

SolarCooling Monitor

Evaluierung Energieeffizienz und Betriebsverhalten
von solarthermischen Kühlanlagen zur Gebäudekühlung
in Österreich

A. Preisler, A. Thür, D. Neyer, H. Focke

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

28/2012

Impressum:

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber:
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe unter
<http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

SolarCooling Monitor

Evaluierung Energieeffizienz und Betriebsverhalten
von solarthermischen Kühlanlagen zur Gebäudekühlung
in Österreich

Ing. Anita Preisler
AIT – Austrian Institute of Technology

DI Alexander Thür PhD
AEE INTEC

DI Daniel Neyer
Universität Innsbruck (UIBK-EEB)

DI Hilbert Focke
ASIC – Austria Solar Innovation Center

Wien, Juni 2012

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Vorwort

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm *Haus der Zukunft* des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie.

Die Intention des Programms ist, die technologischen Voraussetzungen für zukünftige Gebäude zu schaffen. Zukünftige Gebäude sollen höchste Energieeffizienz aufweisen und kostengünstig zu einem Mehr an Lebensqualität beitragen. Manche werden es schaffen, in Summe mehr Energie zu erzeugen als sie verbrauchen („Haus der Zukunft Plus“). Innovationen im Bereich der zukunftsorientierten Bauweise werden eingeleitet und ihre Markteinführung und -verbreitung forciert. Die Ergebnisse werden in Form von Pilot- oder Demonstrationsprojekten umgesetzt, um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten.

Das Programm *Haus der Zukunft Plus* verfolgt nicht nur den Anspruch, besonders innovative und richtungsweisende Projekte zu initiieren und zu finanzieren, sondern auch die Ergebnisse offensiv zu verbreiten. Daher werden sie in der Schriftenreihe publiziert und elektronisch über das Internet unter der Webadresse <http://www.HAUSderZukunft.at> Interessierten öffentlich zugänglich gemacht.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

Inhaltsverzeichnis

1	KURZFASSUNG /ABSTRACT.....	2
1.1	KURZFASSUNG.....	2
1.2	ABSTRACT	4
2	EINLEITUNG	6
2.1	ALLGEMEINE EINFÜHRUNG IN DIE THEMATIK	6
2.2	AUSGANGSSITUATION/MOTIVATION DES PROJEKTES	7
2.3	PROJEKTZIELE.....	8
2.4	KURZBESCHREIBUNG DES AUFBAUS (KAPITEL) DES ENDBERICHTS.....	8
3	HINTERGRUNDINFORMATIONEN ZUM PROJEKTINHALT.....	10
3.1	BESCHREIBUNG DES STANDES DER TECHNIK	10
3.2	INNOVATIONSGEHALT	10
3.3	VERWENDETE METHODEN.....	11
3.4	VORGANGSWEISE UND VERWENDETE DATEN.....	12
3.4.1	<i>Monitoring solarthermische Kühlanlagen.....</i>	<i>12</i>
3.4.2	<i>Simulationen</i>	<i>12</i>
3.4.3	<i>Optimierungen/Erkenntnisse</i>	<i>14</i>
3.4.4	<i>Dissemination</i>	<i>14</i>
4	ERGEBNISSE DES PROJEKTS	15
4.1	MONITORING.....	15
4.1.1	<i>Vorstellung der elf vermessenen Anlagen.....</i>	<i>15</i>
4.1.2	<i>Messergebnisse im Überblick.....</i>	<i>19</i>
4.1.3	<i>Ausgewählte Messergebnisse im Detail.....</i>	<i>23</i>
4.2	SIMULATION	27
4.2.1	<i>Verwendete Tools und Vorgangsweise</i>	<i>27</i>
4.2.2	<i>Referenzanlage</i>	<i>28</i>
4.2.3	<i>Ergebnisse Einzelanlagen und Highlights.....</i>	<i>32</i>
4.2.4	<i>Conclusio.....</i>	<i>38</i>
4.3	ERKENNTNISSE / OPTIMIERUNGEN	40
4.3.1	<i>Allgemein gültige Erkenntnisse.....</i>	<i>40</i>
4.3.2	<i>Anlagenkonfiguration</i>	<i>40</i>
4.3.3	<i>Regelung/Monitoring.....</i>	<i>41</i>
4.3.4	<i>DEC Anlagen.....</i>	<i>41</i>
4.3.5	<i>Anlagen mit Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen.....</i>	<i>42</i>
5	DETAILANGABEN IN BEZUG AUF DIE ZIELE DES PROGRAMMS	44
6	SCHLUSSFOLGERUNGEN ZU DEN PROJEKTERGEBNISSEN	46
7	AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN	48
8	VERZEICHNISSE	49

1 Kurzfassung/Abstract

1.1 Kurzfassung

Ausgangssituation/Motivation

Um den Technologiesprung von Passivhäusern mit hoher Energieeffizienz zu Plusenergiegebäuden zu schaffen, ist neben einer Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs des Gebäudes an sich, die Integration von erneuerbaren Technologien zur Heizung und Kühlung notwendig. Solarthermische Kühlung bietet im Bereich Gebäudeklimatisierung große Potenziale zur CO₂-Einsparung, Vermeidung von Sommerstromspitzen und Primärenergieeinsparung. Derzeit sind drei Technologien am Markt verfügbar:

- Absorptionskälteanlagen
- Adsorptionskälteanlagen
- DEC-Anlagen (Desiccant Evaporative Cooling)

Die bereits bestehenden Anlagen in Österreich sind meist Eigeninitiativen von Solarplanern, Kollektorherstellern oder Gemeinden. Derzeit gibt es sowohl in der Auslegung der einzelnen Anlagenkomponenten, als auch im Bereich der Regelung dieser Anlagen keine ausreichenden Erfahrungswerte oder entsprechende Software.

Inhalte und Zielsetzungen

Ziel dieses Projektes war es einen Überblick sowohl über die derzeitige Ausführungsqualität von solaren Kühlanlagen in Österreich als auch zur Energieeffizienz und Betriebsverhalten zu schaffen. Es wurden dafür zehn der neu installierten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich sowie eine Großanlage in Lissabon ausgewählt. Die Performance dieser Anlagen wurde mittels Simulation und Monitoring untersucht. Ziel war es, anhand des Monitoring wichtige Hinweise für den derzeitigen Stand von solaren Kühlanlagen im Gebäudebereich zu bekommen und Optimierungspotenziale für die nächste Generation von solaren Kühlanlagen aufzuzeigen.

Methodische Vorgehensweise

- Monitoringauswertung der solaren Kühlanlagen anhand eines einheitlichen Auswertekonzeptes (Level 3 des IEA SHC Task 38 Monitoringkonzeptes)
- Erstellung von dynamischen Simulationsmodellen der installierten solaren Kühlanlagen
- Abgleich von Simulationsergebnissen mit tatsächlich gemessenem Anlagenverhalten von unterschiedlichen Anlagenkonzepten und Technologien der solarthermischen Kühlung von Gebäuden
- Optimierung der Anlagen anhand der ausgewerteten Monitoringdaten und Vergleichssimulationen
- Verbreitung der Erkenntnisse auf nationaler und internationaler Ebene

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Potenzialabschätzungen anhand dynamischer Simulationen haben gezeigt, dass das Optimum hinsichtlich Primärenergieeinsparung in keiner der untersuchten solaren Kühlanlagen erreicht wurde. Die verhältnismäßig niedrigen elektrischen Coefficient of Performance (COP) laut Monitoringauswertung lassen sich auf ineffiziente Komponenten (Pumpen, Rückkühlung), zu komplexe Anlagentechnik, nicht optimale Auslegung der Gesamtanlage oder regelungstechnische Fehler zurückführen.

Die Auswertungen der Monitoringdaten und Simulationsergebnisse haben gezeigt, dass solargestützte Desiccant Evaporative Cooling (DEC) Anlagen eine Sonderstellung für den österreichischen Markt einnehmen, da durch das Feuchterückgewinnungspotenzial im Winter sehr hohe Primärenergieeinsparungen im Vergleich zu Referenzanlagen mit konventionellen Technologien erzielt werden können.

Ausblick

Bei einer sorgfältigen Planung, Ausführung und Betriebsüberwachung sind Primärenergieeinsparungen bis zu 80%, bezogen auf konventionelle Kühltechnologien, erzielbar. Der elektrische COP sollte dabei, abhängig nach Anlagenkonfiguration, bei 6-8 liegen. Die Qualitätssicherung spielt daher zukünftig eine wichtige Rolle zur Umsetzung von effizienten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich und als Exportprodukt. Das hier erlangte Know-How gilt es in die Baubranche zu verbreiten, sowie leicht handhabbare Auslegungstools zur Verfügung zu stellen.

1.2 Abstract

Initial situation/Motivation

To achieve the leap from passive houses with high energy efficiency to so-called 'Energy-Plus-Buildings', the integration of renewable technologies for heating and cooling is necessary, in addition to a reduction of the heating and cooling needs of the building. Solar thermal cooling offers a large potential of CO₂ savings during the operation of the air conditioning in buildings, avoiding of the current summer peaks and saving of primary energy. At present, three technologies are available at the market:

- Absorption cooling systems
- Adsorption cooling systems
- DEC-systems (Desiccant Evaporative Cooling)

Most of the existing solar cooling plants in Austria are initiatives of solar planners, solar collector manufactures or municipalities. The experience for system design and control of such systems is insufficient also due to a lack of available appropriate software tools.

Content and Aims of the project

This project should give an overview of the present quality of workmanship, energy performance and operation of solar cooling plants in Austria. Therefore, ten of the recently installed solar thermal cooling plants in Austria were selected, as well as a large-scale installation in Lisbon (Austrian plant Engineering and Construction Company) in order to examine the performance by means of simulation and monitoring. Herewith, important results of the present status of solar cooling systems in buildings should be pointed out and optimization potentials for a next generation of solar cooling systems should be identified.

Methodology

- Monitoring Evaluation of the solar cooling plants using a common evaluation procedure (Level 3 of IEA SHC Task 38 monitoring procedure)
- Setting up dynamic simulation models for the installed solar cooling plants
- Alignment of simulation results of solar cooling with actually measured plant behavior
- Optimization of solar cooling plants using the monitoring and simulation results
- Dissemination of experiences on national and international level

Results and conclusions

The results of transient simulations showed a higher primary energy saving potential for each solar cooling plant than actually achieved. The low electrical Coefficients of Performance (COPs) according to monitoring are resulting from the use of inefficient components (pumps, heat rejection), complex system configurations, poor system design or inefficient control strategies.

Monitoring and simulations also showed a high potential for Desiccant Evaporative Cooling (DEC) systems in Austria. The humidity recovery potential in winter leads to very high primary energy savings compared to a reference system with conventional technologies.

Outlook

When planning, installation and facility management are carefully carried out high primary energy savings up to 80% compared to conventional cooling technologies can be achieved. The electrical COPs should range between 6 and 8, depending on the system configurations. The quality assurance is therefore a major issue as a next step for realisation of energy efficient solar cooling plants in Austria and abroad. The achieved know-how within this project has to be disseminated in the building sector. Furthermore, easily manageable design tools are needed.

2 Einleitung

2.1 Allgemeine Einführung in die Thematik

Die Raumkühlung und Klimatisierung nimmt in der Energieversorgung von Gebäuden weltweit eine immer größere Bedeutung ein. Der Strombedarf für die Klimatisierung von Gebäuden in Österreich wird sich laut einer Studie [Haas, 2007] ausgehend vom Jahr 2005 bis ins Jahr 2030 von 365 GWh auf 1875 GWh mehr als verfünffachen. Hauptgrund für diesen enorm steigenden Energiebedarf sind die Ansprüche an den Raumkomfort und damit die Klimatisierung. Dieser Trend konnte in den letzten Jahren schon in der Automobilindustrie beobachtet werden, wo Klimaanlage heute als Standard gelten. Der absolute Zuwachs des Österreichischen Gebäudebestands wird mit 9,5 % bis 2030 prognostiziert. Es werden nicht nur neue Gebäude mit Teil- oder Vollklimaanlagen ausgestattet werden, sondern ein großer Anteil der bestehenden Gebäude wird nachgerüstet werden. Ein- und Zweifamilienhäuser werden laut dieser Studie ca. 50 % des Strombedarfs zur Klimatisierung verursachen.

Das bedeutet insgesamt eine Verfünffachung des CO₂-Ausstoßes von 248.200 Tonnen CO₂ im Jahr 2005 auf 1.275.000 Tonnen CO₂ im Jahr 2030¹. Diese Szenarien beachten noch nicht die Auswirkungen des Klimawandels, welcher auch ohne Berücksichtigung eines höheren Komfortbedarfs einen starken Anstieg an Kühlbedarf mit sich bringt.

Weiters verursacht dieser erhöhte Strombedarf zur Gebäudekühlung Sommerspitzen im öffentlichen Stromnetz, die zu hohen Strompreisen zu diesen Zeiten und auch zu netzbedingten Problemen bis hin zu Totalausfällen („Black-outs“) führen können. Solarthermisch betriebene Kühlanlagen können nach derzeitigem Stand der Technik bis zu 40 % des Energiebedarfes [Preisler, 2008] im Vergleich zu Referenzsystemen, die mit Kompressionstechnik betrieben werden, einsparen.

Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, gilt es nun, einerseits den Kühlbedarf für Gebäude so niedrig wie möglich zu halten und andererseits einen möglichst hohen Anteil des verbleibenden Kühlbedarfs durch alternative, umweltfreundliche Kühlsysteme abzudecken. Sowohl in einer Studie der International Energy Agency (IEA) [IEA, 2007] als auch im Positionspapier der (European Solar Thermal Technology Platform) ESTTP [ESTTP, 2006] nimmt solarthermische Kühlung bis 2030 eine wichtige Rolle in der Deckung des Kühlenergiebedarfs von Gebäuden ein.

Österreich nimmt bereits im Bereich solarthermische Nutzung zur Gebäudebeheizung eine Vorreiterrolle weltweit ein. Führende Herstellerfirmen von solarthermischen Kollektoren, Kollektorprüfungen, Ausbildungen, Förderungen sind bereits in diesem Bereich in Österreich vorhanden. Daher ist der Schritt zur solarthermischen Kühlung ein konsequenter Folgeschritt, um auch dieses Marktsegment aufbauend auf den bereits

¹ CO₂-Äquivalent-Emissionsfaktor laut GEMIS 3.0 für Strom-Mix: 0,68 kg/kWh_{End}

vorhandenen Strukturen in Österreich durch nationalen Technologievorsprung zu besetzen.

Mit Ende 2010 befanden sich weltweit ca. 600 und in Europa 400 Anlagen zur solarthermischen Kühlung in Betrieb [Mugnier, 2011]. Davon entfallen rund 20 Anlagen auf Österreich. Diese solarthermischen Kühlanlagen haben durchwegs Demonstrationscharakter und sollen zeigen, dass marktreife Komponenten und Systemvarianten vorhanden sind. Diese Anlagen entstanden überwiegend aufgrund der Eigeninitiative von Solaranlagenherstellern oder Gemeinden. Derzeit gibt es sowohl in der Auslegung der einzelnen Anlagenkomponenten, als auch im Bereich der Regelung dieser Anlagen wenige Erfahrungswerte oder entsprechende Software.

Anlageneigentümer bringen für diese junge Technologie sehr hohe Investitionssummen zur Errichtung auf. Diese Investition lässt sich nur mit einem einwandfreien Anlagenbetrieb und hoher Energieeffizienz rechtfertigen. Allerdings fehlt es dazu an fachgerechter Evaluierung der Funktionsweise und Optimierung der Anlagen.

