

Jahresbericht 2004, 15. November 2004

Kühlung mit thermischer Solarenergie

Energiespeicherung & Klimatisierung mit dem ClimateWell System

Nutzung der Absorption zur Kühlung

Autor und Koautoren	Paul Gantenbein, Tarek El Shafey
beauftragte Institution	Institut für Solartechnik SPF
Adresse	Oberseestrasse 10, 8640 Rapperswil
Telefon, E-mail, Internetadresse	055 222 48 21, paul.gantenbein@solarenergy.ch, www.solarenergy.ch.
BFE Projekt-Nr./Verfügung-Nr.	100500 / 150612
Dauer des Projekts	1. November 2003 – 31. Dezember 2004

ZUSAMMENFASSUNG

Der *ClimateWell* Thermo Chemical Accumulator (TCA) wurde an den Labor System Teststand des SPF angeschlossen. Die Experimente sind bei einer Temperatur $T_{SP} = 90\text{ °C}$ und 80 °C im Solarkreis (SP) und einer Outdoor Cooler (OC) Temperatur $T_{OC} = 25\text{ °C}$ sowie einer Kühllast von 2.5 kW bis 5.5 kW durchgeführt worden. Bei $T_{SP} = 90\text{ °C}$ und 2.5 kW Kühllast erreichte das Gerät einen thermischen Wirkungsgrad COP_{th} von 0.53 sowie einen COP_{th} von 0.35 bei 5.5 kW geforderter Kühlleistung. Der sinkende COP_{th} bei steigender Kühlleistung ist auf die ungenügend zuverlässig anwendbare Temperaturdifferenz ΔT_{equ} zwischen LiCl-Wasser Lösung und Wasserkondensat als Regelführungsgrösse zurück zu führen. Diese Regelgrösse kann den Energie Zustand des Gerätes nicht richtig erfassen und so treten bei hoher geforderter Kühlleistung Zustände auf, bei denen die LiCl-Wasser Lösung und/oder das Wasser Kondensat aufgebraucht ist und deshalb die Kälteproduktion massiv reduziert.

Das in den Kältekreis (AC) gepumpte Glykol hatte bei allen Versuchen eine Temperatur T_{AC} im Bereich von 12 °C bis 18 °C . Diese Werte liegen im Bereich, der von der Klimatechnik angestrebten Temperatur Bandbreite für Kleinanwendungen. Für einen quasikontinuierlichen Betrieb wird vom entladenen auf den geladenen Tank umgeschaltet. Diese Umschaltzeit dauerte rund 30 Min während denen nur eine reduzierte Kälteleistung zur Verfügung steht. Nach der ersten Messreihe traten im Entladezyklus in Tank B Temperatur Anstiege von 30 °C bis 53 °C über einen Zeitraum von Minuten bis Stunden im Reaktor dieses Tanks auf, obwohl die OC Temperatur im Labor Prüfstand konstant bei 25 °C gehalten werden konnte. Die Ursache dieser Temperatur Anstiege muss im Rohrleitungssystem der TCA liegen, welches durch die verschiedenen, parallel geschalteten Stränge unterschiedliche Druckverluste hat und damit die Durchflüsse nicht die nötigen Kühlleistungen erbringen können. Zur Zeit werden Messungen mit tieferen Solar SP-Loop Temperaturen von 75 °C durchgeführt.

Grundsätzlich ist das *ClimateWell* Gerät funktionstüchtig. Für einen Prototypen, z.B. zu Feldversuchen, ist zum Betrieb bei hoher Kühllast, wegen der oben erwähnten Ausfälle, die Steuerung/Regelung zu ändern. Die lange dauernde Umschaltzeit von einem Tank auf den Anderen muss verkürzt werden.

Das SERC in Schweden beantragt Geld zur Durchführung einer Doktorarbeit an der neuen ca. im Januar 2005 zur Verfügung stehenden Version des TCA. Das Institut für Solartechnik SPF erhält von der Firma *ClimateWell* die neue Regelsoftware und kann dadurch in einer geplanten, weiteren Messreihe Ergebnisse von Simulationen mit Wetterdaten aus der Schweiz und/oder der Mittelmehrregion erzielen.

Projektziele

Zur Dimensionierung einer solar thermisch getriebenen Kühlanlage muss der thermische Wirkungsgrad (COP_{th} = coefficient of performance) der Kältemaschine unter Last bei den Temperaturen T_{SP} aus dem Solarkollektor bekannt sein. Nebst dem Betriebsverhalten des *ClimateWell* Thermochemical Accumulators TCA Prototypen wird der COP_{th} bei unterschiedlicher geforderter Kühlleistung (Belastung) aus Messungen bestimmt. Vorschläge zur Verbesserung der Maschine werden diskutiert.

