vergleich von Ab- und Adsorptionskältemaschine

Gegenwärtig ist der Einsatz von Adsorptionskältemaschinen bei KWK-Systemen mit niedrigen Temperaturen ($t_{\text{Rück,max,zul.}} < 75 \text{ °C}$) sowie Solaranlagen sinnvoll. Sind höhere Temperaturen verfügbar, sollte die Wahl angesichts des Verlaufs des Kälteverhältnisses und der Investitionskosten besser auf Absorptionsmaschinen fallen.

Adsorptionskältemaschinen werden gegenwärtig von zwei Unternehmen hergestellt. Die Firma Mayekawa vertreibt in Europa ihre Maschinen unter dem Namen Mycom über die Firma Albring in Alsbach. Maschinen des Herstellers Nishiyodo werden von der GBU mbH in Bensheim unter dem Namen NAK vertrieben. Beide Hersteller haben Maschinen in einem Leistungsbereich von 50 bis 350 KW im Angebot.

Die ersten Maschinen wurden um 1980 in Japan installiert. Dort sind momentan etwa 200 Anlagen in Betrieb. Die erste Installation Deutschlands erfolgte 1995 in Kassel. Hierzulande arbeiten gegenwärtig 16 Adsorptionskälteanlagen. Ausserhalb Deutschlands und Japans gibt es noch keine Adsorptionskältemaschinen. Es laufen jedoch vielversprechende Planungsarbeiten in Mexiko und Griechenland.

3. Vorstellung der vermessenen Anlagen

In diesem Beitrag werden Erfahrungen mit zwei Maschinen vorgestellt. Es handelt sich um sehr unterschiedliche Anlagen. Somit ergibt sich ein guter Überblick über die Technik

Tabelle 1: Anlagenvorstellung

Objekt	Ort	Dresden	Kamenz
	Art	Bürogebäude	Krankenhaus
	Klimatechnik	Kühldecken (15/19°C)	Vollklimaanlagen (8/14 °C)
AdKM	Betreiber	Privatinvestor	Malteser BTG
	Inbetriebnahme	1996	2000
	Hersteller	Mayekawa	Nishiyodo
	Typ	NAK 20/70	ADR 30
	Beheizung	Fernwärme + solar (55 .. 75 °C)	Brennstoffzelle + solar (60 .. 85 °C)
	Rückkühlung	geschl. nasses RKW (29/34 °C)	offenes nasses RKW (26/30 °C)
	Zyklusdauer	wahlweise 7 oder 21 min	10 min
	Einordnung	Alleinversorgung	Kältegrundlast
	Nennleistung	71 kW	108 kW
	gem. Leistung	50 kW	95 kW
	Förderung	keine	EU, Sachsen, Gasversorger
	Messdatenlage	befriedigend	sehr gut

4. Anlage Dresden

Tabelle 2: Auslegungsdaten der AdKM

	Nennfall	Dresden
Heizvorlauf	85 °C	71 °C
Heizrücklauf	79,4 °C	60,4 °C
Heizvol.-strom	18 m ³ /h	6,7 m ³ /h
Kühlvorlauf	34,8 °C	34,7 °C
Kühlrücklauf	31 °C	29 °C
Kühlvol.-strom	42 m ³ /h	20 m ³ /h
Kältevorlauf	9 °C	16,1 °C
Kälterücklauf	14 °C	20 °C
Kältevol.-strom	12 m ³ /h	11 m ³ /h
Kälteleistung	70 kW	50 kW
Heizleistung	118 kW	83 kW
Kälteverhältnis	0,6	0,6