2.2 Ausgangssituation/Motivation des Projektes

Um den Technologiesprung von Passivhäusern mit hoher Energieeffizienz zu Plusenergiegebäuden zu schaffen, ist neben einer Reduktion des Heizwärme- und Kühlbedarfs des Gebäudes an sich, die Integration von erneuerbaren Technologien zur Heizung und Kühlung notwendig. Solarthermische Kühlung bietet im Bereich Gebäudeklimatisierung große Potenziale zur CO₂-Einsparung, Vermeidung von Sommerstromspitzen und Primärenergieeinsparung. Derzeit sind drei Technologien am Markt verfügbar:

- Absorptionskälteanlagen
- Adsorptionskälteanlagen
- DEC-Anlagen (Desiccant Evaporative Cooling)

Die bereits bestehenden Anlagen in Österreich sind meist Eigeninitiativen von Solarplanern, Solaranlagenherstellern oder Gemeinden. Derzeit gibt es sowohl in der Auslegung der einzelnen Anlagenkomponenten, als auch im Bereich der Regelung dieser Anlagen keine ausreichenden Erfahrungswerte oder entsprechende Software.

Generell beschränkt sich die Expertise zu Auslegung und Betriebsoptimierung von solarthermischen Kühlanlagen in Österreich auf Universitäten, Forschungseinrichtungen und einige ausgewählte Unternehmen. Da essentielle Erfahrungswerte zum Anlagenbetrieb fehlen, ist ein umfassendes Anlagenmonitoring eine geeignete Methode, um die Effizienz und den Betrieb der Anlage bewerten und dokumentieren zu können. Ein Anlagenmonitoring wird derzeit nur in einigen Ausnahmen konsequent durchgeführt. Insbesondere sind zuverlässige Daten zum elektrischen Verbrauch aller peripheren Komponenten – wie Pumpen, Ventilatoren etc. – wenig bis gar nicht vorhanden. Hinsichtlich der theoretischen Analyse und Simulation des Betriebsverhaltens von Anlagen zur solarthermischen Kühlung existieren einige geeignete Modelle und Simulationsumgebungen. Ein Vergleich der Messwerte aus dem Monitoring und der Simulationsergebnisse erlaubt eine Verbesserung der eingesetzten theoretischen Modelle

und Methoden, um hinsichtlich Planung, Optimierung und Prognosen zum Betriebsverhalten neuer solarthermischen Kühlanlagen eine verbesserte Genauigkeit zu erzielen.

2.3 Projektziele

Das übergeordnete Ziel war es, anhand der Betriebserfahrungen von den ausgewählten solarthermischen Kühlanlagen für diese neue Anwendung in der Gebäudeklimatisierung und -kühlung, maßgebliche Erkenntnisse über die derzeitige Qualität und die Potenziale für eine nächste Generation von solarthermischen Kühlanlagen zu bekommen.

Ziele des Projekts:

- Überblick über die derzeitige Ausführungsqualität von solarthermischen Kühlanlagen in Österreich
- Know-how-Gewinn vom Anlagenverhalten tatsächlich installierter solarer Kühlanlagen in Österreich und einer Großanlage in Lissabon
- Entwicklung von theoretischen Anlagenmodellen zur Simulation von solarthermischen Kühlsystemen in Gebäuden
- Abgleich von Simulationsergebnissen mit tatsächlich gemessenem Anlagenverhalten von unterschiedlichen Anlagenkonzepten und Technologien der solarthermischen Kühlung von Gebäuden.
- Bestimmung von Referenzwerten konventioneller Kühltechnologien zur Bewertung der solarthermischen Kühlung hinsichtlich Primärenergie- und CO₂-Einsparung

2.4 Kurzbeschreibung des Aufbaus (Kapitel) des Endberichts

In Kapitel 3 sind Hintergrundinformationen zum Projekthalt (Stand der Technik, Innovationsgehalte, verwendete Methoden und Vorgehensweise) beschrieben.

Die Ergebnisse des Projektes sind in Kapitel 4 dargestellt und in drei Teile aufgliedert:

- Ergebnisse Monitoringauswertung (siehe Kapitel 4.1)
In diesem Kapitel sind die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse aus drei Jahren Monitoringauswertung der untersuchten solarthermischen Kühlanlagen dargestellt.
- Ergebnisse Simulationen (siehe Kapitel 4.2)
Es wurden zu den solarthermischen Kühlanlagen Simulationsmodelle entwickelt, um das theoretische Optimierungspotenzial zu ermitteln. Weiters wurde anhand von der Modellierung einer Referenzanlage mit konventionellen Technologien das Potenzial zur Primärenergieeinsparung der solarthermischen Kühlanlage zu einer Referenzanlage ermittelt. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 4.2 dargestellt.

- Erkenntnisse (siehe Kapitel 4.3)

In diesem Kapitel sind einerseits allgemeingültige Erkenntnisse für alle Anlagen dargestellt, sowie spezifisch für jede Technologie bzw. Anlagengröße gewonnene Erkenntnisse

Kapitel 5 stellt den Bezug aus den Ergebnissen dieses Projekts zu den Zielen der Programmlinie dar. In Kapitel 6 sind die Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen dargestellt. Kapitel 7 enthält einen Ausblick und Empfehlungen aus Sicht der beteiligten Projektpartner.

3 Hintergrundinformationen zum Projektinhalt

3.1 Beschreibung des Standes der Technik

Solarthermische Kühlung bietet im Bereich Gebäudeklimatisierung große Potenziale zur CO₂-Emissionsverminderung, Primärenergieeinsparung sowie zur Vermeidung von sommerlichen Lastspitzen im Stromnetz. Derzeit sind drei Technologien am Markt verfügbar:

- Absorptionskälteanlagen
- Adsorptionskälteanlagen
- DEC-Anlagen (Desiccant Evaporative Cooling)

Alle drei Technologien wurden bereits in Pilotanlagen in Österreich umgesetzt und nutzen die saisonale Gleichzeitigkeit der sommerlich auftretenden Kühllast und maximaler solarer Einstrahlung, sowie die Möglichkeit der Mehrfachnutzung von thermischer Solarenergie zur solaren Kühlung, Raumheizung und Brauchwassererwärmung. Die derzeit bestehenden technischen Lösungen setzen sich aus einer großen Auswahl an Anlagenkonfigurationen und Einbindungskonzepten in bestehende Energieversorgungssysteme in Gebäuden zusammen. Dabei variieren die eingesetzten Kühltechnologien, Back-up-Strategien für die Gewährleistung einer durchgängigen Kühlung, Wahl und Integration solarthermischer Kollektoren, Rückkühlkonzept und die Systeme der Energieverteilung in den Gebäuden.

3.2 Innovationsgehalt

Im Rahmen dieses Projekts wurden die hier in Demonstrationsanlagen gewählten unterschiedlichen Anlagenkonfigurationen auf ihre Vor- und Nachteile im Betrieb untersucht, um essentielle Erkenntnisse für eine nächste Generation solarthermischer Kühlanlagen einzubringen. Diese Erkenntnisse wurden durch Evaluierung der einzelnen Anlagen an sich und durch anlagenübergreifende Analysen gewonnen.

Erkenntnisse zu folgenden innovativen Anlagenkonfigurationen wurden erarbeitet:

- Vergleich Betriebsverhalten von Klein-Absorptionskälteanlagen mit unterschiedlichen Stoffpaaren (Wasser-Lithiumbromid, Ammoniak-Wasser)
- Einbindung von solarthermischen Kühlanlagen in bestehende haustechnische Anlagen
- 100%-solarthermische Kühlanlagen (ohne wärme- oder kälteseitiges Back-up)
- Rückkühlung mittels Hybridrückkühler (Umschaltzeiten für Trockenbetrieb/ Nassbetrieb)
- Erzielbare Desorptionstemperaturen mittels vertikalen, fassadenintegrierten Flachkollektoren
- Evaluierung wärme- bzw. kälteseitiges Back-up bei Absorptionskälteanlagen
- Vergleich erzielter Austreibertemperaturen bei Absorptionskälteanlagen mit unterschiedlichen solarthermischen Kollektoreinbindungen: konventioneller Flachkollektor versus hocheffizienter Flachkollektoren
- Evaluierung erzielbarer Reduzierung von Hilfsenergien in Absorptionskälteanlagen durch die Einbindung einer Groß-Absorptionskälteanlage (545 kW Kälteleistung) in Lissabon, welche mit drehzahlgeregelten Ventilatoren in der Rückkühlung und drehzahlgeregelten Pumpen ausgerüstet ist
- Vergleich Betriebsverhalten von zwei DEC-Anlagen mit ähnlicher Auslegungskonfiguration (Auslegung auf 100% solarthermische Kühlung, Flachkollektoren als Antriebstechnologie), jedoch unterschiedlichen Kombinationen in der Energieverteilung (Bauteilaktivierung versus Kühldecken und Fan-Coils)
- Vergleich sowohl der spezifischen elektrischen Verbräuche einzelner Komponenten und Baugruppen als auch der Gesamtsysteme

3.3 Verwendete Methoden

Die Auswahl der solarthermischen Kühlanlagen erfolgte anhand von folgenden Kriterien:

- Bezug zu Österreich (Standort, Errichterfirma)
- Innovationsgehalt
- Aktualität der solarthermischen Kühlanlage (Errichtung nicht vor 2007)
- Ausgeglichener Technologiemit (Kühltechnologien, Rückkühlung, Back-up-Strategie, Wahl und Integration solarthermischer Kollektoren, Energieverteilung im Gebäude)
- Vorhandensein eines umfassenden Monitoringsystems und Messdatenzugangs
- Interesse der Eigentümer

Folgende solarthermische Kühlanlagen wurden anhand dieser Kriterien ausgewählt:

- Anlage 1: ENERGYbase, Wien (DEC-Anlage)
- Anlage 2: MA34, Wien (Klein-Adsorptionskälteanlage)
- Anlage 3: BH-Rohrbach (Absorptionskälteanlage)
- Anlage 4: Fa. Sunmaster, Eberstalzell (Absorptionskälteanlage)
- Anlage 5: Fa. Kreuzroither, Schörfling (Klein-Adsorptionskälteanlage)
- Anlage 6: Fa. Gasokol, Saxen (Absorptionskälteanlage)
- Anlage 7: Rathaus Gleisdorf (Absorptionskälteanlage, DEC-Anlage)
- Anlage 8: Feistritzwerke, Gleisdorf (Absorptionskälteanlage)
- Anlage 9: Fa. SOLID, Graz (Klein-Absorptionskälteanlage)
- Anlage 10: Fa. Bachler, Gröbming (Klein-Absorptionskälteanlage)
- Anlage 11: Bankgebäude, Lissabon (Groß-Absorptionskälteanlage)

Für die Untersuchungen an den solarthermischen Kühlanlagen wurden folgende Methoden angewendet:

- Level 3 Monitoringauswertung auf Basis des IEA SHC Task 38 Monitoringkonzeptes [Sparber, 2009]
- Dynamische Simulationen in den Simulationsumgebungen TRNSYS und Matlab Simulink

3.4 Vorgangsweise und verwendete Daten

Die Ergebnisse und Erkenntnisse wurden über folgende Arbeitsschritte erreicht:

3.4.1 Monitoring solarthermische Kühlanlagen

Für jede der untersuchten Anlagen wurde ein Monitoringkonzept auf Basis des IEA SHC Task38 Monitoringkonzeptes [Sparber, 2009] erstellt bzw. ergänzt (siehe Abbildung 1). Danach erfolgten die Installation der noch fehlenden Messtechnik, sowie eine Funktionsüberprüfung.

Eine Auswertung des Monitoring laut dem Task38 Auswertekonzept auf Monatsbasis erfolgte dann für zumindest zwei Jahre. Zusätzlich wurde abschnittsweise mit zeitlich hoch aufgelösten Messdaten (im 1-15 Minutenbereich) das Betriebsverhalten der Anlagen im Detail analysiert.

3.4.2 Simulationen

Es wurden dynamische Simulationsmodelle (TRNSYS, Matlab Simulink) der installierten solarthermischen Kühlanlagen erstellt und mit den gemessenen Lastprofilen gekoppelt. Dadurch wurden die erzielbaren „idealen“ Energiekennwerte für jede solarthermische Kühlanlage berechnet.

3.4.3 Optimierungen/Erkenntnisse

Hier wurden die Ergebnisse aus den Messungen und den Simulationen analysiert und interpretiert. Dies geschah sowohl für die einzelnen Anlagen, als auch in anlagenübergreifenden Analysen.

Danach wurden Optimierungsvarianten erstellt, die mit dynamischer Simulation berechnet wurden. Die Erkenntnisse aus all diesen Analysen sind in die Zusammenstellung von Erkenntnissen für eine nächste Generation von solarthermischen Kühlanlagen eingeflossen.

3.4.4 Dissemination

Die Verbreitung der Ergebnisse erfolgte in drei Verbreitungsebenen:

- Allgemeine Dissemination mittels Vorträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen, Artikel in Fachzeitschriften und allgemeinen Printmedien, Organisation von Workshops/Seminaren mit Stakeholdern zur Verbreitung der gewonnenen Erkenntnisse
- Zielgruppenspezifische Aufbereitung der Ergebnisse für Vorträge an Ausbildungsstätten (Universitäten, Fachhochschulen) durch Erstellung eines Skriptums
- Internationale Vernetzung (IEA)

Einbringen der Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse in den IEA SHC Task 38 als maßgebliche internationale Forschungs- und Verbreitungsaktivität im Bereich solarthermische Kühlung in Gebäuden

4 Ergebnisse des Projekts

4.1 Monitoring

Durch die wachsende Anzahl an solarthermischen Kühlanlagen in Österreich war es möglich ausgewählte Anlagen hinsichtlich ihres Betriebsverhaltens und Energiebedarfs zu evaluieren. Durch das Projekt SolarCooling Monitor sollten Schwierigkeiten möglichst rasch erkannt und ausgemerzt werden, da bisher nur geringe praktische Erfahrungen bei Planung, Errichtung und Betrieb von solarthermischen Kühlanlagen in Österreich vorhanden sind. Auf Grund von nur lückenhaft verfügbaren Monitoringdaten konnten bisher keine Aussagen über die Verlässlichkeit, sowie die Anlageneffizienz getätigt werden. Jedoch sind genau diese Punkte wesentlich für die Akzeptanz bei zukünftigen Eigentümern. Ein wirtschaftlicher Betrieb ist Voraussetzung für die Realisierung einer Anlage und die Wirtschaftlichkeit hängt wiederum vom einwandfreien Betrieb ab.

Die folgenden Evaluierungsergebnisse beziehen sich auf acht Anlagen in Österreich und eine in Lissabon. Für zwei weitere Anlagen in Österreich können auf Grund fehlender durchgehender Messdaten keine Ergebnisse über längere Betriebszeiträume präsentiert werden.

4.1.1 Vorstellung der elf vermessenen Anlagen

Das Leistungsspektrum der elf beobachteten Anlagen reicht von 7,5 kW (Adsorptionstechnik mit Silicagel) bis hin zu 545 kW (Absorptionskältemaschine mit H₂O-LiBr) Kälteleistung. Davon arbeiten zwei Anlagen nach dem DEC-Prinzip (Lufttrocknung über Sorptionsrad; Vorkühlung mittels Wärmerückgewinnungsrad; Verdunstungskühlung durch Befeuchter) und wirken also direkt über Zuluftkonditionierung. Die übrigen dienen der Kaltwasserbereitstellung für Kühldecken, Bauteilaktivierung oder Gebläsekonvektoren. In Tabelle 1 und Tabelle 2 sind die wesentlichen Kenndaten der elf Anlagen im Überblick zusammengestellt bzw. nachfolgend kurz beschrieben.