Das *Institut für Solartechnik SPF* hat einen Labor System Teststand aufgebaut an dem solche Messungen durchgeführt werden können. Die Firma *ClimateWell AB* hat daher ein grosses Interesse an diesen Versuchen.

Durchgeführte Arbeiten und erreichte Ergebnisse

Nach dem ersten Kontakt zur Firma *ClimateWell AB* wurde ein Vertrag zum Kauf eines Gerätes abgeschlossen. Der Einbau in den *SPF* Labor System Teststand wurde geplant und die zusätzlich notwendigen Apparate und Bauteile wie Pumpen, Rohrleitung und Fühler eingekauft. Nach der Lieferung des Kühlgerätes wurde es mit Hilfe des Lieferanten installiert und in Betrieb genommen.

DAS STOFFSYSTEM LITHIUMCHLORID WASSER ALS BETRIEBSMITTEL DES TCA

In der TCA Kältemaschine wird zur Realisierung des Kreisprozesses die Salzlösung Lithiumchlorid - Wasser verwendet. Um eine hohe Leistung zu erreichen wird versucht, den Prozess an der Sättigungslinie des Lithiumchloridmonohydrates zu halten [1]. Dadurch kann die treibende Kraft der Maschine, die Druckdifferenz zwischen Wasserdampfdruck [$p(H_2O, T)$, vapour pressure] und Dampfdruck der Lithiumchloridlösung [$p(LiCl \cdot H_2O, T)$, vapour pressure] über die Temperatur der Lithiumchloridlösung kontrolliert werden.

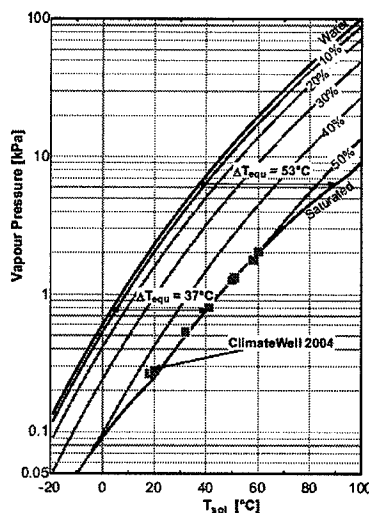


Fig. 1: Stoffdaten. Dampfdruckkurven (vapour pressure) in Funktion der Temperatur T_{sol} und der Konzentration von Wasser und Wasser - Lithiumchlorid Lösungen. Die Temperaturdifferenz ΔT_{equ} , welche bei gleichem Dampfdruck von Wasser und der gesättigten Wasser-LiCl Lösung im dynamischen Gleichgewichtszustand besteht, wird als Regelführungsgrösse genutzt [2, 3].

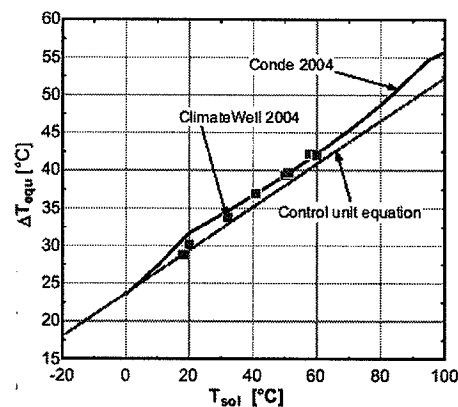


Fig. 2: Rechnungen *Conde*, Messergebnisse *ClimateWell*. Die Regelführungsgrösse ΔT_{equ} in Abhängigkeit von der Temperatur T_{sol} der Lithiumchlorid - Wasser Lösung, s. Fig. 1, [2].

Im *ClimateWell* TCA wird ein linearer Zusammenhang zwischen der $\text{LiCl} \cdot \text{H}_2\text{O}$ Temperatur T_{sol} und der Temperaturdifferenz ΔT_{equ} zwischen T_{sol} und $T_{\text{H}_2\text{O}}$, bei gleichem Dampfdruck, linear modelliert [$\Delta T_{\text{equ}} = \gamma \cdot (T_{\text{sol}} - T_{\text{H}_2\text{O}})$] und zur Steuerung und Regelung des Systems genutzt, Fig. 1 und Fig. 2.

ANSCHLUSS DES TCA AN DEN TESTSTAND

Der *ClimateWell* Thermo Chemical Accumulator (TCA) wurde an den Labor System Teststand des *SPF* angeschlossen. In jeden der drei hydraulischen Kreise, Solar, Outdoor Cooler und Air Conditioning wurde eine Förderpumpe eingebaut, um den Durchfluss von Glykol durch das Rohrleitungssystem des TCA zu gewährleisten, Fig. 3.