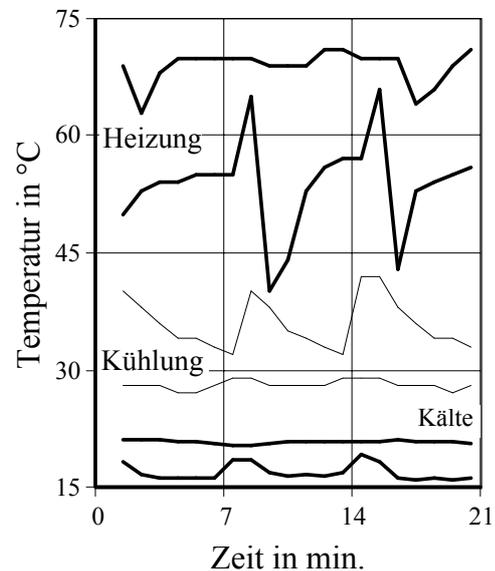


Bild 2: Messwerte für drei Zyklen

Seit 1996 versorgt eine Adsorptionskältemaschine des Typs Nishiyodo NAK 20/70 die Kühldeckenanlage eines Dresdener Bürogebäudes. Die Maschine ist auf dem Deckblatt dieses Beitrages abgebildet. Die durch die Kühldecken übertragbare Leistung beträgt 50 kW.

Die hohe Temperatur der Kälte sowie der im Vergleich zur Nennleistung geringe Kältebedarf der Kühldecken schaffen besonders günstige Voraussetzungen für die Sorptionskältetechnik. Somit konnten die Volumenströme und die Heiztemperatur gegenüber den Nennwerten reduziert werden. Ergebnis sind Einsparungen bei der Investition und den Stromkosten.

Die Tabellenwerte widerspiegeln im wesentlichen die Angaben des Herstellers. Während die zu den typischen Parametern laut Herstellerkatalog gehörende Leistung von 50 kW tatsächlich erzielt werden konnte, lag das Kälteverhältnis mit unter 0,5 bei einem geringeren Wert. Es ist generell zu bemerken, dass Leistungsmessungen in der Kältetechnik aufgrund der geringen Spreizungen oft mit großen Fehlern behaftet sind.

Die geringen Kälteverhältnisse resultieren wahrscheinlich aus den verminderten Volumenströmen. Wärme, Kühlwasser und Kälte werden nicht ausreichend schnell transportiert, so dass die thermodynamischen Vorgänge innerhalb der üblichen Zykluszeit von sieben Minuten unvollständig bleiben. Ergebnis ist ein grosser Einfluss der Verluste beim Umschalten zwischen den Zyklen.

Tabelle 3: Messdaten für Einzelzyklen

		Kurzzyklus 69 °C	Kurzzyklus 59 °C	Langzyklus 59°C
Heizvorlauf	°C	69	59	59
Heizrücklauf	°C	51	49	52
Heizvol.-strom	m ³ /h	6,7	6,7	6,7
Kühlvorlauf	°C	36,4	35,2	35
Kühlrücklauf	°C	28,5	29,1	29
Kühlvol.-strom	m ³ /h	18,5	18,5	14,5
Kältevorlauf	°C	13,7	14,4	17,4
Kälterücklauf	°C	17,5	16,7	20,7
Kältevol.-strom	m ³ /h	10,15	10,15	10,15
Kälteleistung	kW	45	27	40
Heizleistung	kW	129	77	104
Kälteverhältnis	-	0,35	0,35	0,66

Dies wird deutlich, wenn man die Zyklusdauer von 7 auf 21 Minuten verlängert. Diese Maßnahme wurde vom Hersteller ursprünglich nur für die Darstellung eines Teillastfalls vorgesehen. Das Kälteverhältnis erreicht einen Wert von 0,66. Leider kann die Maschine nicht dauerhaft in diesem Zustand betrieben werden, da die Temperaturschwankungen innerhalb des Zyklus so groß werden, dass diese von der Kühldeckenregelung nicht mehr ausgeglichen werden können.