Anlage 1 arbeitet nach dem DEC-Prinzip für die Zuluftkonditionierung des Bürogebäudes ENERGYbase in Wien (Volumenstrom $2 \times 8.860 \text{ m}^3/\text{h}$). D.h. die Frischluft wird durch ein Sorptionsrad getrocknet und durch anschließende Befeuchtung mit Hilfe von Verdunstungskälte gekühlt; der Sorptionsrotor mit dem Sorptionsmaterial Lithiumchlorid (LiCl) wird aber auch im Winter zur Wärme- und Feuchterückgewinnung eingesetzt. Im Trocknungsfall wird er mit Solarwärme aus 285 m^2 Flachkollektoren regeneriert. Im Winter dient die Solaranlage zur Heizungsunterstützung. Der Solarpufferspeicher hat ein Volumen von 15 m^3 . Die solarthermisch betriebene DEC-Anlage dient lediglich zur Frischluftversorgung in den Bürobereichen und ist somit mit einem Luftwechsel von 1,2 ausgelegt. Dieser 1,2-fache Luftwechsel kann ca. 12 % des Kühlenergiebedarfs des Gebäudes abdecken. Die restlichen 88 % des Kühlenergiebedarfs werden über eine Brunnenanlage in Verbindung mit Bauteilaktivierung abgeführt.

Anlage 2, eine solargestützte Kleinadsorptionskälteanlage mit 7,5 kW Kälteleistung zur Bürokühlung über kaltwasserbetriebene Gebläsekonvektoren, steht ebenfalls in Wien. Es

handelt sich um eine Adsorptionskältemaschine mit dem Stoffpaar H₂O-Silikagel, der ein 800 l Kaltwasserspeicher nachgeschaltet ist. Die abzuführende Wärme am Kondensator wird über ein trockenes Rückkühlwerk mit drehzahlgeregelten Ventilatoren und zusätzlicher Sprühhvorrichtung an die Außenluft abgegeben. Flachkollektoren mit einer Gesamtfläche von 32,4 m² liefern die Antriebswärme über einen 2000 l Speicher.

In der **Anlage 3** in Rohrbach unterstützt eine 30 kW Adsorptionskältemaschine (H₂O/LiBr) eine bereits vorhandene Kompressionskältemaschine von 100 kW_{Kälte} bei der Kühlung eines Bürogebäudes. Die Rückkühlung erfolgt über einen Nasskühlturm. Jede Kältemaschine hat einen eigenen Kaltwasserspeicher (500 l bzw. 1500 l). Die Solaranlage hat 120 m² Flachkollektoren und zwei Speicher von jeweils 4 m³. Sie sorgt auch für die Wärmebereitstellung im Winter, mit zwei Gasheizkesseln von je 100 kW als Back-Up.

In einem besonders interessanten Zusammenhang steht die **Anlage 4**: Im Passivhausgebäude der Fa. Sunmaster in Eberstallzell ist eine 80 kW-Absorptionskältemaschine auf H₂O/LiBr-Basis für die Kühlung des Bürotrakts und der Laserschweißanlagen installiert. Als Back-Up dient ein wesentlich kleinerer (35 kW_{Kälte}) konventioneller Kaltwassersatz. Das System verfügt über einen Langzeitwärmespeicher von 85 m³ und drei 0,5 m³- Speicher als hydraulische Weichen im Wärmeverteilnetz. Neben einem 3 m³ Kaltwasserspeicher kann zusätzlich ein Löschwasserbecken mit 300 m³ Volumen als Langzeitkältespeicher genutzt werden. Mit 1.000 m² Flachkollektoren (davon sind 200 m² in die Fassade integriert) wird die Antriebswärme für die Kälteerzeugung, sowie im Winter die Wärme für die Raumheizung, hier unterstützt von Pelletskesseln, geliefert. Besonders bemerkenswert ist die Möglichkeit der Rückkühlung des Kälteprozesses über das Erdreich unter der Produktionshalle, welches im Winter als Fußbodenheizung dient.

Die **Anlage 5** im Firmengebäude der Kreuzroither Metallbau GmbH in Schörfling ist mit zwei Adsorptionskältemaschinen desselben Typs wie in Anlage 2 (7,5 kW) ausgestattet. Die Antriebswärme (ohne Back-Up) liefern 160 m² fassadenintegrierte Flachkollektoren über 3 Pufferspeicher mit jeweils 5 m³. Ein Kaltwasserspeicher von 1500 l ist den Kältemaschinen nachgeschaltet und versorgt die Kühldecken. Als Rückkühler werden zwei Trockenkühler mit Wasserbesprüh-System eingesetzt.

Tabelle 1: Übersicht der im Projekt SolarCooling Monitor untersuchten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich und Lissabon (Ersteller: AEE INTEC)

Anlage Nr.:	1	2	3	4	5	6
						
Bildquelle	Herta Hurnaus	Fa. SOLUTION	Amt der OÖ Landesregierung, ABT. GBM	Fa. SunMaster	Fa. Kreuzroither	Fa. Gasokol
Standort	ENERGYbase Wien	Wiener MA 34	Rohrbach	Eberstalzell	Schörfling am Attersee	Saxen
Anwendung	Büro Frischluftkonditionierung (heizen, kühlen, befeuchten)	Bürokühlung Fan-Coils kein Back-Up	Bürokühlung Fan-Coils Kälte Back-Up	Büro- und Prozesskühlung, Kälte Back-Up	Büro mit Kühldecken	Büro und Produktionshalle; Betonkernaktivierung
Technologie	Desiccant Evaporative Cooling	Adsorption (SOL ACS 08)	Absorption und Kompression	Absorption	Adsorption (SOL ACS 08)	Absorption
Kälteleistung	98 kW (2x 8.240 m ³ /h)	7,5 kW	30 kW + 100 kW (KKM)	80 kW	2 x 7,5 kW	30 kW
Kollektor	285 m ² Flachkollektor	32,4 m ² , Flachkollektor	120 m ² , Flachkollektor	1.000 m ² , Flachkollektor	160 m ² Fassadenkollektor	85 m ² Flachkollektor
Solarspeicher	15 m ³	2 m ³	8 m ³	85 m ³	15 m ³	9 m ³
In Betrieb seit	2008	2009	2010	2009	2008	2008

Bei **Anlage 6** handelt es sich um die Kühlung des Bürogebäudes des Kollektorherstellers Gasokol in Saxen. Eine 30-kW-Absorptionskältemaschine (H₂O/LiBr) liefert kaltes Wasser für eine Betonkernaktivierung. Die 85 m² Flachkollektoren liefern die notwendige Antriebsenergie in einen 9.000 Liter fassenden Pufferspeicher und überdies fast 100 % des Warmwasserbedarfs. Die Rückkühlung erfolgt über einen offenen Nasskühlturm.

Die **Anlage 7** im Rathaus bzw. Servicecenter Gleisdorf beherbergt eine 35-kW_{Kälte}-Absorptionskältemaschine auf H₂O/LiBr-Basis, welche einen 1 m³ Kaltwasserspeicher kühlt. Dieses Kaltwasser dient zur Versorgung der Deckenkühlung im Servicecenter bzw. der Gebläsekonvektoren im alten Rathaus. Weiters ist eine DEC-Anlage für die Gebäudezulftkonditionierung im Servicecenter installiert, in diesem Fall mit einem Sorptionsrad mit Silicagel als Trocknungsmittel. Der Nenn-Luftvolumenstrom beträgt

6.250 m³/h. Wärmeseitig sind 304 m² Flachkollektoren installiert, teils in südöstlicher (Standard-Flachkollektoren), teils in südwestlicher (Hochtemperatur-Flachkollektoren) Ausrichtung, was den Ausnutzungszeitraum der Solareinstrahlung erhöht. Die Kollektoren speisen einen Pufferspeicher von 4,6 m³, unterstützt von einem Erdgas befeuerten Nahwärmenetz.

Tabelle 2: Übersicht der im Projekt SolarCooling Monitor untersuchten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich und Lissabon (Ersteller: AEE INTEC)

Anlage Nr.:	7	8	9	10	11
					
Standort	Rathaus Gleisdorf	Feistritzwerke Gleisdorf	Graz	Gröbming	Lissabon, Portugal
Anwendung	BürokühlungKühldecke + Klimatisierung, Wärme Back-Up	Bürokühlung, Kühldecke, Wärme Back-Up	Bürokühlung, Kühldecke, kein Back-Up	Bürokühlung, Bauteilaktivierung, Wärme Back-Up	Büro, Kühlung und Warmwasser
Technologie	Absorption (H ₂ O/LiBr),	Absorption (NH ₃ /H ₂ O)	Absorption (H ₂ O/LiBr)	Absorption (NH ₃ /H ₂ O)	Absorption
Kälteleistung	35 kW	19 kW	17,6 kW	12 kW	545 kW
Kollektor	302 m ² , Gluatmugl HT, Gluatmugl GV	64 m ² , Gluatmugl HT	57,6 m ² , Gluatmugl HT	46 m ² , Goliath	1.580 m ² , Gluatmugl HT
Solarspeicher	4,6 m ³	10 m ³	3 m ³	4,5 m ³	11 m ³
In Betrieb seit	2008	2010	2009	2008	2008

Ebenfalls in Gleisdorf, im Gebäude der Stadtwerke, befindet sich die **Anlage 8** mit einer 19 kW_{Kälte}-Absorptionskältemaschine (NH₃/H₂O), die ohne Kaltwasserspeicher direkt in die Kühldeckenverteilung einspeist. Es sind 64 m² Hochtemperatur-Flachkollektoren installiert. Als Back-Up (auch für den Winterbetrieb) fungieren diverse Wärmequellen: drei BHKW (zwei davon auf Pflanzenölbasis, eines mit Erdgas), ein Gasbrennwertkessel und ein Prototyp einer Hochtemperatur-Wärmepumpe mit Tiefensonde. Eine Charakteristik dieser Anlage ist der Einsatz eines Prototypen einer elektrolytischen Wasseraufbereitung.

Im Bürogebäude der Fa. SOLID in Graz befindet sich die **Anlage 9**, die sogenannte „CoolCabin“ mit einer Absorptionskältemaschine (H₂O/LiBr) mit 17,5-kW_{Kälte}-Leistung. Die Rückkühlung wird über einen geschlossenen Nasskühlturm mit der Option einer „stillen Kühlung“ realisiert, d.h. bei fehlender Sonneneinstrahlung bzw. in der Nacht wird die

Kältemaschine umfahren und der KW-Kreislauf im Kühlturm in Kontakt mit der adiabatisch gekühlten Außenluft gebracht. Ein zusätzlicher Kälteerzeuger ist nicht vorgesehen. Zur Anlage gehören 58 m² Hochtemperatur-Flachkollektoren mit einem 2000-l-Pufferspeicher.

Anlage 10 in Gröbming besteht aus einer 12-kW-NH₃/H₂O-Absorptionskältemaschine, die die Betonkernaktivierung eines Bürogebäudes speist, ohne Kaltwasserspeicher und ohne einen zusätzlichen Kälteerzeuger. Die Solaranlage mit 46 m² Flachkollektoren und 3 Speichern mit jeweils 1,5 m³ wurde zu einem bestehenden Biomasse-Nahwärmenetz nachgerüstet.

Anlage 11 schließlich ist eine Großanlage (bei Errichtung die weltweit größte) in Lissabon/Portugal. Eine solarthermisch betriebene H₂O/LiBr-Absorptionskältemaschine mit 545 kW_{Kälte} Kälteleistung unterstützt eine konventionelle Kälteerzeugung (4.800 kW_{Kälte}) in einem Gebäude der größten Bank Portugals. Das Kollektorfeld, bestehend aus Hochtemperatur-Flachkollektoren, ist 1579 m² groß und mit zwei Pufferspeichern mit jeweils 5,5 m³ ausgerüstet. Diese sorgen auch für die WW-Bereitstellung, die Heizungsunterstützung sowie die Nacherwärmung der gekühlten und entfeuchteten Zuluft. Die Kälteerzeugung für die Absorptionskältemaschine dient zur Vorkühlung für die konventionellen Kompressionskältemaschinen.

4.1.2 Messergebnisse im Überblick

Zur Beurteilung der Performance der solarthermischen Kühlanlagen wurden drei Kennwerte mittels Monitoringauswertung ermittelt:

- COP_{el} = elektrischer COP

$$COP_{el} = \frac{Q_{Kälte}}{E_{elec}}$$

Formel (1)

- COP_{therm} = thermischer COP

$$COP_{therm} = \frac{Q_{Kälte}}{Q_{Antriebswärme}} \quad \text{Formel (2)}$$

- $f_{sav,shc}$ = Primärenergieeinsparung der solarthermischen Kühlanlage zu einer Referenzanlage

$$f_{sav,shc} = 1 - \frac{\frac{Q_{boiler}}{\epsilon_{fossil} \cdot \eta_{boiler}} + \frac{Q_{RES}}{\epsilon_{RES} \cdot \eta_{RES}} + \frac{E_{el}}{\epsilon_{elec}} + \frac{Q_{cooling, missed}}{SPF \cdot \epsilon_{elec}}}{\frac{Q_{boiler, ref}}{\epsilon_{fossil} \cdot \eta_{boiler, ref}} + \frac{E_{el, ref}}{\epsilon_{elec}} + \frac{Q_{cooling, ref}}{SPF_{ref} \cdot \epsilon_{elec}}} \quad \text{Formel (3)}$$

Legende zu Formel 1-3:

$Q...$ thermischer Energiebedarf [kWh]

$E...$ elektrischer Energiebedarf [kWh]

$\epsilon...$ Primärenergiefaktor [-]

$\eta...$ mittlere jährliche/monatliche Wirkungsgrade [-]

$SPF...$ Seasonal Performance Factor [-]

$RES...$ Renewable Energy Sources

$boiler...$ Gaskessel

$elec...$ elektrisch

$fossil...$ fossiler Energieträger

$ref...$ Referenzanlage

$cooling, missed...$ vermiedener Kühlenergiebedarf im Vergleich zu konventioneller Kühlung

Der Zusatz „fossil“ in $f_{sav,shc}$ bezieht sich auf Wärme-Back-Ups auf Basis fossiler Energien.

Die wichtigsten Kennzahlen aus den IEA SHC Task 38, Level III Messungen [Sparber, 2009] werden in Abbildung 3 als Monatsmittelwerte und in Tabelle 3 als Dreimonatsmittelwert bzw. Jahresmittelwert für die Anlagen dargestellt. Anlage 1 als DEC-Anlage wird nachfolgend noch gesondert präsentiert.