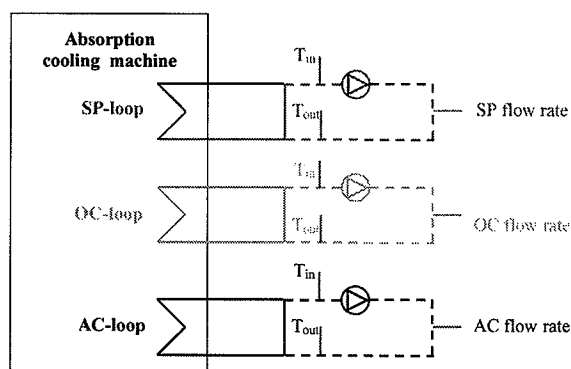


Fig. 3: Anschluss an den *SPF* Labor Teststand. Schematische Darstellung der Verbindung des Thermo Chemical Accumulators TCA an den Labor Prüfstand [5]. Die eingezeichneten Pumpen sind zusätzlich am Teststand eingebaut worden.

SP = Solar Loop / Solarkollektorkreis.

OC = Outdoor Cooler / externe Wärmeabfuhr.

AC = Air conditioning / Klimatisierung.

SCHEMATISCHE DARSTELLUNG DER THERMO CHEMICAL ACCUMULATOR TCA TANKS

In Fig. 4 und Fig. 5 ist das *ClimateWell* System TCA schematisch dargestellt. Es besteht aus zwei prinzipiell gleichen 4 Kammer Tankeinheiten mit einem Kondensator/Verdampfer, einem Reaktor, einem Salzlösungsbehälter und einem Kondensatbehälter. Die nicht kondensierbaren Gase müssen mit einer Vakuumpumpe abgepumpt werden.

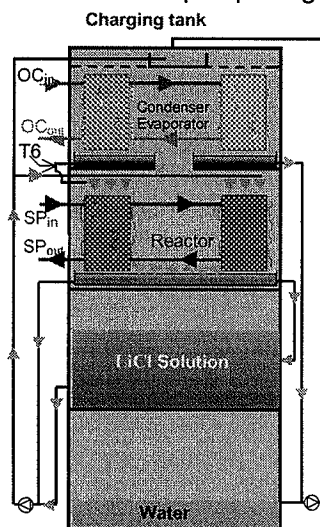


Fig. 4: Funktionsprinzip. Thermo Chemical Accumulator TCA Einheit im Belademodus (Charging). Die Einheit besteht aus vier Kammern: Kondensator/Verdampfer (ganz oben), Reaktor (Mitte oben), Tank für die LiCl -Salzlösung (Mitte unten), Wasser Kondensat Tank (ganz unten), [4, 5].

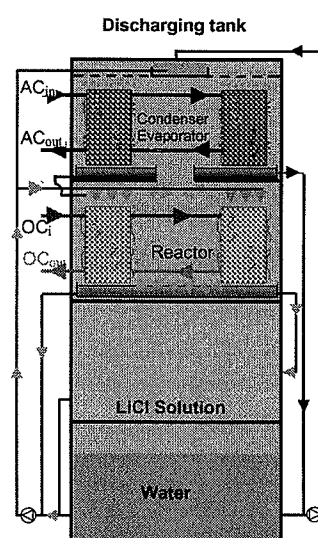


Fig. 5: Funktionsprinzip. Thermo Chemical Accumulator TCA Einheit im Entlademodus (Discharging) s. Fig. 4, [4, 5]. Rechts unten, Kondensat Pumpe P1; links unten, LiCl -Lösungs Pumpe P2.

Für einen (quasi) kontinuierlichen Betrieb als Kältemaschine sind zwei Tanks zum Aufbau eines Systems notwendig. Während der eine Tank im Entlademodus Kälte an den AC Kreis liefert wird der andere im Belademodus über die Solarkollektorkreis (SP Loop) aufgeladen. Die Besonderheit dieses Systems ist die Nutzung der kristallinen LiCl Monohydrat Phase, Fig. 1. Das System hat eine vollautomatische Steuerung/Regelung. Betriebsmittel ist das Stoffpaar Lithiumchlorid – Wasser. Die interne Verrohrung besteht zur Förderung der Salzlösung und des Kondensates. Die externe Verrohrung besteht zum Anschluss an die Wärmequellen bzw. die Wärmesenken, s. Fig. 6 bis Fig. 11.

Im Entlademodus pumpt die Kondensat Pumpe P1 (rechte Pumpe in Fig. 4/5) Wasser in den Verdampfer. Der entstehende Wasserdampf wird von der mit Pumpe P2 (linke Pumpe in Fig. 4/5) in den Reaktor gepumpten Salzlösung absorbiert. Die verdünnte Lösung fließt über die im Lademodus entstandenen und in einem Sieb zurückgehaltenen LiCl Kristalle, löst diese auf und fließt gesättigt in den Lösungsbehälter zurück. Der Lademodus, in dem die LiCl Kristalle entstehen, ist der notwendige Umkehrprozess um wieder an den Ausgangszustand zu gelangen.