Die Maschine liefert bei 59 °C Heiztemperatur noch bis zu 40 kW Kälteleistung - eine für Solarenergie und Fernwärme sehr günstige Situation. Dies ist der Fall, obwohl die Rückkühlung aufgrund eines sparsam ausgelegten Rückkühlwerks mit relativ hohen Temperaturen arbeitete. Eine Absorptionskältemaschine hätte bei diesen Temperaturverhältnissen schon lange aus Sicherheitsgründen abgeschaltet.

Eine Verbesserung des Kälteverhältnisses im Kurzzyklus wäre leicht möglich, indem die Umschaltphase verlängert und damit die Wärmerückgewinnung verbessert würde. Dies kann nur der Importeur durchführen. Aus organisatorischen Gründen war dies bisher noch nicht möglich.

In Bild 2 sind die Messwerte für drei aufeinanderfolgende Zyklen dargestellt. Alle Temperaturen unterliegen starken zeitlichen Schwankungen.

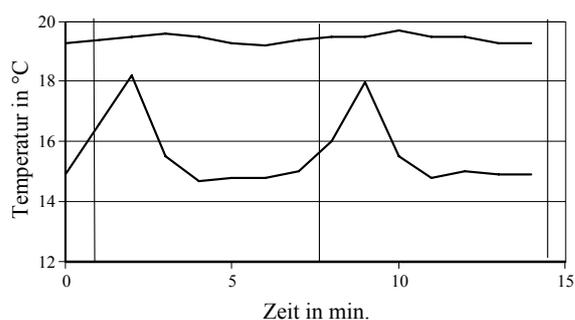


Bild 3: Kaltwassertemp. im Kurzzyklus

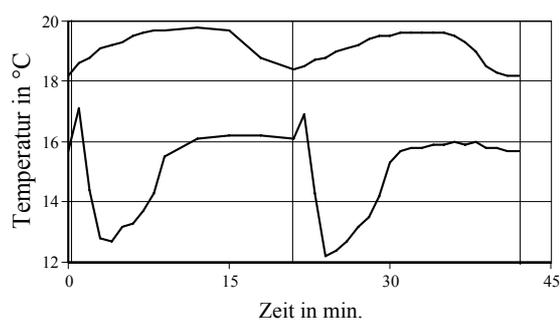


Bild 4: Kaltwassertemp. im Langzyklus

In Bild 3 ist das in Bild 2 schlecht erkennbare Temperaturverhalten der Kälteseite dargestellt. Bild 4 zeigt ergänzend die Temperaturverhältnisse bei verlängertem Zyklus. Die Temperaturschwankungen müssen bei der Anlagenplanung beachtet werden. Soweit möglich ist die Regelung der Anlagenperipherie anzupassen. Nützlich ist auch die Installation eines kleinen Pufferspeichers, um die Schwankungen zu dämpfen.

Betriebstechnisch gab es mit der Maschine keine Probleme. Der einzige Ausfall bestand im Versagen eines elektropneumatischen Relais, das zügig ausgewechselt werden konnte. An regelmässigen Arbeiten war nur die Entsorgung von Kondensat der Steuerluft und der Vakuumpumpe erforderlich.

5. Anlage Kamenz

5.1 Anlagenbeschreibung

Kamenz, etwa 50 km nordwestlich von Dresden gelegen, ist eine Stadt mit 19000 Einwohnern. Bekannt ist sie als Geburtsort von G. E. Lessing.

Im August 2000 nahm die Malteser-Betriebsträgergesellschaft dort ihr neues Krankenhaus mit einer Kapazität von 210 Betten in Betrieb. Es dient überwiegend der medizinischen Grundversorgung.