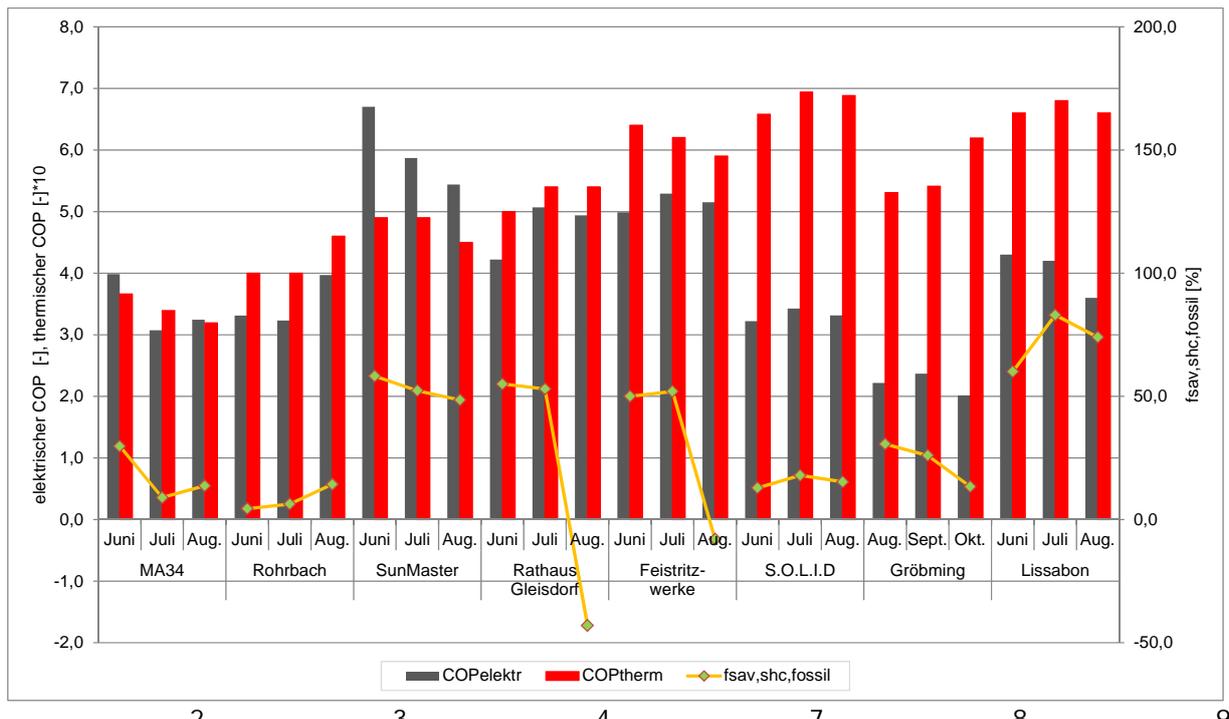


Abbildung 3: Ergebnisüberblick aller Systeme in drei Sommermonaten
(Ersteller: AEE INTEC)

Die durchschnittlichen Werte aller Anlagen liegen für den elektrischen COP bei 4,0, beim thermischen COP bei 0,54. Die gesamten Primärenergieeinsparungen, welche stark durch die Systemkonfiguration hinsichtlich dem jeweiligen Back-Up (Nachheizung als Wärme-Back-Up oder Kompressionskältemaschine als Kälte-Back-Up) geprägt sind, belaufen sich für alle Anlagen auf durchschnittlich 30 % gegenüber den Referenzsystemen im betrachteten Zeitraum. Gut abgestimmte Systeme erreichen in den Sommermonaten eine Primärenergieeinsparung von über 50 % in Österreich, die Anlage in Lissabon sogar über 80 %.

Tabelle 3: Übersicht der im Projekt SolarCooling Monitor untersuchten solarthermischen Kälteanlagen in Österreich und Lissabon und deren 3-Monatsmittelwerte bzw. Jahresmittelwert für Anlage 1 (Ersteller: AEE INTEC)

Anlage Nr.:	1	2	3	4	5	6
						
Bildquelle	Herta Hurnaus	Fa. SOLution	Amt der OÖ Landesregierung, ABT. GBM	Fa. SunMaster	Fa Kreuzroither	Fa Gasokol
Standort	ENERGYbase Wien	Wiener MA 34	Rohrbach	Eberstallzell	Schörfling am Attersee	Saxen
Technologie	Desiccant Evaporative Cooling	Adsorption (ACS 08)	Absorption und Kompression	Absorption	Adsorption (ACS 08)	Absorption
Kälteleistung	98 kW (2x 8.240 m ³ /h)	7,5 kW	30 kW + 100 kW (KKM)	80 kW	2 x 7,5 kW	30 kW
Ø. COP _{el}	7,0	3,4	3,5 AKM 2,5 KKM	6,0	- *)	- *)
Ø. COP _{therm}	0,5	0,3	0,4	0,5	- *)	- *)
f _{sav,shc, fossil}	64,4	17,4	8,3	53,0	- *)	- *)

*) für Anlage 5 und 6 konnten nur Kurzeitauswertungen gemacht werden

Anlage Nr.:	7	8	9	10	11
					
Bildquelle	AEE-INTEC	AEE INTEC	S.O.L.I.D	AEE INTEC	S.O.L.I.D
Standort	Rathaus Gleisdorf	Feistritzwerke Gleisdorf	Graz	Gröbming	Lissabon, Portugal
Technologie	Absorption (H ₂ O/LiBr),	Absorption (NH ₃ /H ₂ O)	Absorption (H ₂ O/LiBr)	Absorption (NH ₃ /H ₂ O)	Absorption
Kälteleistung	35 kW	19 kW	17,6 kW	12 kW	545 kW
Ø. COP _{el}	4,7	5,1	3,3	2,2	4,0
Ø. COP _{therm}	0,53	0,6	0,7	0,6	0,67
f _{sav,shc, fossil}	21,7	31,3	15,3	23,3	72,3

Der Einfluss der Wärme-Back-Ups auf Basis fossiler Energien ist jeweils im August (100% solare Deckung im Juni und Juli) im negativen Trend des $f_{sav,shc,fossil}$ beim Rathaus Gleisdorf und bei den Feistritzwerken deutlich zu erkennen. Bei der Anlage in Gröbming sind zwar fallende Werte von $f_{sav,shc,fossil}$ zu erkennen, dank Biomasse als erneuerbare Back-up Wärmequelle bleibt es aber bei einer positiven Einsparung an fossiler Primärenergie.

4.1.3 Ausgewählte Messergebnisse im Detail

Lüftungsanlage mit sorptionsgestützter Kühlung im ENERGYbase

Die sorptionsgestützte Klimatisierung als Teil einer Lüftungsanlage (SGK- oder DEC-Anlagen) bietet im Winter durch die Feuchterückgewinnung über den Sorptionsrotor zusätzlich große energetische Vorteile im Vergleich zu Standardlüftungsanlagen (siehe Jahresverlauf $f_{sav,shc,fossil}$ in Abbildung 4). Der Jahresmittelwert 2010 des elektrischen COP der ENERGYbase liegt bei 7,0 gegenüber einer berechneten Referenzanlage mit einem mittleren elektrischen COP von 2,5.

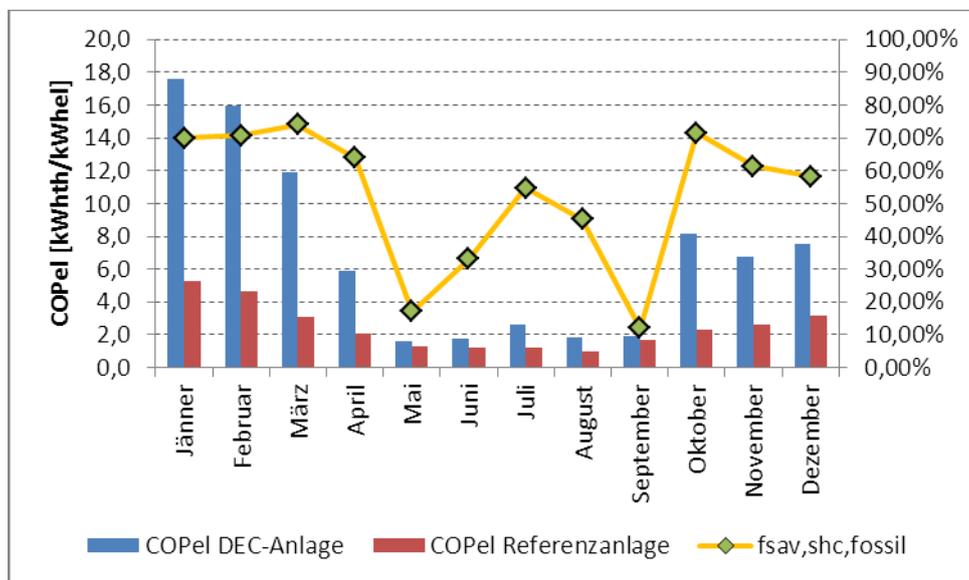


Abbildung 4: Jahresverlauf des elektrischen COP für die ENERGYbase im Vergleich zur simulierten Referenzanlage und die daraus resultierende Primärenergieeinsparung

$f_{sav,shc,fossil}$, 2010 (Ersteller: AIT)

Das Kollektorfeld von 285 m² ist im Sommer für die Regeneration der Sorptionsrotoren in den DEC-Anlagen erforderlich. In den Übergangszeiten kommt es jedoch zu Stagnationszeiten der solarthermischen Anlage, welche nur durch zusätzliche Abnehmer verringert werden könnten (Warmwasser). Durch die bauliche Lösung der Außenluftansaugung an den Dachtechnikzentralen (südseitig durch ein Lochblech) liegen die Ansaugtemperaturen ganzjährig über den tatsächlichen Außentemperaturen. Im Sommer erhöht dies die erforderliche Kühlleistung der DEC-Anlagen, da die Ansaugtemperaturen dadurch im Mittel um 2,2 K höher liegen. Dennoch ist die Funktionalität der Anlage kaum beeinträchtigt und wies im Jahr 2010 eine Primärenergieeinsparung von 64,4 % im Vergleich zu einer Referenzanlage auf.

Beispiel einer gemessenen Referenz-Kompressionskältemaschine

In Abbildung 5 sind die erreichten elektrischen COPs der Kompressionskälteanlage (Nennleistung: 100 kW_{Kälte}) in Anlage 3 (BH Rohrbach) dargestellt. Es handelt sich dabei um alle aufgezeichneten Datenpunkte im Sommer 2011 (10 Minuten Werte). Die Kältemaschine ist nicht leistungsgeregelt. Ausreißer hinsichtlich elektrischen COP können sich durch An- und Abfahrvorgänge ergeben. Im Leistungsbereich zwischen 80 kW und 90 kW Kälteleistung konnte ein durchschnittlicher elektrischer COP von 2,8 errechnet werden, was die bereits im IEA SHC Task 38 getätigte Annahme eines Referenz COP elektrisch von 2,8 für die Referenz-Kompressionskältemaschinen untermauert.

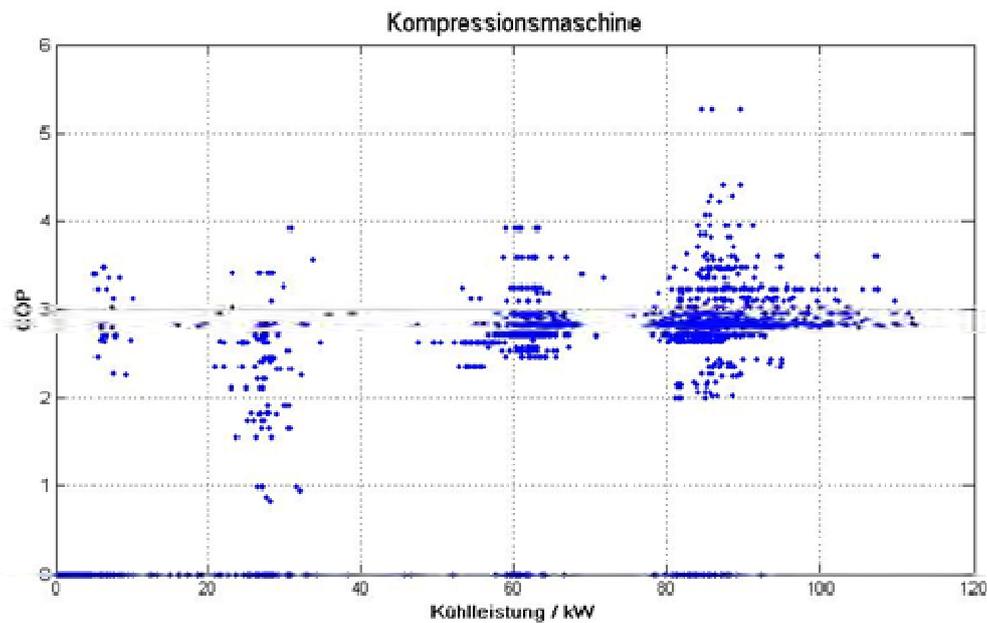


Abbildung 5: Auswertung elektrische COPs Kompressionskälteanlage 100 kW_{Kälte}
(Ersteller: ASIC)

Beispiel einer Absorptionskältemaschine mit verschiedenen Betriebscharakteristika

Nachfolgende Detailergebnisse stammen von der Wasser/Lithiumbromid Absorptionskältemaschine der Anlage 7 im Rathaus Gleisdorf mit einer Nennkälteleistung von 35 kW_{Kälte}. Nach Inbetriebnahme im Sommer 2008 konnten 3 Sommerperioden zur Evaluierung und Verbesserung genutzt werden. Im Sommer 2009 wurde im Sommer die Kühlmaschine im 24-Stundenbetrieb betrieben (mit Solarenergie bzw. Nahwärme). In Abbildung 6 ist deutlich zu sehen, wie die Maschine Mangels Kälteabnahme teilweise in sehr kurzen Intervallen taktet. In der Nacht ist die geforderte Kühlleistung naturgemäß gering und am Tag führte ein Programmfehler in der übergeordneten Gebäuderegulierung dazu, dass die Regelventile der Kühlkreise bei steigender Außentemperatur geschlossen statt geöffnet wurden.

Ein relativ konstanter Betrieb zwischen 18:45 Uhr und 20:30 Uhr mit einer Kälteleistung von ca. 24 kW und einer Austreiberleistung von ca. 47 kW ergab einen thermischen COP

von 0,51. Als Durchschnittswert im Sommer 2009 ergab sich mit dieser taktenden Betriebsweise damit ein thermischer COP von 0,43 bzw. ein elektrischer COP von 4,49.

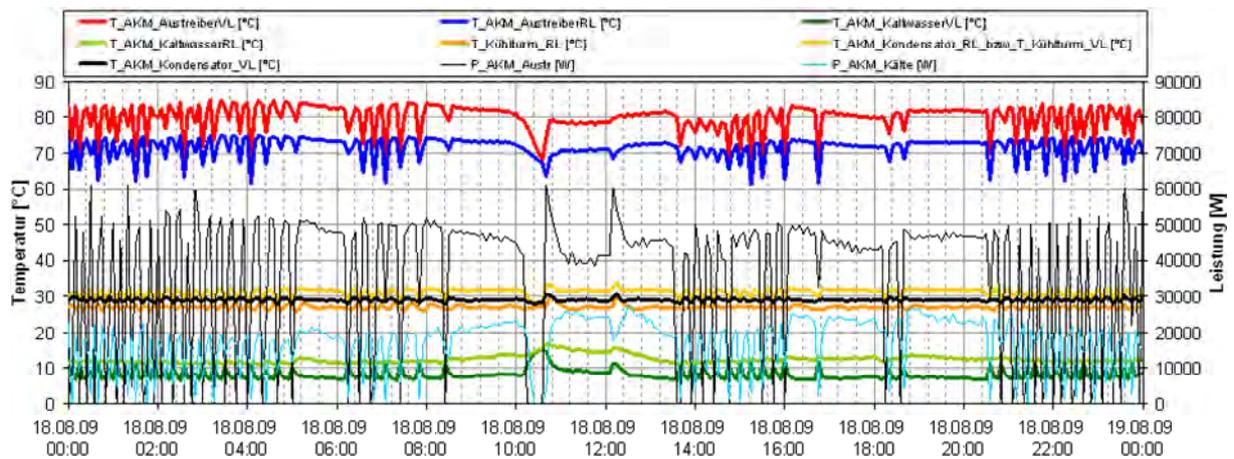


Abbildung 6: Taktendes Betriebsverhalten der AKM am 18.08.2009
(Ersteller: AEE INTEC)

Für den Sommer 2010 wurde der Programmierfehler der Gebäuderegulation beseitigt. Bis Ende Juli wurde auch die Nahwärme als Wärmequelle abgeschaltet, um zu testen, inwieweit solar autarkes Kühlen zur Gebäudeklimatisierung ausreicht. Bei voller Solareinstrahlung über den ganzen Tag ergab sich damit ein deutlich verbesserter Betrieb wie in Abbildung 7 als Beispiel zu sehen.