BILDER DES THERMO CHEMICAL ACCUMULATORS TCA

In den Fig. 6 bis Fig. 11 sind Fotos des TCA, wie er am *SPF* Labor Teststand aufgebaut ist, zu sehen. Zur besseren Sicht auf einzelne Details wurde die Wärmedämmung z.T. entfernt.

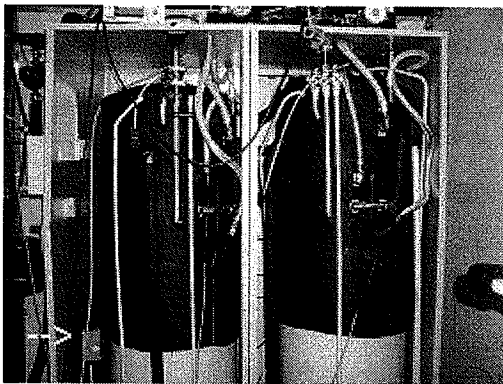


Fig. 6: Foto der Tankoberseiten, links Tank A, rechts Tank B. Als Hilfe für das Auge dient das links auf ca. halber Höhe installierte grüne, vier-eckige Ventil (Pfeil).

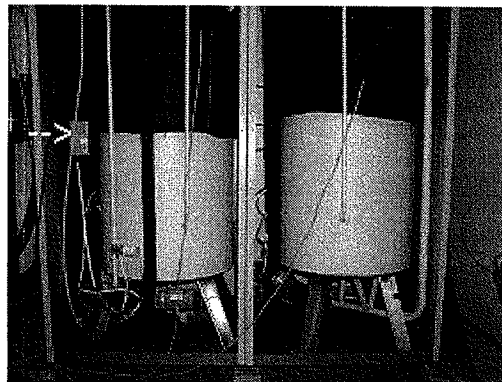


Fig. 7: Foto der Tankunterseiten, links Tank A, rechts Tank B. Als Hilfe für das Auge dient das links auf ca. halber Höhe installierte grüne, vier-eckige Ventil (Pfeil).

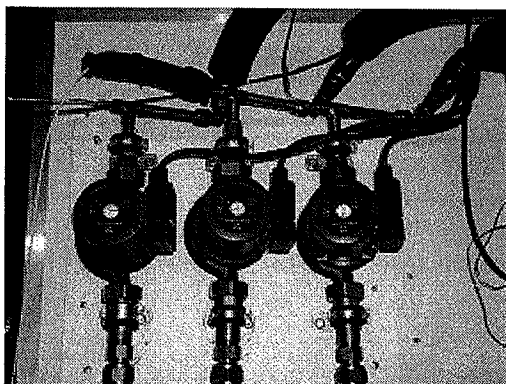


Fig. 8: Foto der 3 Pumpen in den drei Verbindungskreisläufen des Laborprüfstandes mit dem TCA.

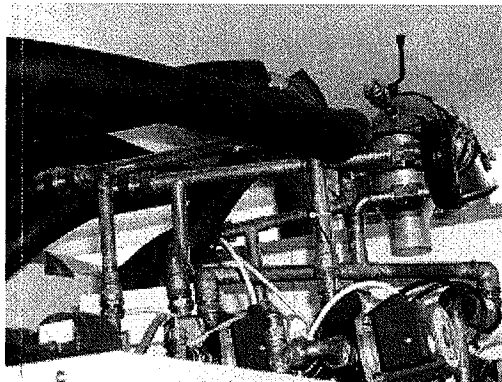


Fig. 9: Foto einer Teilansicht der System internen Verrohrung des TCA.

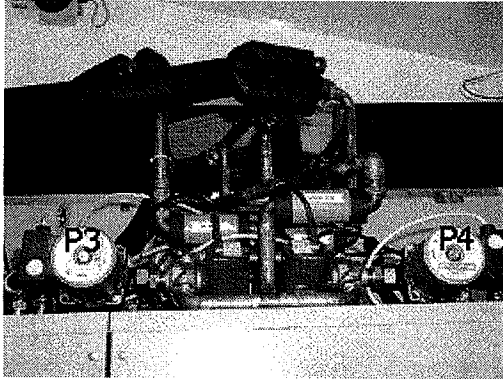


Fig. 10: Foto einer Teilansicht der System internen Verrohrung des TCA; Seitenansicht zu Fig. 9. Pumpe P3 Tank A, Pumpe P4 Tank B.