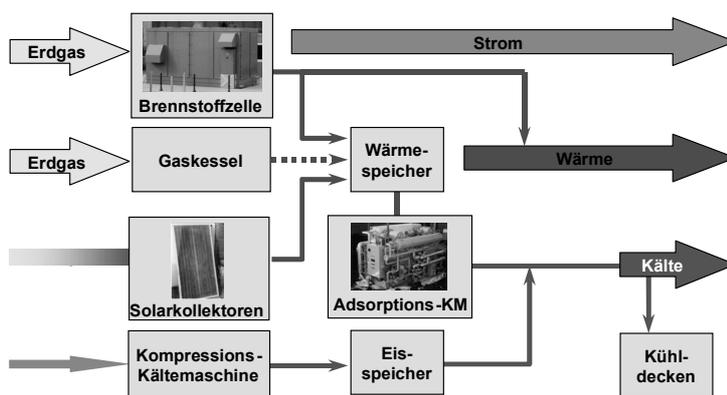


Bild 5: Grundschemata Anlage Kamenz

Das Krankenhaus ist mit einer innovativen Energieanlage mit den Hauptkomponenten Brennstoffzelle, Adsorptionskältemaschine und Sonnenkollektorfeld ausgestattet. Die Anlage wurde im Rahmen des EU-Thermie-Programms gefördert. Die wissenschaftliche Betreuung obliegt einem Forschungskonsortium aus dem DBI-GUT in Freiberg, der TU Dresden sowie dem Niederländischen Gasforschungsinstitut GASTEC.

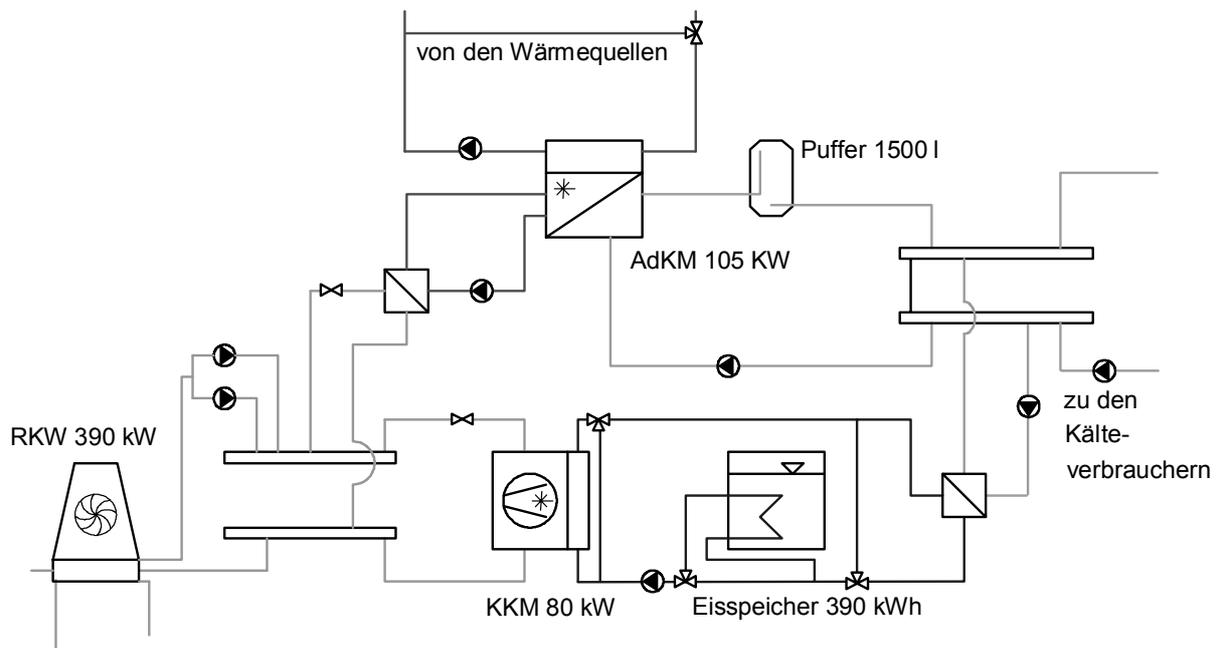


Bild 6: Schaltbild der Kälteanlage

Die Kälteerzeugung erfolgt durch eine Adsorptionskältemaschine sowie eine Kompressionskältemaschine mit Eisspeicher. Die Aufsplittung war erforderlich, weil die Heizwärme aus Brennstoffzelle und Solaranlage für eine den gesamten Bedarf abdeckende Adsorptionskältemaschine nicht ausgereicht hätte. Ein weiterer Aspekt ist die erhöhte Versorgungssicherheit.