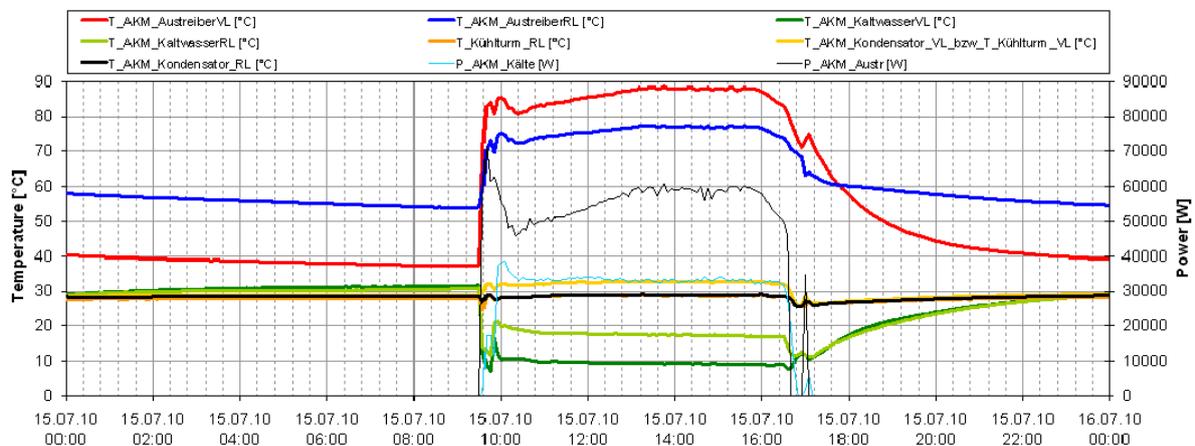


Abbildung 7: Stationäres Betriebsverhalten der AKM am 15.07.2010
(Ersteller: AEE INTEC)

Um 11:00 Uhr betrug der thermische COP 0,66 bei einer Austreiberleistung von 50 kW und einer Kaltwasserleistung von 33 kW. Um 15:00 Uhr betrug die Leistung des Austreibers (P_{AKM_Austr}) 60 kW und die erzeugte Kaltwasserleistung ($P_{AKM_Kälte}$) 33 kW mit einem resultierenden thermischen COP von 0,56. Erkenntnis daraus ist, dass die höhere Austreibertemperatur um 15:00 Uhr nur zu höherem Verbrauch an Antriebsenergie (60 kW) führt, aber die Kälteleistung sich nicht steigern lässt und damit der thermische COP deutlich um 15 % sinkt. Es sollten also die für die jeweilige Maschine

passenden Betriebsparameter sorgfältig gesucht und eingestellt werden, höhere Antriebstemperaturen müssen nicht zwangsläufig zu höherer Effizienz führen.

Als Durchschnittswert im Sommer 2010 ergab sich in dieser im Wesentlichen konstanten und kontinuierlichen Betriebsweise ein thermischer COP von 0,51 bzw. ein elektrischer COP von 5,13, also eine deutliche Verbesserung um 19 % bzw. 14 % im Vergleich zum Sommer 2009.

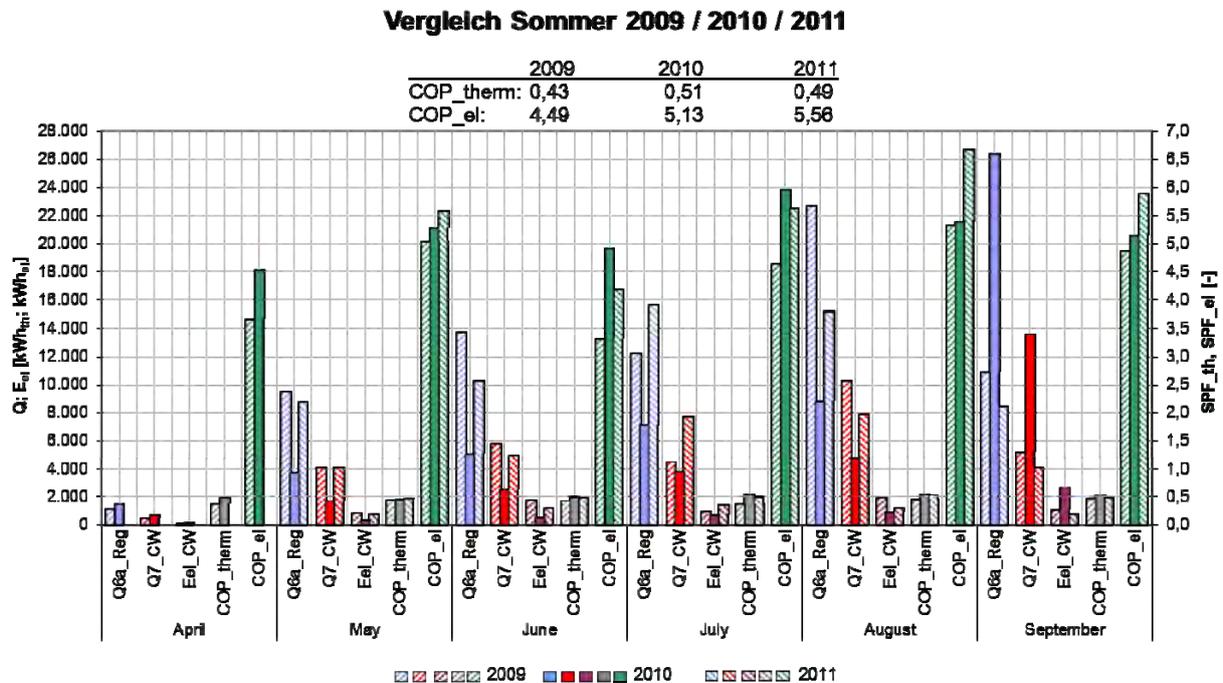


Abbildung 8: Kennzahlen der Kälteerzeugung durch die Absorptionskältemaschine (Ersteller: AEE INTEC)

Legende zu Abbildung 8:

Q6a... Austreiberenergie für AKM

Q7... erzeugte Kälteenergie

Eel... Gesamtstromverbrauch zur Kälteerzeugung

COP_therm... mittlerer thermischer Coefficient of Performance (Arbeitszahl): $Q7/Q6a$

COP_el... mittlerer elektrischer Coefficient of Performance (Arbeitszahl): $Q7/Eel$

Im Sommer 2011 wurde letztendlich der Kühlbetrieb von 04:00 bis 20:00 Uhr (bei Außentemperatur über 15°C) ermöglicht und entsprechend bei Bedarf über das Nahwärmenetz nachgeheizt. Dies führte zu deutlich längeren Laufzeiten der Maschine was eine weitere Verbesserung des elektrischen COP auf 5,56 im Sommer 2011 bewirkte. In Abbildung 8 sind die wesentlichen Kennzahlen als Monatswerte bzw. als Sommer-Durchschnittswerte dargestellt.

Die wesentliche Kennzahl elektrischer COP konnte also von 2009 bis 2011 um 24% von 4,49 auf 5,56 verbessert werden. Damit konnte diese Anlage die Kälteerzeugung mit

rund 50% des Stromverbrauches bewerkstelligen, den eine Referenz-Kompressionskältemaschine mit einem elektrischen COP von 2,8 gebraucht hätte.

4.2 Simulation

Die Simulationen wurden zur Potenzialabschätzung und -bewertung von solargestütztem Heizen und Kühlen eingesetzt. Dazu war zunächst der Ist-Stand der jeweiligen Anlagen abzubilden. Die Simulationen erfolgten mit Lastfiles der Verbraucherseite. Dabei wurden die Monitoringdaten in die Simulationen eingearbeitet. Ein Vergleich mit den Auswertungen der charakteristischen Größen nach IEA Task 38 [Sparber 2009] sowie Tagesverläufe und Energiebilanzen wurden durchgeführt. Um die Potenziale der Anlagen aufzuzeigen, wurden reale oder fiktive Optimierungen vorgenommen.

Vorrangiges Ziel war die energetische Bewertung des Anlagenbetriebes der solarthermischen Kühlsysteme. Hier waren Jahres-, Monats- und Tagesbilanzen von Bedeutung. Dazu wurden folgende Energiemengen simuliert:

- Solarstrahlung in Kollektorebene , Kollektorertrag, Solarsystemertrag
- Solare Deckung
- Erzeugte Kälte
- Benötigte Hilfsenergie (Pumpen, Kühlturm, Kältemaschine)
- Thermische (COP_{therm}) und elektrische (COP_{el}) Arbeitszahl der Kältemaschine bzw. des Gesamtsystems

Die Auswertung der Energiebilanzen erfolgte analog zu jenen des Monitoring nach Vorgabe aus dem IEA SHC TASK38 [Sparber 2009].

Für den Abgleich der Ergebnisse aus Messung und Simulation wurden die gemessenen und berechneten Energien gegenübergestellt. Zwecks Plausibilitätsprüfung der verwendeten Simulationsmodelle und -umgebung hinsichtlich Übereinstimmung mit den gemessenen Daten aus dem Monitoring wurden Referenztage bestimmt und Mess- und Simulationskurven verglichen.

4.2.1 Verwendete Tools und Vorgangsweise

Verwendet wurden die beiden Simulationstools TRNSYS [TRNSYS 17] und Matlab/Simulink [Matlab]. In TRNSYS werden derzeit, mit Ausnahme der Speicher, nur quasistatische- und Kennlinien-Modelle verwendet. In Matlab wird nur die Kältemaschine als Kennlinien-Modell abgebildet, alle anderen Komponenten werden dynamisch simuliert.

Der Ablauf der Simulationen erfolgte vom einfachen zum komplexen System. Zunächst wurden einzelne Komponenten und deren Modelle verwendet und analysiert. Dazu wurden zunächst statische Bedingungen betrachtet und in einem zweiten Schritt Komponentenmodelle mit den gemessenen Monitoringdaten beaufschlagt, um einen Abgleich der Ausgangsgrößen zwischen Simulation und Messung durchzuführen.

Im Rahmen dieses Projektes wurden Simulationsergebnisse unter Verwendung von Einzelmodellen einerseits mit gemessenen Daten aus dem laufenden Betrieb der thermischen Kältemaschine und andererseits mit Herstellerangaben verglichen. D.h. alle Schlüsselkomponenten wurden einer genaueren Analyse unterzogen.

Ziel war es, diese Einzelmodelle und deren Eigenschaften bzgl. Genauigkeiten, Stabilität usw. zu untersuchen und zu dokumentieren. Dies bildete die Ausgangsbasis für die Simulation der gesamten Anlage zur solarthermischen Kühlung.

Die Gesamtanlagen wurden nach zwei unterschiedlichen Prinzipien simuliert. Je nach Planungs- bzw. Monitoringstand wurde eine davon gewählt. Das Load-File-Verfahren konnte nur angewandt werden, wenn der Lastgang über die Simulationsperiode bekannt war. Der tatsächliche Lastgang wurde durch ein Monitoring oder über Gebäudesimulation ermittelt. Beim Free-Floating Verfahren war kein Lastgang nötig, die Simulation zielt auf die maximal möglichen Erträge ab.

4.2.2 Referenzanlage

Um die Monitoring- und Simulationsergebnisse vergleichen zu können, wurde je eine Referenzanlage für die Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen (AKM) und für die sorptionsgestützte Kühlung (DEC) definiert. Die Referenzanlage wurde so bemessen, dass diese die gemessene Kälteproduktion deckt. Aus den Monitoringdaten wurden die Kälteleistung, Vor- bzw. Rücklauftemperaturen etc. herangezogen.

Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen (AKM)

Es findet vor allem das Teillastverhalten der Kompressionskältemaschinen Eingang in die Simulationen. In Abbildung 9 sind zwei solcher Teillast-Kennlinien dargestellt. Dabei wird zwischen zwei Verdichtertypen unterschieden. Die Kennlinie des Standard Turbo-Verdichters (blau) zeigt einen leichten Anstieg des elektrischen COP's bis etwa 80 % der Nennleistung, dann einen konstanten Verlauf bis ca. 50 % und schließlich einen stark sinkenden. Die Kennlinie der Schraubenverdichter (rot) ist deutlich ausgeprägter. Diese steigt auf fast den doppelten Wert bei 40 % Teillast und sinkt dann wieder leicht.

Für die tatsächliche Situation wurde aus dem Datenblatt der jeweiligen Kompressionskältemaschine [Carrier 2010] der elektrische COP im Nennpunkt bestimmt. Die einzusetzende Kennlinie (grün) wird durch Parallelverschieben der theoretischen Kennlinie in den Nennpunkt erzeugt.

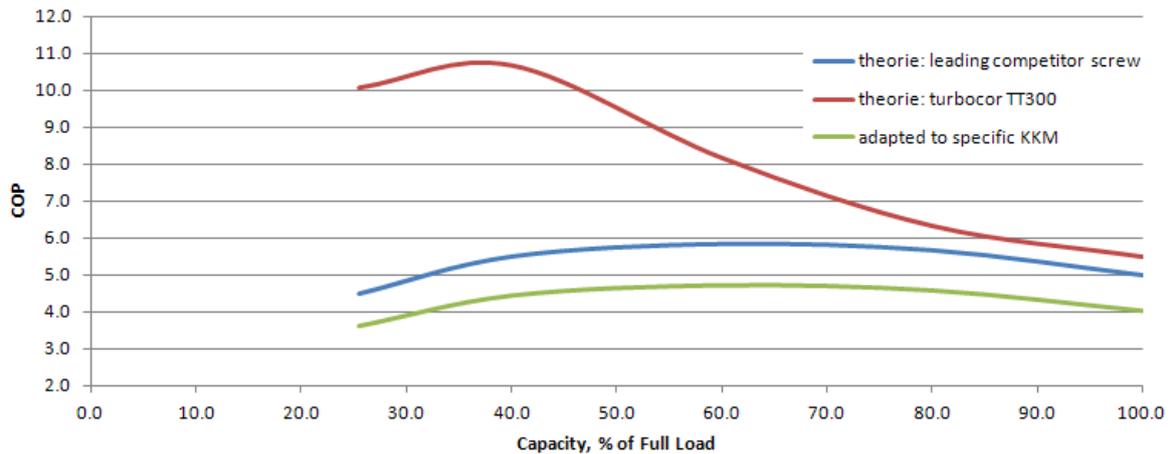


Abbildung 9: Teillast-Kennlinie der Kompressionskältemaschine mit unterschiedlichen Verdichtertypen [Breidenbach 2010, S.372]

Neben dem Teillastverhalten war auch das Kennfeld für Kälteleistung und Stromaufnahme, in Abhängigkeit der Rückkühl- und Kaltwassertemperatur, in der Simulation zu berücksichtigen. Abbildung 11 zeigt diese Abhängigkeit. Dabei gilt für den elektrischen COP und die Kälteleistung, dass diese mit steigender Rückkühltemperatur sinken bzw. mit steigender Kaltwassertemperatur steigen.