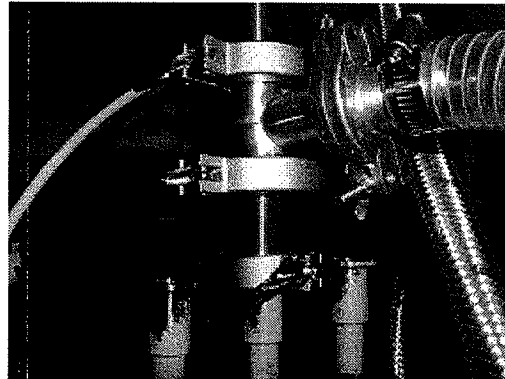


Fig. 11: Foto der 3 Vakuumstutzen des Tankes A des TCA. Ein regelmässiges Abpumpen der eindiffundierten und nicht kondensierbaren Gasen aus dem System ist notwendig.

EXPERIMENTE, RESULTATE & DISKUSSION

Der Experimentelle Aufbau mit dem Teststand und dem TCA ist in obigen Abschnitten vereinfacht dargestellt. Mit dem System Teststand wird der Betrieb der benötigten Wärmequellen und – Senken AC und OC sowie der Solarkollektoren künstlich, jedoch mit echten Energieströmen, durchgeführt. Dadurch kann das System unter simulierten Betriebsbedingungen, die der Realität entsprechen, getestet werden. Während diesen Messungen ist auch das Betriebsverhalten des TCA mit einem zusätzlichen Rechner erfasst worden.

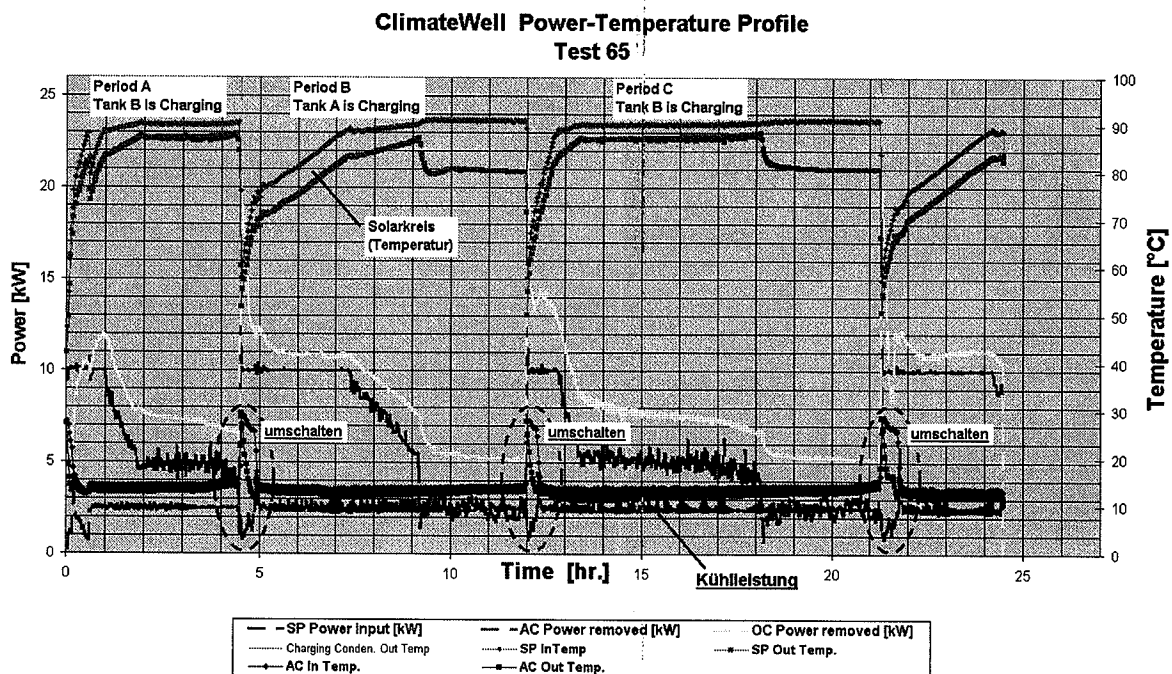


Fig. 12: Messung SPF. Temperaturen und Leistungen in Funktion der Zeit über 24.5 h. Solarkreis Betrieb bei 10 kW Heizleistung und einer Temperatur Begrenzung auf $T_{SP} = 90\text{ °C}$. Air Conditioner loop mit einem kontinuierlichen Anstieg über 30 Min. auf 2.5 kW Leistung und danach konstant bei 2.5 kW Leistungsbedarf. Bestimmung des COP_{th} für eine Kühlleistung von 2.5 kW bei einer OC loop Temperatur von $T_{OC} = 25\text{ °C}$ [5].

In Fig. 12 ist eine Messung für eine Kühlleistung von 2.5 kW über die Zeit von 24.5 h dargestellt. Bei dieser Messung wurde eine Temperatur von $T_{SP} = 90^\circ\text{C}$ im Solarkreis vorgegeben.

