

Optimierung und online Überwachung eines neuen Systemreglerkonzepts für kombinierte Anlagen zur solaren Kälteerzeugung und Heizungsunterstützung durch betriebsbegleitende Simulationen

Dirk Pietruschka^{1*}, Uli Jakob², Sven Saulich², Ursula Eicker¹, Victor Hanby³

¹zafh.net - Centre of Applied Research Sustainable Energy Technologies
University of Applied Sciences Stuttgart, Schellingstr. 24, 70174 Stuttgart

²SolarNext AG, Nordstrasse 10, 83253 Rimsting

³Institute of Energy and Sustainable Development De Montfort University,
The Gateway, Leicester LE1 9BH UK

*dirk.pietruschka@hft-stuttgart.de, Tel +49 711 8926 2674, Fax +49 711 8926 2698

1. Einleitung

Die Effizienz und Wirtschaftlichkeit solarer Kälteanlagen wird ganz entscheidend von den implementierten Regelstrategien der Solaranlage, der Absorptionskältemaschine, der Rückkühlung, der Kälteverteilung und dem Zusammenspiel der Regelung der Einzelkomponenten im Gesamtsystem bestimmt [1-3]. Die optimale Regelung solcher Anlagen ist auf Grund der Vielzahl von sich gegenseitig beeinflussenden Komponenten eine hoch komplexe Aufgabe, die mit einer Kombination aus marktverfügbaren Einzelreglern der Komponenten in der Regel nicht zufrieden stellend zu lösen ist. Um diesem Problem entgegen zu wirken, entwickelt die SolarNext AG für ihre chillii[®] Solar Cooling Systeme derzeit einen optimierten Systemregler der die Regelung aller Komponenten einer solar betriebenen Kälteanlage übernimmt und darüber hinaus auch eine optimale Regelung der Solaranlage zur Heizungsunterstützung im Winter ermöglicht. Im Rahmen von detaillierten Voruntersuchungen [1] konnten bereits optimierte Regelstrategien für solare Kälteanlagen entwickelt werden, die nun in konkrete Regelalgorithmen umgesetzt wurden. Vor der Implementierung werden die entwickelten Algorithmen zunächst an einem detaillierten dynamischen Simulationsmodell der Gesamtanlage in der Simulationsumgebung INSEL [4] getestet und optimiert. Das Simulationsmodell wurde anhand umfassender Messdaten validiert. Der Fokus der hier vorgestellten Untersuchungen liegt auf der Teillastregelung und der Optimierung des Einschaltzeitpunkts der Absorptionskälteanlage am Vormittag bei reinem Solarbetrieb. Hierzu wurden mehrere Regelvarianten mit und ohne Umgehung des Wärmespeichers untersucht und gesamtenergetisch inklusive aller parasitären Stromverbräuche ausgewertet. Diese Untersuchungen wurden für eine chillii[®] Solar Cooling Anlage durchgeführt, die seit Sommer 2007 der Klimatisierung der Büroräume der Fa. SolarNext dient. Ein erster Prototyp des entwickelten Systemreglers wird im Frühjahr in die Gesamtanlage integriert und während der kommenden Kühlperiode hinsichtlich des Regelverhaltens

mit Hilfe von online Simulationen basierend auf dem entwickelten dynamischen Gesamtmodell der installierten Anlage detailliert überwacht und weiter optimiert.

2. Beschreibung des untersuchten chillii Solar Cooling Systems

Die untersuchte solar betriebene Absorptionskälteanlage wurde Anfang 2007 im einstöckigen Bürogebäude der SolarNext AG in Rimsting installiert (Abbildung 1). Zur Kälteverteilung werden im Gebäude in den Räumen teilweise Umluftkühlgeräte und teilweise Kühldecken installiert. Beide Systeme werden auf relativ hohem Temperaturniveau bei geringer Spreizung mit 16°C Vorlauf- und 18°C Rücklaufemperatur betrieben. Die maximale Kühllast des Gebäudes bewegt sich nach durchgeführten Gebäudesimulationen mit TRNSYS je nach zugrunde liegendem Wetterdatensatz zwischen 14 und 21 kW.



Abbildung 1: Bürogebäude und Cillii® Solar Cooling System der SolarNext AG, Rimsting

Zur Kälteversorgung wurde eine Wegracal SE 15 Absorptionskältemaschine der Fa. EAW mit einer Nennkühlleistung von 15 kW installiert. Die zum Antrieb der Kälteanlage nötige Wärmeenergie liefert ein Kollektorfeld bestehend aus 37 m² CS-100 F Flachkollektoren und 29 m² TH Solar Vakuumpippenkollektoren die gemeinsam an zwei 1 m³ große Wärmespeicher angeschlossen sind. Kälteseitig wurde ein 1m³ großer Kältespeicher in das System integriert. Bei zu geringem Solarangebot steht zur Nachheizung ein Gaskessel zur Verfügung.