Der Adsorptionskältemaschine wurde ein kleiner Speicherbehälter (Puffer) nachgeschaltet, der die Schwankung der Kälteaustrittstemperatur dämpft. Die Kälte wird auf einem Temperaturniveau 8/14°C bereitgestellt.

In Kamenz wurde eine Adsorptionskältemaschine vom Typ Mycom ADR 30 des japanischen Herstellers Mayekawa installiert.

Diese unterscheidet sich von der in Dresden installierten Maschine in der Bauweise sowie in der auf 10 Minuten verlängerten Zykluszeit. Daraus ergibt sich ein grösseres Bauvolumen. Eine Variabilität der Zykluszeit liegt nicht vor. Die Maschine wird vorrangig von der Hochtemperaturskopplung der Brennstoffzelle und nachrangig von Sonnenkollektoren beheizt.

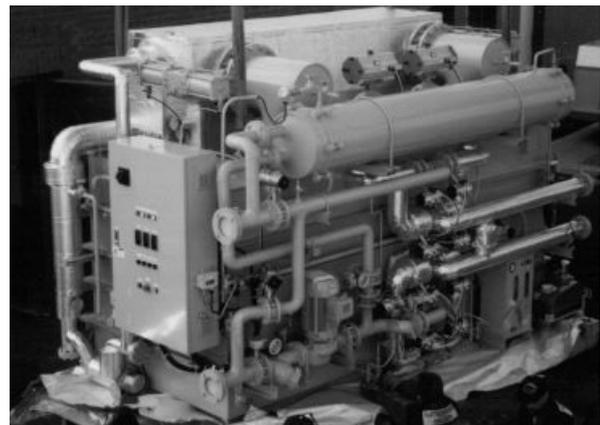


Bild 7: AdKM bei der Einbringung

Während die Adsorptionskältemaschine als Gesamtgerät relativ gut arbeitet, traten bei deren Vakuumpumpe regelmässig Probleme auf. Zunächst war der Ölkreislauf undicht und musste nachgedichtet werden. Später gab es Leistungsdefizite. In die

AdKM eingedrungene Inertgase wurden nicht mehr entfernt und behinderten den Stofftransport, was sich in einer Verringerung von Leistung und Kälteverhältnis bemerkbar machte. Später fiel die Vakuumpumpe aufgrund unzureichender Anpassung an die in Deutschland übliche Versorgungsspannung ganz aus. Ein inzwischen erfolgter Umbau dürfte das Problem jetzt geklärt haben.

5.2 Gesamtbilanz

Die Maschine wies folgende Monatsbilanzen auf:

Tabelle 4: Monatsbilanzen der AdKM in Kamenz

Monat	Kälte MWh	Wärme MWh	Betriebsdauer h	Kältelstg. bei Betrieb kW
Juli 00	4,5	10,0	52	86,5
August 00	28,4	60,0	347	81,8
September 00	14,4	30,6	211	68,2
Oktober 00	5,1	11,7	74	68,9
November 00 bis März 01: kein Kältebedarf				

Die Kältemaschine erreichte eine monatliche Betriebsdauer von bis zu 350 Stunden. Dies entsprach im wesentlichen den Zeiten der Kältenachfrage. Einschränkungen gab es im Juli durch die Inbetriebnahme und im August aufgrund von Havarien der Wärmequellen. Gegen Ende der Klimatisierungsperiode kam es zum bereits erwähnten Ausfall der Vakuumpumpe.