Das System liefert bei einem Kühllast Bedarf von 2.5 kW Kälte bei 12°C bis 13°C . Da es sich beim TCA um ein System mit zwei äquivalenten Einheiten (Tanks) handelt, muss vom einen auf den anderen umgeschaltet werden, wenn das Wasser Kondensat und/oder die Salzlösung aufgebraucht ist, Fig. 4. Bei diesem Umschaltvorgang fällt die Kühlleistung deutlich ab (umschalten in Fig. 12) und die Temperatur im Kältekreis steigt an. Bis jedoch aus dem zweiten Tank nun die gleiche Kühlleistung zur Verfügung steht dauerte es rund 30 Min. Für einen kontinuierlichen Kühlbetrieb ist diese Umschaltzeit zu lange.

Steigt der Bedarf an Kühlleistung auf 5.5 kW an, dann tritt neben dem oben geschilderten schaltungsbedingten Leistungsabfall ein Abfall der Kälteleistung auf 0 kW ein, Fig. 13. Dieser Fall tritt ein, weil das Kondensat und/oder die Salzlösung aufgebraucht ist. Ein (rechnerisches) absinken des COP_{th} geht damit einher.

Der sinkende COP_{th} bei steigender Kühlleistung ist auf die ungenügend zuverlässig anwendbare Temperaturdifferenz ΔT_{equ} zwischen LiCl-Wasser Lösung und Wasserkondensat als Regelführungsgrösse zurück zu führen. Diese Regelgrösse kann den Energie Zustand des Gerätes nicht richtig erfassen und so treten bei hoher geforderten Kühlleistung Zustände auf, bei denen die LiCl-Wasser Lösung und/oder das Wasser Kondensat aufgebraucht ist und die Steuerung registriert dies nicht. Ein abruptes Absinken der Kühlleistung bis auf 0 kW ist daher nicht zu verhindern, bzw. die Steuerung des Gerätes schaltet nicht rechtzeitig auf den anderen, mindestens teilweise geladenen Tank um.

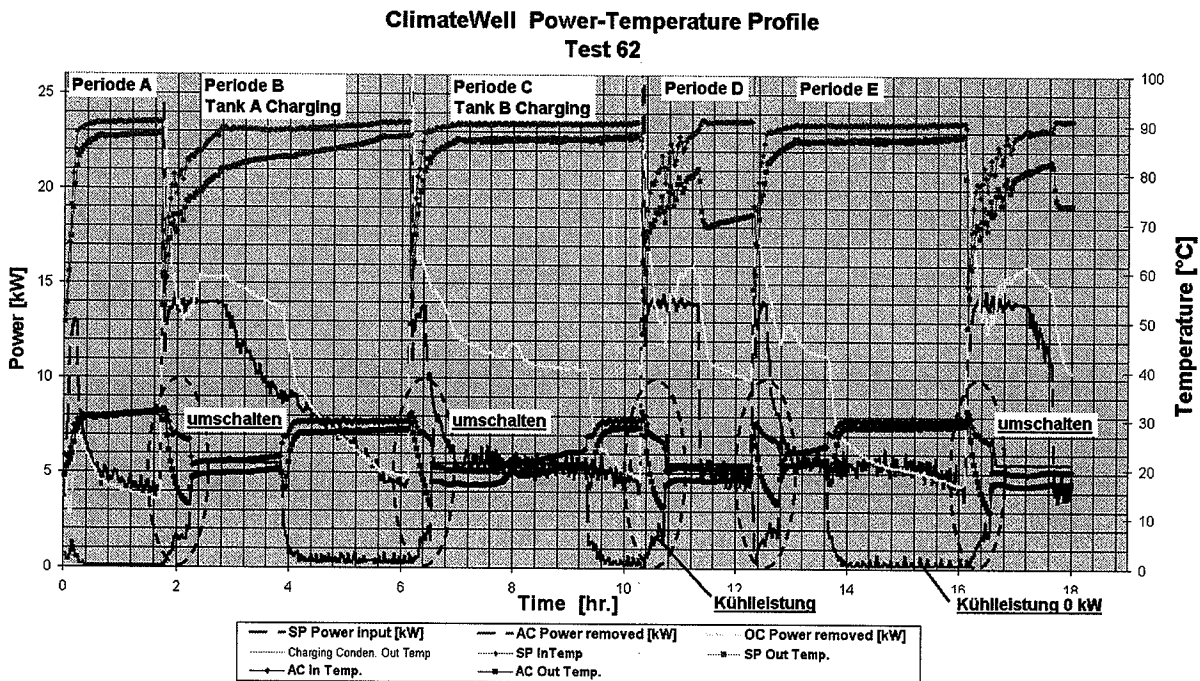


Fig. 13: Messung SPF. Temperaturen und Leistungen in Funktion der Zeit über 18 h. Solar loop Betrieb bei 14 kW Heizleistung und einer Temperatur Begrenzung auf $T_{SP} = 90^\circ\text{C}$. Air Conditioner loop mit einem kontinuierlichen Anstieg über 30 Min. auf 5.5 kW Leistungsbedarf. Bestimmung des COP_{th} für eine Kühlleistung von 5.5 kW bei OC loop Temperatur von $T_{OC} = 25^\circ\text{C}$. Die AC Leistung fällt oft auf 0 kW (Perioden 0 – 2 hr, 4 – 6 hr, etc.), weil die Salzlösung/das Kondensat aufgebraucht ist und die Regel Führungsgrösse ΔT_{equ} diesen Zustand nicht detektieren kann [5].