3. Simulationsmodell und untersuchte Varianten zur Regelung

Im Rahmen der Reglerentwicklung wurde zur Untersuchung unterschiedlicher Regelkonzepte ein dynamisches Simulationsmodell der installierten solar betriebenen Kälteanlage inklusive aller Komponenten und Rohrleitungen in INSEL [4] entwickelt und anhand von Messdaten validiert. Wie ein Vergleich zwischen real gemessenen Daten und simulierten Werten in Abbildung 2 zeigt, wird das reale

dynamische Verhalten durch das entwickelte Simulationsmodell gut abgebildet. Somit können Regelkonzepte mit Hilfe des Simulationsmodells mit hoher Genauigkeit entwickelt, getestet und optimiert werden.

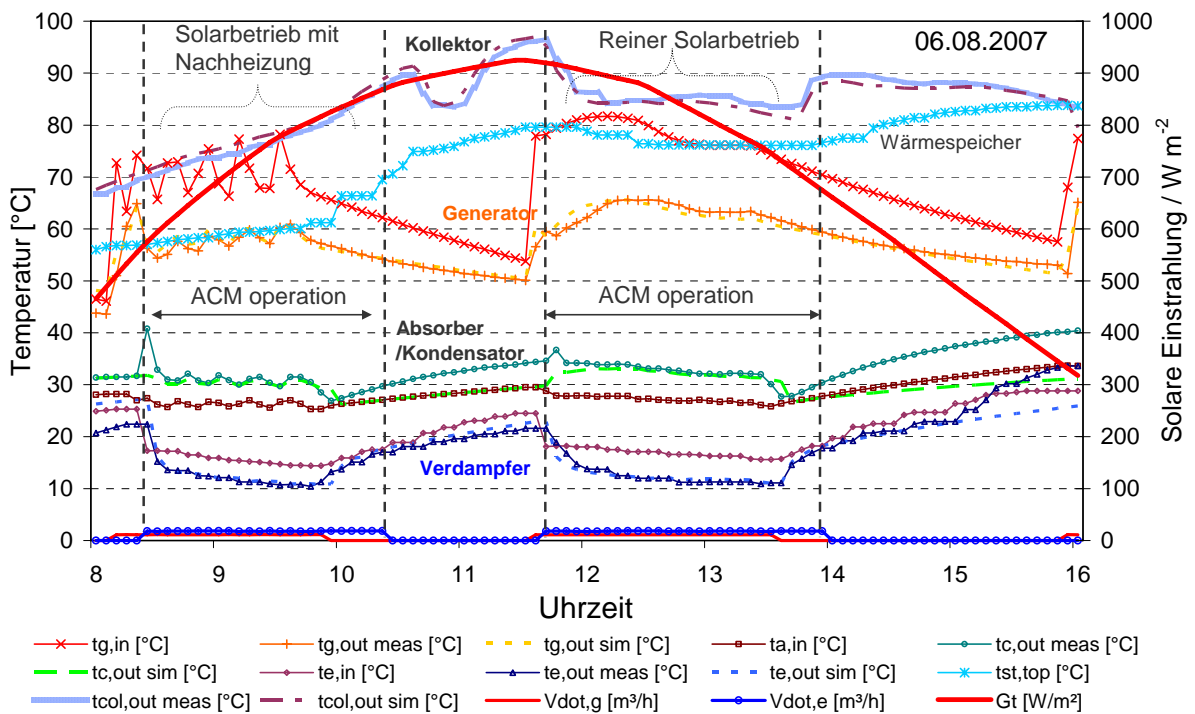


Abbildung 2: Modellvalidierung; Vergleich zwischen Messung und Simulation

Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen war die Analyse und Optimierung von Regelkonzepten für den reinen Solarbetrieb der unter Abschnitt 2 beschriebenen Absorptionskälteanlage. Da Absorptionskälteanlagen häufig unter Teillast betrieben werden wurden insbesondere einfache und stabile Konzepte zur Teillastregelung der Kälteanlage betrachtet. Neben einer möglichst einfachen und stabilen Regelung wurden dabei auch regelungstechnische Möglichkeiten zur Optimierung des Anlagen-Startups am Vormittag untersucht. Insgesamt waren folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Kann bei der Integration eines Kältespeichers auf eine Regelung der Generatoreintrittstemperatur verzichtet werden?
- Welche untere Verdampferaustrittstemperatur ist unter gesamtenergetischen Gesichtspunkten als Ausschaltkriterium für die Absorptionskältemaschine am sinnvollsten?
- Um wie viel schneller kann die Absorptionskältemaschine in Betrieb genommen werden, wenn der Wärmespeicher durch einen Bypass umgangen wird?