Im Monatsmittel betrug das Kälteverhältnis etwa 0,47. Dieser Wert ist im Vergleich zu anderen realen Sorptionskälteanlagen günstig. Der Unterschied zum Auslegungswert von 0,6 resultiert aus Teillastfällen.

5.3 Einzelbilanz

Die Kältemaschine weist im speziellen Betrieb folgende Parameter auf:

Tabelle 5: Typische Parameter der AdKM

		Auslegung			Typischer Betrieb		
		Kälte	Kühlung	Heizung	Kälte	Kühlung	Heizung
Eintritt	°C	12	27	80	12,1	26	70
Austritt	°C	6	32	70	8	29,8	65
Volumenstrom	m ³ /h	15	50	15	20	56	26
Leistung	kW	105	290	174	95	247	151

In Tabelle 6 sind die gemessenen Eigenschaften der Maschine bei Betrieb in Vollast aufgeführt. Dabei wurden die Daten jeweils in 30-Minuten-Mittelwerten zusammengefasst. Diese Werte umfassen ein breites Spektrum unterschiedlicher Heiz-, Kühl- und Kaltwassertemperaturen. Dies hat grosse Auswirkungen auf Kälteleistung und Kälteverhältnis. Es kann daher nie ein Vergleich mit dem Auslegungsfall erfolgen,

sondern es werden für jeden Zeitabschnitt die Messwerte den im Herstellerkatalog für die jeweiligen Parameter angegebenen Werte gegenübergestellt.

Tabelle 6: Gemessene 30-min-Werte

Tag	Zeit	Kälte		Kühlung	Heizung		COP	Soll	
		t _{aus}	Leistg.	t _{ein}	t _{ein}	Leistg.		Lstg.	COP
		°C	kW	°C	°C	kW	-	kW	-
15.08.00	15:00 .. 15:30	7,1	99	26,9	73,7	160	0,62	114	0,61
	15:30 .. 16:00	7,8	104	27,1	72,6	184	0,57	112	
16.08.00	04:00 .. 04:30	7,6	59	29,5	68,1	125	0,47	64	0,54
	04:30 .. 05:00	7,4	57	29,6	68,3	119	0,48	62	
	08:00 .. 08:30	7,4	87	26,2	67,7	140	0,62	99	0,59
	08:30 .. 09:00	7,6	88	25,6	66,9	156	0,56	104	
	09:00 .. 09:30	8,0	86	26,1	66,3	132	0,65	99	
	09:30 .. 10:00	8,0	85	26,2	65,8	149	0,57	95	
14.09.00	04:00 .. 04:30	7,0	55	26,5	61,1	122	0,45	65	0,55
	04:30 .. 05:00	6,5	55	26,1	60,9	106	0,52	65	

Zunächst ist festzustellen, dass die Kältemaschine bei Heiztemperaturen um 65 °C korrekt arbeitet, also in einem Temperaturbereich, der für Absorptionskältemaschinen nicht nutzbar ist. Nacht ist die Leistung geringer als am Tage. Dies ergibt sich aus der nachts zwangsweise verminderten Ventilator Drehzahl des Rückkühlwerks (Schallschutz).

Die Maschine erreichte etwa 85 % der im Katalog angegebenen Leistung. Hier ist die Tendenz festzustellen, dass dieser Leistungsanteil seit Inbetriebnahme am 14. Juli kontinuierlich ansteigt. Ursachen sind vermutlich die noch im Silicagel enthaltenen Inertgase, die jetzt langsam ausgetrieben werden sowie die Mängel der Vakuumpumpe.

Das Kälteverhältnis, auch COP genannt, entspricht den Katalogwerten. Die Schwankungen bei sonst fast identischen Randbedingungen sind lediglich messtechnisch bedingt.

Im nebenstehenden Doppeldiagramm 8 sind die Temperaturverläufe für drei Zyklen dargestellt. Es handelt sich hierbei um die Zeit von 08.00 bis 08.30 Uhr am 16. August 2000.