Das in den AC-Kreis gepumpte Glykol hatte bei allen Versuchen (ausser beim Leistungsabfall in den Versuchen hoher Kühllast) eine Temperatur T_{AC} im Bereich von 12 °C bis 18 °C. Diese Werte liegen im Bereich, der von der Klimatechnik angestrebten Temperatur Bandbreite.

Nach der ersten Messreihe traten im Entladezyklus in Tank B Temperatur Anstiege von 30 °C bis 53 °C über einen Zeitraum von Minuten bis Stunden im Reaktor dieses Tanks auf, obwohl die OC Temperatur im Labor Prüfstand konstant bei 25 °C gehalten werden konnte. Die Ursache dieser Temperatur Anstiege muss im Pumpen-/Rohrleitungssystem der TCA liegen, welches je nach Schaltzustand durch die verschiedenen, parallel geschalteten Stränge unterschiedliche Druckverluste hat und damit die Durchflüsse nicht die nötigen Kühlleistungen erbringen können. Eine allfällige graduell zunehmende Verstopfung der Flüssigkeit führenden Rohre durch Feststoff Ablagerungen kann eine weitere Ursache sein; dies wurde aber nicht festgestellt.

Bei den Versuchen mit einer Solarkreis Temperatur von $T_{SP} = 80$ °C wurde die Messzeit auf 100 h ausgedehnt. Damit konnten mehrere Lade- und Entladezyklen zur Bestimmung des Wirkungsgrades (COP_{th}) genutzt werden. Die drei Messpunkte in Fig. 14 (Symbol) zeigen einen maximalen COP_{th} von 0.58 und einen minimalen von 0.5 bei der Temperatur $T_{SP} = 80$ °C. Durchschnittlich liegen diese Punkte über jenen der Messpunkte mit $T_{SP} = 90$ °C (◇ Symbol), da die Verluste bei der tieferen Solarkreis Temperatur geringer sind. Den Messpunkten wurden lineare Kurven angepasst.

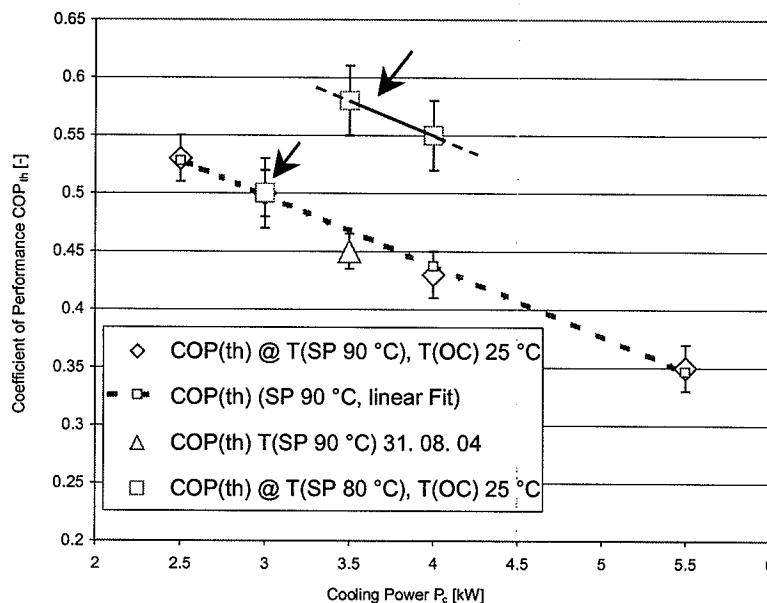


Fig. 14: Thermischer Wirkungsgrad COP_{th} des TCA in Funktion der geforderten Kühlleistung P_c . Den Messdaten bei einer Temperatur von $T_{SP} = 90$ °C im Solarkreis wurden zur Hilfe für das Auge eine lineare Funktion angepasst [5]. Die Bestimmung des COP_{th} vom 31. 08. 04 diente als Referenz Messung nachdem Veränderungen an der externen Verrohrung gemacht wurden. Der höhere COP_{th} bei Temperaturen von $T_{SP} = 80$ °C im Solarkreis (Pfeile) kommt durch geringere Verluste zu Stande.

Nationale Zusammenarbeit

Im Rahmen dieses Projektes war keine Zusammenarbeit mit nationalen Partner geplant.