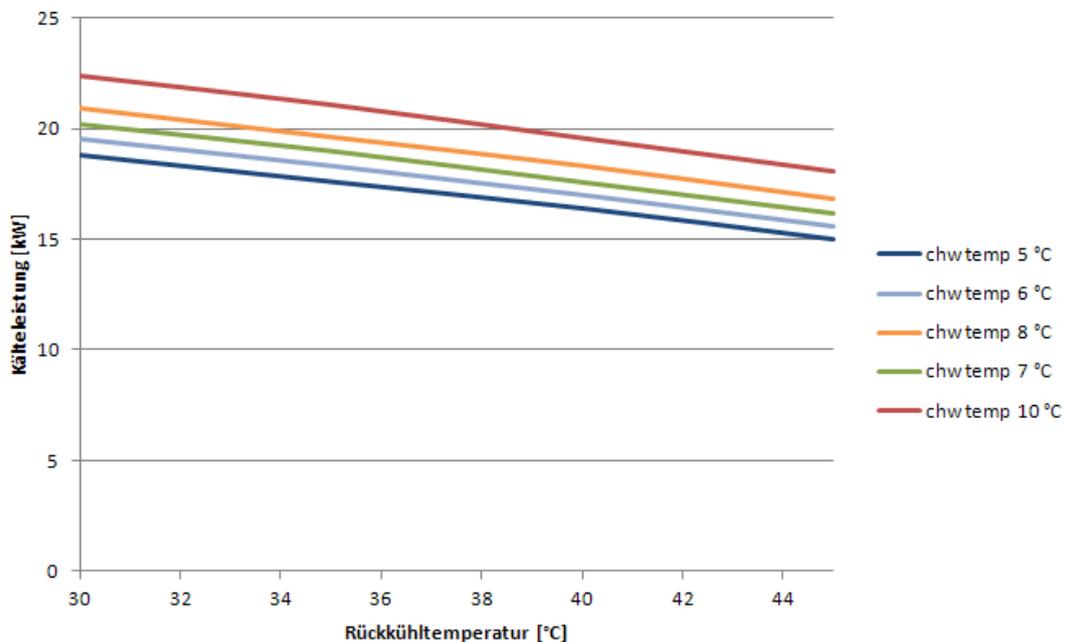


Abbildung 10: Leistung der Kompressionskältemaschine bei unterschiedlichen Rückkühl- und Kaltwassertemperaturen [Carrier 2010]

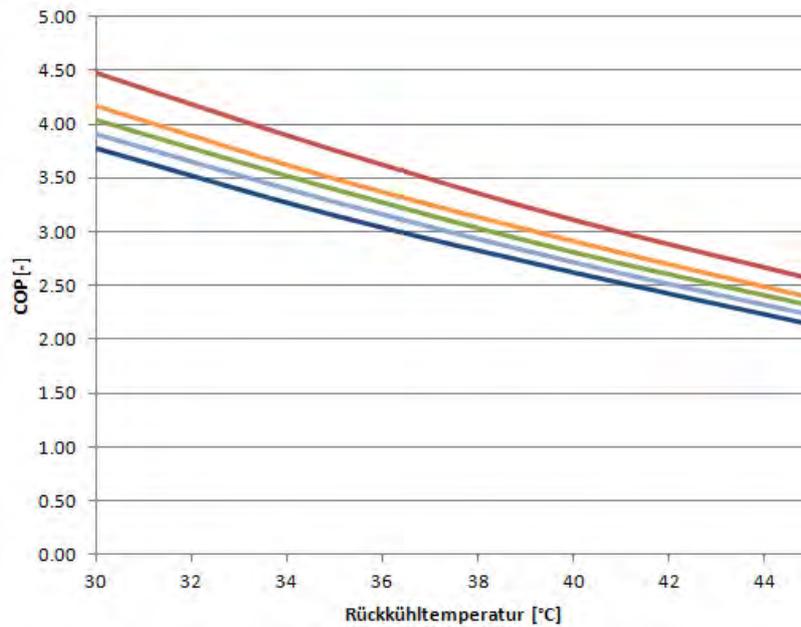


Abbildung 11: Elektrischer COP bei unterschiedlichen Rückkühl- und Kaltwassertemperaturen [Carrier 2010]

Desiccant Evaporative Cooling (DEC)

Abbildung 12 zeigt anhand der Skizze einer solargestützten DEC Anlage, welche Komponenten in der Referenzanlage berücksichtigt wurden (Markierung). Das in der Skizze eingezeichnete Heizregister ‚Heating Coil‘ im Zuluftstrang ist im Falle der Referenzanlage sowohl Heiz- als auch Kühlregister. Durch den Einsatz des Heiz- und Kühlregisters, sowie des Befeuchters sollen folgende Betriebszustände gewährleistet werden:

	Sommerbetrieb	Winterbetrieb
Zuluft Temperatur	Max. 22°C	Min. 22°C
Zuluft Feuchte	Max. 65%	Min. 42%

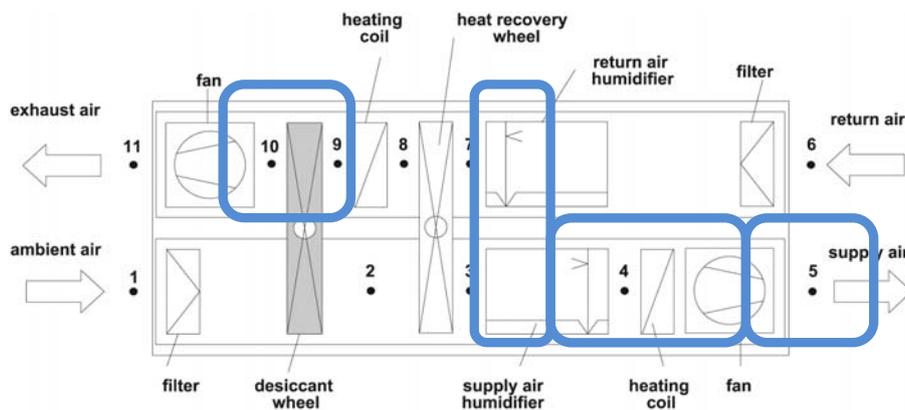


Abbildung 12: Komponenten Referenzanlage (Ersteller: AIT)

Die Entfeuchtung im Sommerbetrieb erfolgt durch Taupunktunterschreitung, entsprechend des in Abbildung 13 links dargestellten Prozesses. Ausgehend vom Zustand der Außenluft (A) erfolgt sensible Abkühlung der Luft bis zur Sättigung (B). Durch weitere Abkühlung entlang (B-C) erfolgt die eigentliche Entfeuchtung auf den geforderten Wassergehalt. Die Lufttemperatur wird danach durch Nacherwärmung (C-D) wieder auf das gewünschte Niveau gehoben. In der Modellierung wurde der oben beschriebene Prozess nachgebildet, sowohl die benötigte Kühlenergie, als auch die für die Nacherhitzung benötigte Wärme werden berechnet. Abbildung 13 rechts zeigt den modellierten Prozess der Heizung und Befeuchtung. Hier wird ausgehend vom trockenen, kühlen Zustand der Umgebung die Luft erhitzt (A-B). Durch Befeuchtung (B-C) im Zuluftbefeuchter wird der Wassergehalt erhöht und gleichzeitig die Temperatur gesenkt. Die Befeuchtung wurde idealisiert als adiabater Prozess mit isenthalpem Verlauf angenommen. Der Punkt C entspricht dem gewünschten Zuluftzustand. Darüber hinaus wurde in der Modellierung zwischen dem sensiblen (etwa A-b) und dem latenten (etwa b-B) Anteil des Heizbedarfs unterschieden.

Die weiteren Randbedingungen in der Modellierung und Simulation des Referenzsystems sind, soweit relevant, ident mit jenen beim Modell des solargestützten DEC Systems.

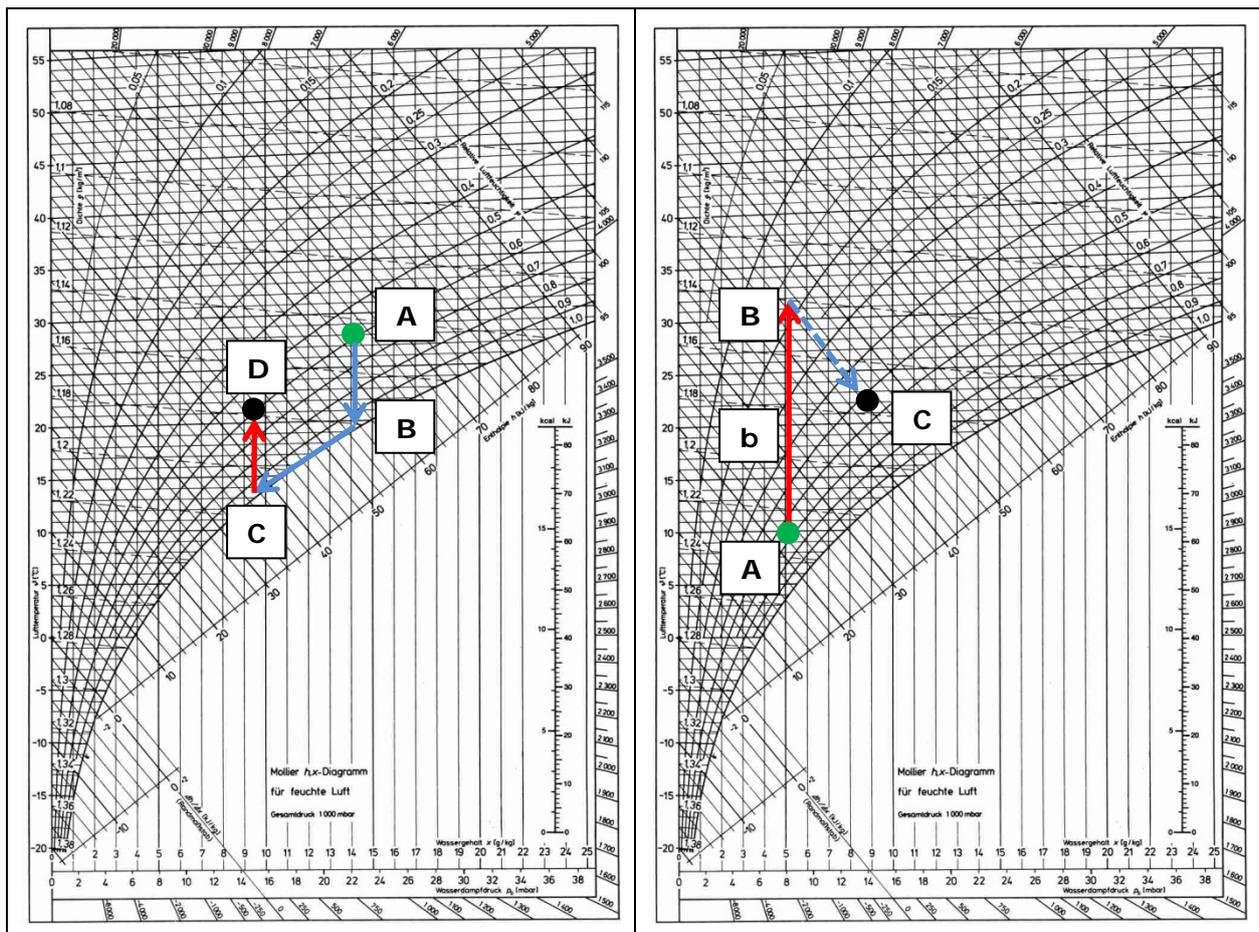


Abbildung 13: links: Kühlung und Entfeuchtung rechts: Heizung und Befeuchtung

(Ersteller: AIT)

4.2.3 Ergebnisse Einzelanlagen und Highlights

Nachfolgend sind die wichtigsten Ergebnisse der Einzelanlagen dargestellt. Weiters wird auf die aufgetretenen Besonderheiten eingegangen. Die Betrachtung ist unterteilt in jene der AKM und der DEC-Anlagen.

Absorption und Adsorption

1) Solargestützte Klein-Adsorptionsanlage MA 34, Wien (AIT)

Zunächst wurde in TRNSYS [TRNSYS 17] ein Simulationsmodell der gesamten Anlage inklusive Regelung abgebildet und mit Monitoringdaten abgeglichen. Abweichungen gab es lediglich bei den Komponenten für den Rückkühler, sowie für die Kältemaschine. Beim Rückkühler handelt es sich um ein trockenes Rückkühlwerk mit einer Sprühvorrichtung. Es waren nur Messdaten über die versprühte Wassermenge vorhanden, was den Abgleich mit den Simulationsergebnissen erschwerte.

Es wurden die drei Ansätze

- Kennlinienmodell mit Herstellerdaten bzw. mit Monitoringdaten,
- TRNSYS Type 221 [TRNSYS 17] und
- TRNSYS Type 290 [Henning, 2004]

zur Darstellung der Performance der Adsorptionskältemaschine verfolgt.

Als Vergleichsbasis der Ergebnisse aus der Simulation wurde die Referenzanlage herangezogen (Nenn-COP elektrisch von 5,0). Da das Basismodell der konventionellen Anlage für einen höheren Leistungsbereich ausgelegt war, mussten folgende Modelleigenschaften adaptiert werden:

- Extrapolation des Kennlinienfeldes für die Kompressionskältemaschine
- Elektrische Leistung Ventilator-Rückkühlung

Als Eingangsdaten für die Simulationen dienten die Monitoringdaten vom Juni, Juli und August 2010. Die gemessenen Werte der Energie auf der Kaltwasserseite (vor dem Kaltwasserspeicher) dienten als Vorgabe für die Abnahme der Simulation. Die Messwerte von Außentemperatur und relativer Außenluftfeuchte sind Eingangsgrößen für den Betrieb des Rückkühlers. Über den Zeitraum der drei Monate erreicht die in der Simulation gelieferte Kälteenergie annähernd das Niveau der gemessenen Werte.

Die, auf den Monitoringergebnissen der drei untersuchten Jahre basierenden, Erfahrungen zeigen, dass der Strombedarf für den Ventilator des Rückkühlers stets den Großteil des Gesamtverbrauchs ausmacht und somit den elektrischen COP der Anlage maßgeblich beeinflusst. Je effizienter diese Komponente arbeitet, umso höher wird der elektrische COP. So wird bei einer Reduktion der Stromaufnahme von 50% eine Steigerung von 38% beim elektrischen COP erreicht (Basis August 2010).

Weiters zeigen diese Auswertungen, dass folgende Adaptierungen in der Regelung erforderlich sind:

- Betrieb der Adsorptionskältemaschine in Abhängigkeit der Abnahmeseite
- Regelung der Adsorptionskältemaschine nicht nur auf eine Kaltwasser-Solltemperatur, sondern auf eine Mindest-Temperaturdifferenz

2) *Bezirkshauptmannschaft Rohrbach (ASiC)*

Verwendet wurde Matlab/Simulink mit dem CARNOT-Blockset [Matlab]. Die Parameter wurden anhand der Herstellerdaten gesetzt und mit Monitoringdaten abgeglichen.

Für die Modellierung von Kältemaschine und Nasskühlturm mussten Modelle erstellt werden. Aus dem Datenblatt des Rückkühlers sind zwei Leistungswerte zu entnehmen. Dabei sind Luft- und Wassermassenstrom aber nicht näher spezifiziert und weitere Angaben waren nicht verfügbar. Die Strategie beschränkte sich deshalb darauf, mögliche Modellansätze mittels Parameteranpassung an die Messdaten anzupassen. Dazu wurden die Modellansätze Merkel-Verfahren [VDI Wärmeatlas] und TRNSYS Type 510 [TRNSYS 17] untersucht. Es zeigte sich, dass beide Modelle nach der Parameteranpassung ähnliche Ergebnisse liefern.

Für Kältemaschinen existieren einige Modelle, die zumindest stationär mit einer Genauigkeit von 5-10% rechnen. Mangels umfassender Daten mussten auf Basis der Datenblattangaben und von Messdaten aus dem Monitoring die Parameter für die Modellbildung angepasst werden. Zur Anwendung kam das Modell der charakteristischen Gleichung.