Die Temperaturen schwanken ähnlich wie in der Kältemaschine in Dresden. Unterschiede bestehen darin, dass Kälte- und Kühltemperatur geringer sind und die Schwankungsbreite von Heiz- und Kühlwasser aufgrund höherer Volumenströme schwächer ausfällt.

Die Schwankungsbreite der Kältevorlauf-temperatur von 4,5 K (6 °C bis 10,5 °C) ist vergleichbar der in Dresden. Da dies für die Kälteverbraucher regelungstechnisch schwer beherrschbar wäre wurde ein Pufferspeicher installiert. Dieser mit der AdKM in Reihe geschaltete Speicher dämpft die Schwankung erfolgreich ab.

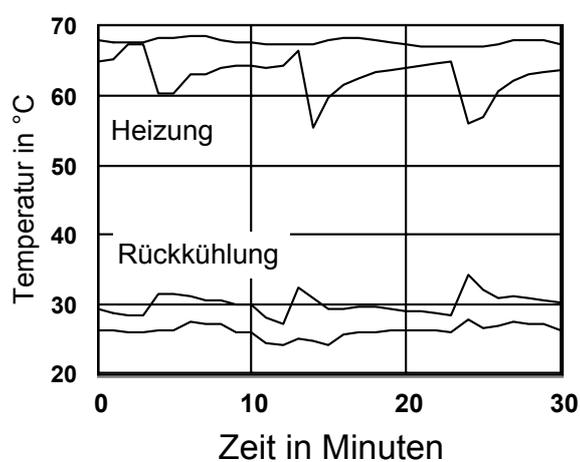
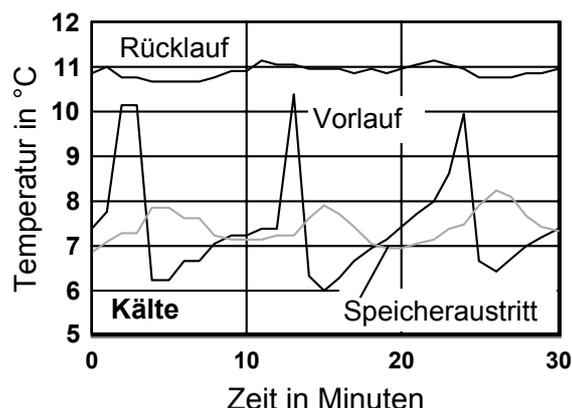


Bild 8: Zyklusverhalten der AdKM in Kamenz

5.4 Teillastverhalten

Die in Tabelle 6 aufgeführten Werte beschreiben den Dauerbetrieb der Maschine. Diese Betriebsweise ist jedoch relativ selten. Unterschreitet der Kältebedarf die Leistung der Maschine, ergibt sich ein taktender Betrieb. Ursprünglich sollte die erforderliche Leistungsreduktion durch die Drehzahlreduzierung der Kühlwasserpumpe hergestellt werden. Auf die Rückkühlbedingungen reagiert die Maschine sehr empfindlich. Praktisch war dies mit der bisher installierten Pumpe nicht möglich. Inzwischen wurde eine drehzahlregelbare Pumpe nachgerüstet.

Momentan wird der Teillastbetrieb durch Ein- und Ausschalten der Maschine hergestellt. Da hierbei immer wieder ein Abbruch im Zyklus erfolgt, kommt es zu einer Verkürzung der mittleren Zyklusdauer, die Bedeutung der Umschaltverluste steigt und das Kälteverhältnis sinkt. Durch die Existenz des kleinen Kältepuffers von nur 1,5 m³ Volumen ist die Situation nicht so problematisch wie bei anderen Adsorptionskälteanlagen. Die Maschine läuft im mittleren Lastbereich immer etwa 30 Minuten ununterbrochen.