- Wie sollte die Speicherladeregulung in diesem Fall aussehen um einen stabilen Anlagenbetrieb zu ermöglichen und zu hohe Temperaturen im Solarkreis zu vermeiden.

Hierzu wurden folgende Varianten untersucht:

Tabelle 1: Untersuchte Varianten

	Bypass Wärmespeicher	$t_{g,in\ start}$ [°C]	$t_{g,in\ min}$ [°C]	$t_{e,out\ min}$ [°C]	$t_{c,sup}$ [°C]	$t_{c,ret}$ [°C]	$t_{a,in}$ [°C]
Variante 1	nein	75	65	11	16	18	27
Variante 2	nein	75	65	7	16	18	27
Variante 3	Ja	75	65	11	16	18	27
Variante 4	Ja	75	65	7	16	18	27

$t_{g,in\ start}$: Minimale Generatoreintrittstemperatur für Startup
 $t_{g,in\ min}$: Minimale Generatoreintrittstemperatur als Ausschaltkriterium
 $t_{e,out\ min}$: Minimale Verdampferaustrittstemperatur als Ausschaltkriterium
 $t_{c,sup} / t_{c,ret}$: Vor- und Rücklauf der Kälteverteilung im Gebäude
 $t_{a,in}$: Sollwert der Absorbereintrittstemperatur (Rückkühlkreis über Nasskühlturm mit Drehzahlregelung des Ventilators)

4. Ergebnisse

Die wesentlichen Ergebnisse der durchgeführten Untersuchungen sind beispielhaft für Variante 1 und Variante 3 für einen schönen Tag nach einer Schlechtwetterperiode in den Abbildungen 3 und 4 und zusammenfassend in Tabelle 2 dargestellt.