In den Optimierungsvarianten wurden

- eine korrekte Pumpenauslegung,
- der Einfluss der Kühlwassertemperatur und
- die Berücksichtigung von Reglerfehlfunktionen simuliert.

Dabei stellt sich die Rückkühlpumpe als größtes Potenzial mit bis zu 50% heraus. Der Einfluss der Rückkühltemperatur ist in diesem Fall auf ca. 5% beschränkt. Durch die in der Simulation korrekte Freigabe der AKM konnte ein weiteres kleines Potenzial aufgezeigt werden.

3) *Rathaus Gleisdorf (AEE-INTEC)*

Mit TRNSYS [TRNSYS 17] wurde die Anlage zum solarthermischen Heizen und Kühlen modelliert und die Energieverbraucher als Lastprofile entsprechend den Messdaten vorgegeben. Das TRNSYS Simulationsmodell beinhaltet den Solarkreis, die Nachheizung, den Pufferspeicher und den mit gemessenen Lastprofilen hinterlegten Abnahmekreis.

Die Verwendung des TRNSYS Modell (Type 209 [Doell 2008]) für die AKM stellt sich dabei als kritisch heraus. Das Modell liest für den aktuellen Betriebszustand aus einem Kennlinienfeld für stationäre Betriebszustände den thermischen COP aus und nimmt für die Startphase eine Reduktion der Kälteleistungsabgabe entsprechend einer parametrierbaren e-Funktion an.

Die Simulationen ergaben thermische COP von 0,7 bis 0,75, während die Messungen 0,45 bis 0,55 aufwiesen. Dementsprechend zu niedrig war der Energiebedarf im Austreiberkreis. Durch Hinzufügen eines „virtuellen“, völlig durchmischten Wasserspeichers im Austreiberkreis, mit einer thermischen Kapazität von 150 Liter Wasser und vergleichsweise schlechter Dämmung, konnte eine gute Nachbildung des thermischen Anfahr- und Abkühlverhaltens der AKM erreicht werden.

Es wurden im Wesentlichen fünf Optimierungsvarianten durchgeführt. Als erstes wurde die gemessene Anlage mit Nachheizung (Juni/Juli) betrachtet. Daraus zeigte sich, dass ein flexibles Regelkonzept, welches nur nachheizt, wenn auch Kühlbedarf zu erwarten ist, beträchtliches Einsparpotenzial hat. Ein zweiter Schritt war die Variation des Speichervolumens. Der Speicher mit 15 m³ führt zu einer Erhöhung der jährlichen Einsparung an Nachheizenergie von 3 %. Größere Speicher sind wieder schlechter, da die Verluste höher sind. Anschließend erfolgte die Betrachtung bei konstanter Rückkühltemperatur (24 bzw. 26 °C), wobei die Zunahme des elektrischen COP nur gering ausfiel. Ebenfalls verändert wurde die Aperturfläche der Kollektoren. Hierbei zeigte sich, dass eine Verringerung der Aperturfläche um 30 % nur zu einer minimalen Erhöhung des Nachheizenergiebedarfs im Sommer von 4 % führt. Zu guter Letzt wurde versucht die Kälteproduktion zu maximieren. Im Gegensatz zu allen anderen Varianten wurde bei letzterer mehr Kälteenergie erzeugt als im Referenzfall, da die Betriebszeiten deutlich länger sind als die Betriebsstunden im Referenzfall. Ebenfalls kommen die Wochenenden dazu, an welchen Kaltwasser generiert wird. Im Schnitt wurde 30 % mehr Kälteenergie generiert, aber bei 8 % weniger Nachheizung und bei einem deutlich höheren elektrischen COP von 8,5.

4) Feistritzwerke, Gleisdorf (AEE-INTEC)

Das solarthermische Heiz- und Kühlsystem und seine Komponenten wurden in der Simulationsumgebung TRNSYS [TRNSYS 17] modelliert und mit den vorhandenen Messdaten validiert. Es sind sämtliche Regelstrategien der hydraulischen Kreise, deren Leistungsabgabe etc. definiert und der realen Anlage nachgebildet.

Auch in diesem Simulationsmodell wurde das Problem mit dem AKM Modell durch Hinzufügen eines „virtuellen“, völlig durchmischten Wasserspeichers im Austreiberkreis, mit einer thermischen Kapazität von 130 Liter Wasser und vergleichsweise schlechter Dämmung umgangen.

Ein wesentliches Problem bei der Erstellung der Lastfiles stellten die unzureichend vorhandenen Messdaten der Energieerzeugerkreise dar. Einzig im hydraulischen Kreis der Blockheizkraftwerke (BHKWs) wurden Temperaturen, Massenströme und Momentanleistungen aufgezeichnet. Bei sämtlichen anderen Energieerzeugern konnte nur auf monatliche Energiemengen zurückgegriffen werden. Diese wurden anteilmäßig auf die Momentanleistungen der BHKWs aufgeteilt und zu einem gesamten Energieerzeuger zusammengefasst. Auf Grund dessen sind zwischen simulierten und gemessenen monatlichen Energiebilanzen geringfügige Abweichungen zu verzeichnen.

Des Weiteren sind bei dieser Anlage auch die thermischen Verluste nicht außer Acht zu lassen. Durch insgesamt 5 Speicher mit jeweils 2 m³ entstehen in den jeweiligen Monatsbilanzen thermische Verluste zwischen 20% und 50% des gesamten Energieinputs

in das System. Diese Verluste sind nicht nur durch die Speicher sondern auch durch die langen Rohrleitungen bedingt.

Die durchgeführten Optimierungsvarianten (April-September) beziehen sich auf die Variation des Speichervolumens und der Größe des Kollektorfeldes, die konstante Rückkühltemperatur, Free-Floating und ein inaktives Back-up im Sommer.

Wird das Speichervolumen auf 5 m³ bzw. 2 m³ bei gleichbleibendem Dämmstandard (47 bzw. 30 W/K) reduziert, sind Einsparungen der Nachheizenergie von rund 20 % zu erreichen. Wird zusätzlich eine optimal ausgeführte Dämmung (16 W/K) angebracht, sind bei einem Speichervolumen von 2 m³ Einsparungen der Nachheizung von bis zu 60 % möglich. Durch eine Erhöhung der Kollektorfläche ist es möglich, den Anteil der Nachheizenergie um bis zu 75 % zu reduzieren, während die geforderte Kälteproduktion erreicht wird. Wird die Nachheizung in den Sommermonaten abgeschaltet, kann der Kühlbedarf durch die AKM nicht abgedeckt werden. Wird lediglich die Nachheizung deaktiviert, ohne sonstige regelungstechnische Änderungen an der Anlage vorzunehmen, sind auf der einen Seite Einsparungen im Nachheizkreis von 70 % zu erreichen, auf der anderen Seite werden allerdings nur 60 % des geforderten Kühlbedarfs gedeckt. Werden im System die bestehenden Speicher durch einen gut gedämmten 2 m³ Speicher ausgetauscht, könnten etwa 80 % des geforderten Kühlbedarfs gedeckt werden, während sich die Einsparung der Nachheizenergie auf etwas mehr als 80 % erhöht.

5) Fa. S.O.L.I.D., Graz (UIBK)

Die Simulationen erfolgten mit TRNSYS 17 [TRNSYS 17] und den dort zur Verfügung stehenden Standardmodellen. Zunächst erfolgte die Validierung einzelner Anlagenteile und den dazugehörigen Simulationsmodellen (Solaranlage, Speicher, AKM, Kühlturm, Pumpen). Ziel war es die Abweichungen von den Messwerten unter $\pm 10\%$ zu halten. Dabei wurden alle Inputgrößen der jeweiligen Modelle aus den Messwerten gebildet und die Outputs der Simulation mit jenen der Messung verglichen. Bei dieser Anlage wurde ein großes Augenmerk auf das Kennlinienmodell der AKM gelegt. Bei den restlichen Modellen war kein so großer Aufwand notwendig um die geforderte Genauigkeit zu erreichen.

Nach erfolgreicher Einzelmodell-Validierung erfolgten das Zusammensetzen der Einzelmodelle zu einem gesamten Anlagenmodell („assembling“) und die Integration der Regelung in die Simulation. Anschließend konnte die Gesamtsimulation validiert werden.

Mit dem gesamt validierten Modell wurde anschließend die Optimierung der Anlage durchgeführt und analysiert. Die Optimierungen erfolgten mit einer Monatssimulation basierend auf August 2009 und einem „Lastprofil-Ansatz“. Eine abschließende Jahressimulation erfolgte mit einem Free-Floating Ansatz. Einziger Input dabei war die Globalstrahlung; die Wärmesenke (Gebäude bzw. Lastprofil) konnte jede bereitgestellte kWh aufnehmen.

Die Optimierung erfolgte in vier Schritten, dabei wurde jeweils das Lastprofil für 2009 bzw. 2010 verwendet: Regelung Stand 2009 bzw. 2010; Verbesserung der Regelung und fiktiver Kühlturmtausch.

Der Unterschied zwischen simuliertem und gemessenem elektrischen COP liegt bei ca. 10% Abweichung. Die geänderte Regelstrategie erhöht den elektrischen COP von 2,11 auf 2,95. So konnte mit diesem Stand der Regelung für 2009 ein elektrischer COP von 2,95, hingegen für 2010 ein Wert von 3,4 erreicht werden. Durch weitere Maßnahmen in der Regelstrategie (vor allem die Drehzahlregelung aller Pumpen) kann der elektrische COP auf 4,2 gehoben werden. Durch einen zusätzlichen Tausch des Kühlturms wird schließlich ein Höchstwert von 4,7 erreicht. Der thermische COP verhält sich leicht rückläufig. Durch die Änderungen sinkt dieser von 0,67 auf 0,65 für das Lastprofil 2010, beim Lastprofil 2009 steigt dieser sogar leicht an.

Die Auswirkungen der höheren Lasten bzw. höheren Abnahmeenergiemengen zeigen einen sehr positiven Effekt auf die Raumheizungsunterstützung in den Übergangsmoaten. In diesen Monaten steigt der elektrische COP auf Werte >50 (=nur die Solaranlage). Im Sommer sind für die solarthermische Kühlung durchschnittliche elektrische COPs von 4-5 erreichbar.

6) Fa. Bachler, Gröbming (UIBK)

Bei dieser Anlage steht das Erproben von vorhandenen TRNSYS Modellen, welche ohne großen Aufwand für die Adaptierung der Kennlinien verwendet werden sollen, im Vordergrund. Mit dieser Betrachtung sollen die Unterschiede zu den extensiv angepassten Kennlinienmodellen ausgearbeitet werden.

Die wichtigsten Modelle dieser Anlage sind die Solaranlage, der Kühlturm und die Absorptionskältemaschine. Die Validierung der Modelle erfolgt anhand einer 8 Tage Periode. Die Einzelmodelle weisen eine maximale Abweichung von 15 % auf. Werden die Komponenten zusammengeführt, ergibt sich eine Gesamt-Abweichung beim elektrischen COP von ca. 23%. Auch der thermische COP weist eine Abweichung von fast 20 % auf.

Die Abbildung dieser Anlage in einer Jahressimulation macht keinen Sinn. Der Lastfile-Ansatz bringt hier, auf Grund der geringen Laufzeiten bzw. Leistungen, keine weiterführenden Erkenntnisse. Stattdessen müsste eine gekoppelte Anlagen- und Gebäudesimulation oder zumindest ein Free-Floating Ansatz verwendet werden. Erster Fall ist aus zeitlichen Gründen nicht realisierbar, sollte aber im Folgeprojekt SolarCooling Opt [SCopt 2010] betrachtet werden. Der zweite Fall würde lediglich die AKM für sich betrachten, was wiederum nichts mit der Realität zu tun hat. Aus diesen Gründen wurde hier auf eine Parameterstudie verzichtet.

Durch das Berücksichtigen des Teillastverhaltens ergibt sich für die Referenzanlage ein extrem geringer elektrischer COP von 1,75. Bei etwas vertiefter Betrachtung stellt sich heraus, dass die KKM eigentlich schon unter der Mindestleistung arbeiten müsste. Wird dies auch berücksichtigt, ergibt sich ein noch geringerer elektrischer COP bzw. ein anderes Leistungsprofil und wäre damit nicht mehr vergleichbar.

Wenn die Anlage in Betrieb ist, ergibt sich eine typische Stromaufteilung von ca. 50 % des Verbrauchs für die KKM, ca. 15 % für die Rückkühlpumpe und knapp unter 10 % für die Kaltwasserverteilerpumpe und den Kühlturm. Auf Grund des hohen Standby-Verbrauchs (0,6 kWh/d) sinkt der Anteil der KKM von ca. 50 % während des Betriebs auf ca. 30 % über die betrachtete Periode.

Aus oben genannten Gründen wird bei dieser Anlage auf eine simulationstechnische Optimierung verzichtet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt für diese Haltung ist die Ungenauigkeit des AKM Modells. Das hier verwendete Modell bzw. die dazugehörigen Kennlinien passen mit den realen Daten nicht zusammen und die Ergebnisse sind nicht zufriedenstellend. Jegliche Änderungen in der Anlagenkonfiguration oder eine Regelungsoptimierung würden keine sinnvollen Ergebnisse liefern.

DEC – Desiccant Evaporative Cooling

1) Solargestützte DEC-Anlage ENERGYbase, Wien (AIT)

Auf Basis des entwickelten Modells wurden in TRNSYS [TRNSYS 17] eine dynamische thermische Simulationen der bestehenden Anlage durchgeführt. Im Vordergrund stand der Vergleich der gemessenen und berechneten Daten zur Überprüfung der Simulationsergebnisse.

Es zeigte sich eine gute Übereinstimmung der Zuluftzustände Temperatur und Feuchte im Sommerbetrieb, jedoch deutliche Unterschiede in der Feuchte im Winterbetrieb. Die berechneten Werte des Kollektorsertrages, sowie der Regenerationswärmemengen liegen etwa 10 % unter den gemessenen. Die zur Heizungsunterstützung verwendete Wärmemenge wird in der Simulation etwa 7 % geringer berechnet, als tatsächlich gemessen. Hier sei jedoch auf die nicht triviale hydraulische Verschaltung im Heizbetrieb und die eventuell damit verbundenen Ungenauigkeiten in den Messwerten der Heizungsunterstützung hingewiesen.

Auf Basis des erstellten Simulationsmodells wurden nach Anpassung bzw. Überprüfung anhand der Monitoringdaten Optimierungsvarianten des Systems untersucht. Die Untersuchungen umfassten die Bereiche Kollektorfläche, Luftansaugung und Variation Sollwert Zulufttemperatur.

Das solarthermische System der ENERGYbase weist eine Bruttofläche von 285 m² und eine Aperturfläche von 276 m² auf. Ab etwa 276 bis 300 m² Kollektorfläche kann kein Mehrertrag zur Heizungsunterstützung erzielt werden. Im Gegensatz dazu steigt die Regenerationswärme auch in Bereichen größerer Kollektorflächen weiter an, obwohl auch hier eine Abnahme des Anstieges zu sehen ist.

Die Ergebnisse der Simulation der Luftansaugung auf Basis korrigierter Daten zeigen keine Auswirkungen auf die Heizungsunterstützung, obwohl die Ansaugtemperaturen im Winter zumeist deutlich höher liegen als die tatsächliche Außentemperatur laut UBIMET Wetterdatensatz (Wien Donauefeld). Dieser Effekt scheint durch die Wärmerückgewinnung der beiden Rotoren egalisiert zu werden.