In Bild 9 ist das Kälteverhältnis als Funktion der Kälteleistung für alle 4-h-Abschnitte der Betriebszeit der AdKM aufgetragen. Bei Vollast beträgt das Kälteverhältnis 0,55 und fällt im Teillastbereich auf 0,42. Die Verringerung des Kälteverhältnisses ist generell nicht so problematisch wie bei fernwärmebeheizten Anlagen, da die Wärme der Brennstoffzelle im Sommer prinzipiell als Abwärme zur Verfügung steht und bei Nichtnutzung in jedem Fall verloren geht. Störend ist aber der zusätzliche Kühlwasserverbrauch.

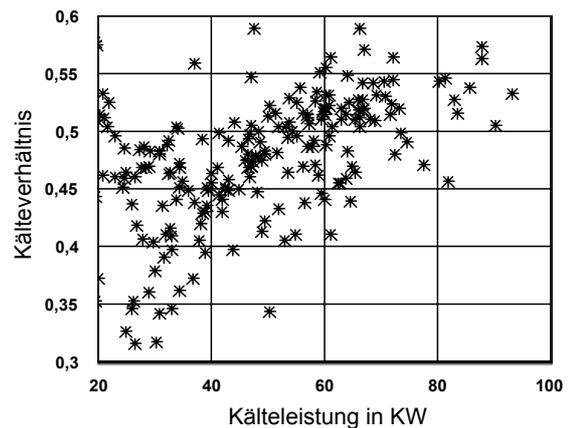


Bild 9: Teillastverhalten

6. Zusammenfassung

1. Die Adsorptionskältemaschinen arbeiten tatsächlich mit sehr niedrigen Heiztemperaturen von teilweise unter 60 °C. Das Kälteverhältnis erreicht bei Vollast Werte von bis zu 0,65.
2. Die Funktion ist über einen sehr weiten Bereich von Temperaturen und Volumenströmen gewährleistet. Um bei sehr kleinen Volumenströmen keinen Effizienzverlust zu erleiden, muss aber die Maschinenregelung angepasst werden.
3. Das Teillastverhalten ist nur mäßig (Kamenz) bis gar nicht (Dresden) befriedigend. Es gibt ein beträchtliches Potenzial, insbesondere durch die Zyklusverlängerung. Das Kälteverhältnis kann dann im Teillastfall sogar grösser als im Vollastfall sein. Dies kann durch Änderung der Maschinenregelung erschlossen werden.
4. Im Interesse einer stabileren Versorgung der Kälteverbraucher und zur Verbesserung des Teillastverhaltens hat sich die Installation eines kleinen Pufferspeicher als nützlich erwiesen. Bei einer Vielzahl von Anlagen dürfte er unverzichtbar sein.

7. Literatur

- GBU mbH, Bensheim, Prospekt für AdKM, Typ NAK (www.gbunet.de)
- Albring GmbH, Alsbach, Prospekt für AdKM, Typ Mycom
- www.adsorber.de
- A. Gassel: Die Adsorptionskältemaschine - Betriebserfahrungen und thermodynamische Berechnung, ki - Luft und Kältetechnik 8/98

- A. Gassel: Betriebsverhalten der Kälte- und Solaranlage im Bürogebäude „An der Loge“ in Dresden, Studie der TU Dresden im Auftrag der Götz GmbH Dresden, unveröffentlicht
- www.malteser-krankenhaus-kamenz.de

8. Summary

1. An Adsorption chiller works with a heating temperature down to 60 °C. The coefficient of chilling performance at full power is 0,65. This relations values are very good for the use of solar energy.
2. The adsorption chiller works in wide area of temperature and flow ranges. For a good function with reduced flow, it is necessary to change adjust the software of the inner control of the chiller.
3. The function under reduced power with partial load is not so good (Kamenz) or very bad poor (Dresden). But the potential to increase the chilling performance is very great high, for example with a longer working-cycle. Therefore, it is necessary to change adjust the software of the inner control of the chiller.
4. It is useful to install a small storage for to reduce the amplitude of the chilling-temperature.