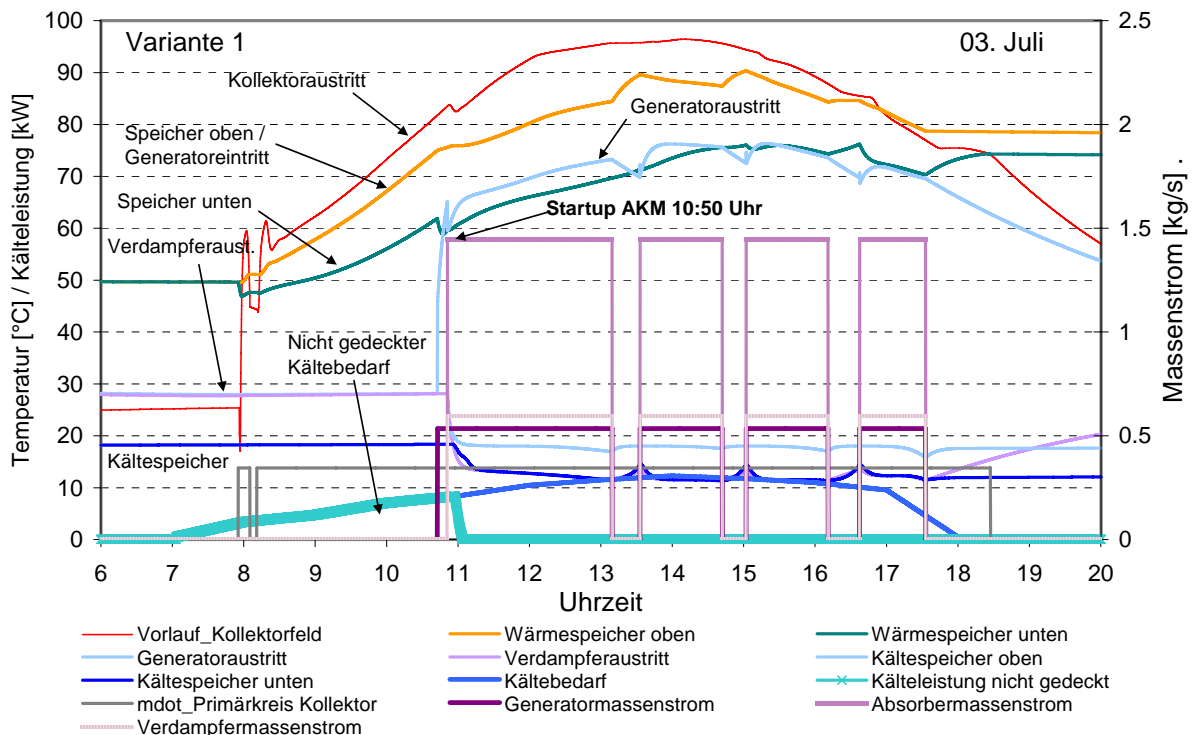


Abbildung 3: Simulationsergebnisse Variante 1 (ohne Bypass)

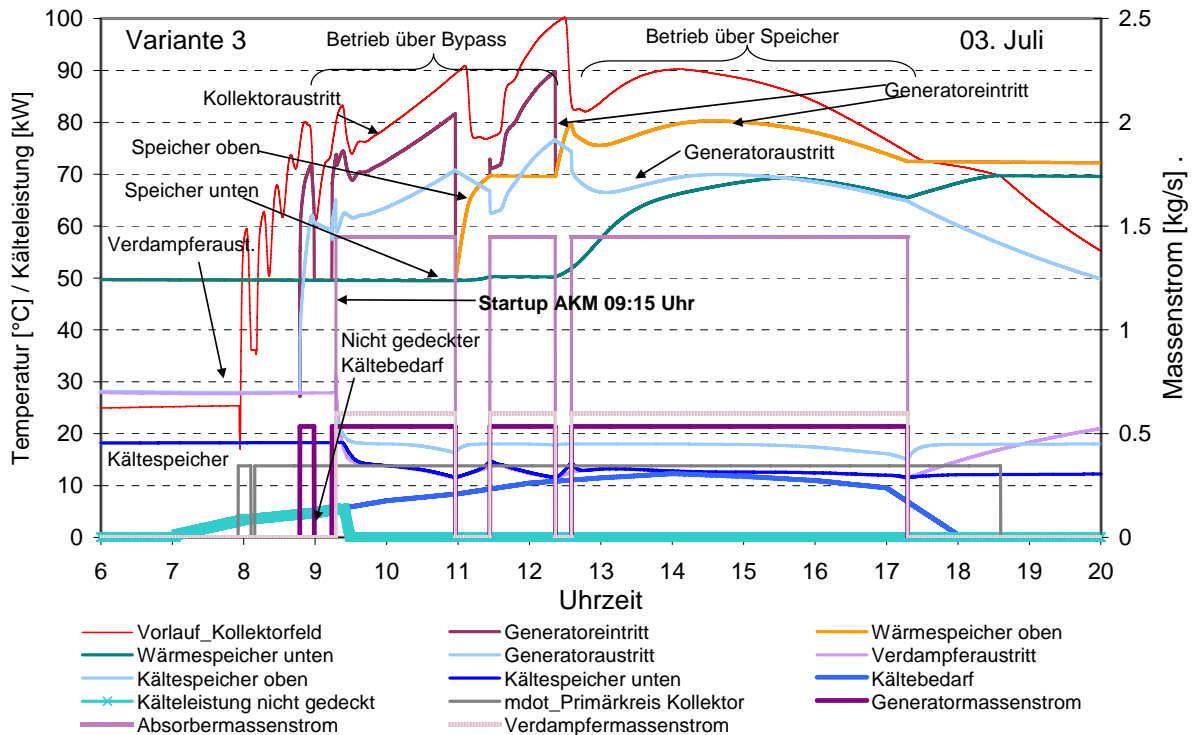


Abbildung 4: Simulationsergebnisse Variante 3 (mit Bypass)

Wie in den Abbildungen zu erkennen ist, beträgt die Speichertemperatur zu Beginn der Tagessimulation nach einer Schlechtwetterperiode ca. 50°C. Auf Grund der Ost-/Westorientierung der Fensterflächen des Gebäudes wird bei sonnigem Wetter vom Kühlsystem bereits ab 7:30 Uhr eine geringe Kälteleistung angefordert. Die Absorptionskältemaschine kann ohne Bypass des Wärmespeichers (Variante 1 und 2) allerdings erst ab 10:50 Uhr in Betrieb gehen, so dass ohne Nachheizung etwa 20 % der Kälteenergie an diesem Tag nicht gedeckt werden kann. Bei Variante 3 und 4 mit Bypass wird zunächst der primäre Solarkreis durch Betrieb der Kollektorpumpe aufgeheizt. Sobald dieser die Startup-Temperatur der AKM um 5 K überschritten hat, wird sekundärseitig über den Speicherbypass der Heizkreis samt Generator der AKM erwärmt. Die Verdampfer- und Rückkühlpumpe gehen in Betrieb sobald die Generatöraustrittstemperatur größer als 65 °C ist. Durch diese Bypassregelung kann die AKM bereits um 9:15 Uhr, also 1:35 h eher in Betrieb gehen, wodurch 91% der angeforderten Kälteenergie gedeckt werden kann.