Internationale Zusammenarbeit

Mit der Firma *ClimateWell AB* besteht ein Vertrag (*purchase agreement*) zum Kauf eines Thermo Chemical Accumulators (TCA). In diesem Vertrag wurde auch die vertrauliche Behandlung der Daten und Resultate vereinbart. Dieses Kälteaggregat wurde von *SPF* mit Unterstützung des Lieferanten in unsern Teststand eingebaut. Das *Institut für Solartechnik SPF* hat die Messdaten mit dem Lieferanten diskutiert, bewertet und *ClimateWell* zur Verfügung gestellt. In einem folgenden Schritt wird die neue TCA Software von *ClimateWell* geliefert und auf dem Steuerungsrechner installiert.

Bewertung 2004 und Ausblick 2005

Grundsätzlich ist das *ClimateWell* Kühl-/Klimagerät funktionstüchtig. Es sind aber noch viele Fragen offen bezüglich optimiertem Betrieb und Langzeitstabilität der Materialien. Für einen Prototypen, z.B. zu Feldversuchen, ist zum Betrieb bei hoher Kühllast, wegen der oben erwähnten Ausfälle, die Steuerung/Regelung zu ändern. Die lange dauernde Umschaltzeit unter Last, von einem Tank auf den Anderen, muss verkürzt werden.

Durch die Probleme der Wärmeabfuhr aus den Reaktoren des TCA musste viel Zeit zur Analyse und Behebung aufgewendet werden. So wurde das Fördervolumen von TCA Pumpen (P3, P4) gemessen sowie mehrere elektromagnetische Ventile auf ihre Leckrate getestet. Einzelne dieser Bauteile wurden ersetzt um weitere Messungen am System machen zu können.

Der TCA arbeitet beim Dampfdruck von Wasser bzw. der Lithiumchloridlösung von einigen mbar. Daher wird die Leistung des Systems durch die Leckage der Tanks und der Vakuumventile, für bei Betriebstemperaturen nicht kondensierbare Gase, beeinflusst. Ein regelmässiges Abpumpen dieser nicht kondensierbaren Gase mit einer Vakuumpumpe ist daher unerlässlich. Dies ist eine Prozesseigenschaft, wie sie auch von Feststoff Adsorptionskältemaschinen bekannt ist.

Durch Recherchen und Gespräche wird eruiert ob weitere Firmen, Institute oder Organisationen auf dem Gebiet der Nutzung eines 3 Phasen (Dampf, flüssig, kristallin) Material Systems aktiv sind oder aktiv werden. Für diese Art der Prozessführung zur Kühlung würden sich vermutlich auch andere Salzlösungen wie z.B. Calciumchlorid - Wasser eignen.

Das *SERC* in Schweden beantragt Geld zur Durchführung einer Doktorarbeit an der neuen ca. im Dezember 2004/Januar 2005 zur Verfügung stehenden Version des TCA.

Mit der Firma *ClimateWell* werden Gespräche geführt, wie weit andere Sensoren dem Gerät eingebaut und deren Signal als Regelführungsgrösse genutzt werden kann. Dadurch liesse sich der thermische Wirkungsgrad COP_{th} des Systems voraussichtlich steigern. *ClimateWell AB* hat uns die Lieferung einer neuen Steuerungs-/Regelungssoftware zugesagt, mit dieser sollte der Ausfall der Maschine bei hoher geforderter Kühllast nicht/später eintreten. Nach der Ausarbeitung eines TRNSYS Files könnten Simulationen mit Wetterdaten z.B. aus der Schweiz oder dem Mittelmeer Raum durchgeführt und der „Solare Deckungsgrad zur Kühlung“ durch den TCA bestimmt werden.

Da die Arbeiten noch nicht beendet sind, ist zur Zeit geplant, dass der Praktikant Tarek El Shafey die neuen Vorarbeiten durchführen wird. Nach Möglichkeit kann später ein Student der Hochschule für Technik Rapperswil HSR eine Diplomarbeit zu diesem Thema durchführen.

Referenzen

- [1] **Thermo Chemical Accumulator – TCA.** Setterwall F., Bales Ch., Bolin G., Preprint from Proceedings ISES 2003 World Congress.
- [2] **Development of the Thermo Chemical Accumulator (TCA),** Bales Ch., Setterwall F., Bolin G., Eurosun 2004 Freiburg Germany.

- [3] **Properties of aqueous solutions of lithium and calcium chlorides: formulations for use in air conditioning equipment design.** Conde M. R., International Journal of Thermal Sciences 43 (4) 2004.
- [4] **A Chemical Heat Pump.** Olsson et al., World Patents Register, WO0037864, 2000.
- [5] **Investigation and Analysis of an Absorption Cooling Machine Prototype.** Tarek El Shafey, Master Thesis 2004, Institut für Solartechnik SPF Hochschule für Technik Rapperswil HSR.