Tabelle 2: Ergebnisse

	Startup AKM	Q _{cool} [kWh]	ΔQ _{cool} [kWh]	ΔQ _{cool} [%]	COP _{th}	COP _{el} ^{*)}
Variante 1	10:50 Uhr	91	20	22	0.74	7.9
Variante 2	10:50 Uhr	91	20	22	0.72	7.6
Variante 3	09:15 Uhr	91	8.2	9	0.73	7.7
Variante 4	09:15 Uhr	91	8.2	9	0.71	7.4

*) Bezogen auf Gesamtstromverbrauch inkl. AKM, Kollektorpumpen, Rückkühlwerk und Kälteverteilpumpe

Abgesehen vom Startup-Zeitpunkt zeigt sich bei allen betrachteten Varianten, dass ein stabiler Betrieb der Kältemaschine auch ohne Temperaturregelung am Generatoreintritt erreicht wird und stets ausreichend kaltes Wasser im Kältespeicher für den Gebäudekühlkreis vorhanden ist. Zur Regelung der Vorlauftemperatur des Kältekreises wird auf Grund der niedrigeren Temperaturen im Kältespeicher eine Rücklaufbeimischung über ein Dreiwegeventil mit entsprechender PID-Regelung erforderlich. Insbesondere für einen direkten Solarbetrieb mit hohen Temperaturschwankungen im Heizkreis ist eine Vorlauftemperaturregelung im Kältekreis im Vergleich zum Heizkreis regelungstechnisch deutlich unproblematischer, da sich Temperaturschwankungen im Heizkreis auf Grund der hohen Wärmespeicherung durch die Absorptionskältemaschine selbst und des Kältespeichers nur sehr gedämpft auf den Kältekreis durchschlagen. Eine tiefere Verdampferaustrittstemperatur als Ausschaltkriterium für die Absorptionskältemaschine von 7°C in Variante 2 und 4 hat zwar einen etwas konstanteren Betrieb der AKM zur Folge, führt aber im Gegenzug zu einem um 3 % geringeren thermischen COP der auf Grund der längeren Laufzeit der AKM mit einem um 4% geringeren elektrischen COP verbunden ist. Die in diesem Fall niedrigeren Kaltwassertemperaturen im Kältespeicher bieten für den direkten Solarbetrieb jedoch einen etwas größeren Puffer um z.B. kurzzeitig auftretende Bewölkung abzufangen. Der Bypass sollte grundsätzlich so geregelt werden, dass der Speicher in den Betriebspausen der AKM von der Solaranlage geladen wird und dass bei zu hohen Temperaturen im Heizkreis z.B. über 85°C der Rücklauf der AKM als Wärmequelle in den Speicher eingespeist wird. Sobald der Speicher im oberen fünftel die Startup-Temperatur erreicht hat, sollte die AKM über den Wärmespeicher und nicht mehr über den Bypass betrieben werden wie auch in Abbildung 4 zu erkennen ist. Um das Regelungskonzept auf breiterer Basis zu testen werden weitere Analysen für typische Teillastprofile durchgeführt bevor das Regelkonzept dann für die Kühlperiode 2008 an der realen Anlage umgesetzt und die implementierten Regelfunktionen durch betriebsbegleitende Simulationen überwacht und weiter optimiert werden.

Referenzen:

- [1] Pietruschka, D., Jakob, U., Eicker, U., Hanby, V. "Simulation based optimisation and experimental investigation of a solar cooling and heating system "Solar Air-Conditioning, international conference, Taragona, Spain, 2007
- [2] Kohlenbach, P. "Solar cooling with absorption chillers: Control strategies and transient chiller performance", Dissertation Technische Universität Berlin, 2006
- [3] Henning, H.-M. "Solar-assisted air-conditioning in buildings – a handbook for planners", Springer-Verlag 2004, ISBN 3-211-00647-8
- [4] Schumacher, J. "Digitale Simulation regenerativer elektrischer Energieversorgungssysteme", Dissertation Universität Oldenburg, 1991 www.inselDi.com