Bei der Variation des Sollwertes der Zulufttemperatur wurde die Zulufttemperatur im Winter konstant bei 22 °C gehalten und im Sommerbetrieb wie folgt variiert: 18, 20, 22, 24 °C. Bei Reduktion der Temperatur steigt der Kollektorsertrag. Dies ist auf einen deutlich höheren Bedarf an Regenerationswärme auf Grund des erhöhten Kühlbedarfs zurückzuführen. Umgekehrt führt eine Erhöhung des Sollwertes zu einer Abnahme des Regenerationswärmebedarfs und damit auch des Kollektorsertrags.

4.2.4 Conclusio

In beiden verwendeten Simulationstools (TRNSY, Matlab/Simulink) ist eine relative große Datenbank an Modellen verfügbar. Bei genauerer Betrachtung weisen die meisten davon aber eindeutige Schwächen auf. Im Zuge dieses Projekts wurden für die jeweiligen Anlagen der Ist-Stand, Optimierungsvarianten und je eine Referenzanlage simuliert.

Sehr intensiv wurden die AKM-Modelle durchleuchtet. Herkömmliche bzw. standardmäßig verfügbare Modelle sind nur mit hohem Zusatzaufwand einsetzbar. Z.B. Virtueller Speicher oder Anpassung der Kennlinien an Monitoringdaten. Wird auf diese Zusätze verzichtet, können die Abweichungen zur Realität beachtlich werden (>20%). Auch sind diese Modelle nur für den Nenndurchfluss ausgelegt, sollen neue Regelkonzepte mit variablen Massenströmen getestet werden, ist das derzeit nur bedingt bzw. gar nicht möglich.

Weiters sehr detailliert wurden die Modelle für den Kühlturm und die Rotor-Modelle für die DEC Systeme betrachtet. Bei ersterem stellt sich vor allem die Datenverfügbarkeit als problematisch heraus. Aus den wenigen Herstellerangaben sind kaum passende Modellinputs verfügbar. Die Modelle wurden folglich mit Hilfe von Minimierungsfunktionen durch die Monitoringdaten gefittet.

Auch die Modelle für die Wärme- und Feuchterückgewinnungsrotoren können derzeit nicht alle notwendigen Eigenschaften abdecken. Schwerpunkt zukünftiger Entwicklungen muss hier die Implementierung der Abhängigkeit der Rotoreigenschaften von der Drehzahl sein.

Die theoretischen Verbesserungen wurden mit dem Ziel, die Sensitivität verschiedener Parameter ersichtlich zu machen, ausgeführt. Deshalb ist in Abbildung 14, welche die Ergebnisse der Untersuchungen abschließend zusammenfasst, nicht unbedingt die optimale Anlagenkonfiguration zu finden.

Die am häufigsten betrachteten Systemkonfigurationen bzw. Verbesserungen sind:

- verringerte Systemverluste
- Effizientere Pumpen bzw. Gebläse (Kühlturm)
- Effizienter Kühlturm (Rücklauftemperatur)
- Anpassungen Kollektorfeld
- Regleranpassungen

Zusammengefasst ergeben sich elektrische COPs von >5. Dies sollte auch als Minimum Performance angesehen werden. Die Simulationen zeigen aber auch deutlich, dass höhere Werte erzielt werden können. Die höchsten Ergebnisse liegen bei ca. 8. Weitere Simulationen und vor allem Modellentwicklungen werden im Folgeprojekt SolarCooling Opt [SCopt] erfolgen.

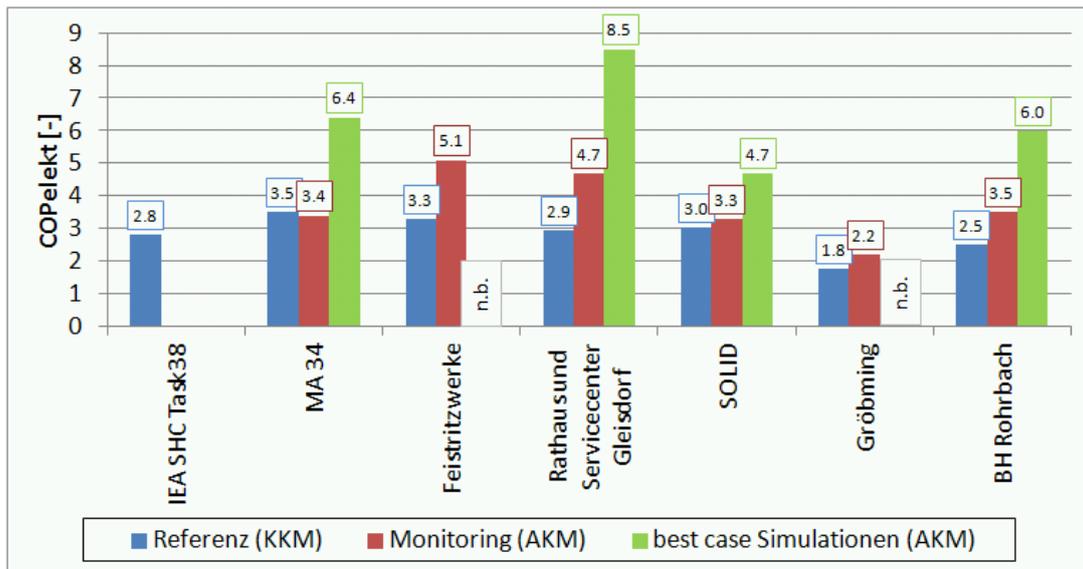


Abbildung 14: Zusammenfassung der Ergebnisse für den mittleren elektrischen COP (Arbeitszahl) für alle simulierten Anlagen (n.b.: nicht berechnet) (Ersteller: UIBK)

4.3 Erkenntnisse / Optimierungen

4.3.1 Allgemein gültige Erkenntnisse

Der Einsatz einer solarthermischen Kühlanlage kann keinesfalls Probleme lösen, welche durch ein unvorteilhaftes architektonisches/energetisches Gebäudekonzept verursacht wurden. Vorrangig sind beispielsweise große Glasflächen zu vermeiden und externe Abschattungen anzubringen.

Beim Betrieb solarthermischer Kühlanlagen zeigte sich vermehrt, dass auch konventionelle Komponenten wie z.B. das Energieverteilsystem oder die Regelung, häufig Fehlerquellen aufweisen und das gesamte System beeinträchtigen. Wegen der hohen Sensibilität der Systeme, der Prämisse einer hohen Primärenergieeinsparung und dem Fakt, dass Solarenergie nur zeitlich beschränkt zur Verfügung steht, wirken sich solche Fehler aber oft wesentlich aus. Auch konventionelle, elektrisch betriebene Kompressionskühlanlagen würden nach einer derart detaillierten und umfassenden Analyse wesentliche Gesichtspunkte hinsichtlich Primärenergieeinsparung aufwerfen.

Um eine zeitgerechte Inbetriebnahme im Frühling (Kühlturm, etc.), ein schnelles Eingreifen bei Betriebsstörungen und einen dauerhaft effizienten Betrieb zu ermöglichen, sind geschulte Partner bei den Anlagen vor Ort von großem Vorteil. Hohe solare Deckungsanteile und eine Zufriedenheit der Nutzer sind oft nur durch eine fachgerechte Betreuung des Personals vor Ort möglich. Die am Betrieb der Anlage in der Praxis beteiligten Personen müssen von der Technologie überzeugt und begeisterungsfähig sein. Ein Grundverständnis für die, im gegenwärtigen Stand der Entwicklung, durchwegs komplexen Systeme muss vorausgesetzt werden können.

4.3.2 Anlagenkonfiguration

Die Abstimmung der Anlage auf den Verbrauch ist entscheidend für einen effizienten Einsatz. Ein zu erwartendes Teillastverhalten muss in die Regelstrategie eingearbeitet werden.

Energiesparpumpen und –gebläse sowie deren drehzahlregelbare Ausführung sollten als obligatorisch betrachtet werden.

Kälteverteil- und Abgabesysteme mit höheren Kaltwassertemperaturen (Flächenkühlung) sind gegenüber z.B. Systemen mit Gebläsekonvektoren zu bevorzugen, sofern die installierbare Fläche für die benötigte Nennleistung ausreicht. Das konventionelle Kälteverteilsystem und die übergeordnete Regelung bzw. Gebäudeleittechnik sind äußerst wichtige Komponenten mit einem enormen Einfluss auf die Effizienz des gesamten solarthermischen Heiz- und Kühlsystems.

Es muss auf die sachgerechte Montage und Installation von wirklich allen Komponenten geachtet werden. Selbst kleinste Fehler (wie z.B. falsch programmierte Regelventile der Kühldecken) zeigen negative Auswirkungen auf die Effizienz des gesamten Systems.

Rein solarthermische Kühlung ohne Nachheizung (thermisches Backup) sollte aus primärenergetischen Gründen unbedingt bevorzugt werden. Geringfügiges Überschreiten

der geforderten Raumtemperaturen ohne wesentliche Komforteinbußen muss bewusst in Kauf genommen werden. Ist ein Backup dennoch nötig, dann ist die Nachheizung mit fossilen Energieträgern zu vermeiden und das System mit einer Kompressionskältemaschine zu unterstützen. Ein System, welches sich hierbei bewährt hat, führt den Rücklauf der Kälteverteilung erst seriell der solarthermisch betriebenen Kältemaschine zu, um dann gegebenenfalls mit der Kompressionskältemaschine auf noch niedrigere Temperaturen heruntergekühlt zu werden.

Das Hydraulikkonzept ist mit dem Ziel einer Reduktion der Speicher- und Verteilverluste auszulegen. Es ist energetisch günstiger nur einen kompakten Speicher zu verwenden und das Energieverteilnetz nur mit der aktuell nötigen Temperatur zu belasten. Eine ungünstige (Standard-) Regelstrategie der Nachheizung hat stark negative Auswirkungen auf die Systemverluste.

Bei großen Speichern bzw. mehreren Speichern sollte ein Sommer- und Winterbetrieb vorgesehen werden. Nur über diesen Weg wird ein entsprechendes Temperaturniveau zum zeitgerechten Start der thermischen Kältemaschine erreicht. Bei Nachrüstung einer solarthermisch betriebenen Kühlmaschine ist unbedingt auf die Abstimmung zwischen der Solaranlage und der Kältemaschine zu achten. High-flow oder mind. Matched-flow Anlagen sind generell besser geeignet.

4.3.3 Regelung/Monitoring

Die durchwegs übliche Kopplung von zwei Regelsystemen (meist Gebäudeleittechnik und Regelung der Kältemaschine) macht die Anlage unnötig komplex, Änderungen sind schwer umzusetzen und Störungsmeldungen sind kompliziert zu analysieren.

Mit kombinierten Regelungs- und Monitoringsystemen wurden generell gute Erfahrungen gemacht. Autoritätsprobleme zwischen solarthermischem Heiz-, Kühl- und Warmwasserbetrieb können über sinnvoll gewählte zeitliche Abgrenzungen oder über entsprechende Temperaturniveaus mit entsprechenden Hysteresen vermieden werden. Bei unterschiedlichen Betriebsmodi (Sommer/ Winter) ist auf die richtige Sensorposition, vor allem für die Solarregelung, zu achten. Die Art der Umstellung zwischen den Betriebsmodi (automatisiert oder manuell ausgelöst) ist essentiell und muss je nach den Randbedingungen der Anlage entschieden werden. Eine Anzeige bzw. automatisierte Meldung bei Störungen sollte unbedingt implementiert sein. Dadurch können lange Stillstandzeiten, Systemverluste und Stagnation der thermischen Solaranlage vermieden werden.

Eine ständige Funktionsüberprüfung bzw. ein Mindestmonitoring während der ersten Betriebsjahre ist dringend zu empfehlen.

4.3.4 DEC Anlagen

Das Potenzial zur Primärenergieeinsparung ist für solarthermisch betriebene DEC-Anlagen im Vergleich zu Referenzanlagen mit Kompressionskältetechnik sehr hoch. Ein Großteil der Primärenergieeinsparung ist dabei im Winter zu erzielen, da hier besonders der Sorptionsrotor mit Wärme- und Feuchterückgewinnung positiv wirkt. Es erscheint daher aus energetischer Sicht sinnvoll in unserem Klima, auch Standardlüftungen mit

Feuchteregulierung anstelle von rein sensiblen Wärmerückgewinnungsrotoren mit Wärme- und Feuchterückgewinnungsrotoren auszurüsten. Für die Technologie solargestützte DEC-Anlagen bedeutet die ganzjährige Betrachtung einen enormen Vorteil im Vergleich zur rein sommerlichen Betrachtung für Kühlzwecke. Im Winter steckt für diese Technologie in unserem Klima das große Primärenergieeinsparpotenzial und sollte in Zukunft weiter verfolgt und optimiert werden.

Es gilt daher das kaum untersuchte Potenzial des Sorptionsrotors als Enthalpiorotor zu untersuchen und geeignete Regelstrategien mit Drehzahlabhängigkeit zu entwickeln. In der Funktion als Trocknungsrotor hat der Sorptionsrotor bei Betrachtung der Betriebsstunden nur eine untergeordnete Funktion. Hier gilt es zu analysieren, ob durch adaptierte Regelstrategien oder andere Materialien für Sorptionsrotoren besserer Ergebnisse zu erzielen sind. Der adiabate Kühlmodus stellt die Optimierungsmaßnahme erster Priorität dar. Für diesen Betriebsmodus über den Abluftbefeuchter und Wärmerückgewinnungsrotor ist noch eine Optimierung über die Regelung der Drehzahl des Wärmerückgewinnungsrotors zu erwarten.

Besonderes Augenmerk ist auf die Luftansaugsituation für solargestützte DEC-Anlagen zu legen. Ein Kurzschluss zwischen Fort- und Außenluft muss vermieden werden. Eine Vorwärmung der Außenluft hat im Winterbetrieb kaum Einfluss auf den Energiebedarf der Nachheizung.

4.3.5 Anlagen mit Ab- bzw. Adsorptionskältemaschinen

Die Dimensionierung und Auslegung der hydraulischen Kreise und dessen Komponenten rund um die Absorptionskältemaschine sollte sehr sorgfältig durchgeführt werden. Weiters sollte auf eine Minimierung des Druckverlustes im Austreiberkreis, Kaltwasserkreis und vor allem im Rückkühlkreis geachtet werden. Nur so ist es möglich den parasitären Strombedarf der zugehörigen Pumpen gering zu halten. Ein reduzierter Volumenstrom im Austreiberkreis (zumindest bei den hier untersuchten Wasser-Lithiumbromid Maschinen) als im Datenblatt des Herstellers angegeben, führt zu einer etwas geringeren thermischen Leistung und thermischen Arbeitszahl, aber jedoch zu einem nicht unwesentlich geringeren Bedarf an elektrischer Energie der Austreiberpumpe und damit insgesamt zu einem höheren elektrischen COP.

Bei der Komponentenauswahl ist der Standby-Verbrauch an elektrischer Energie unbedingt zu berücksichtigen. Vor allem der Absorptionskältemaschine (Regelung, Vakuumpumpe) und den Rückkühlern ist größte Bedeutung beizumessen.

Bei Absorptionskältemaschinen mit Wasser-Lithiumbromid als Arbeitsstoffpaar muss unbedingt darauf geachtet werden, die minimal zulässige Eintrittstemperatur des Rückkühlkreises nicht zu unterschreiten, um Kristallisation in der Maschine zu vermeiden. Die Werte differieren, je nach Hersteller der Kältemaschine. Niedrige Rückkühltemperaturen sind allerdings für hohe thermische COP-Werte erforderlich. Der Rückkühlkreis muss die Kühllast des Gebäudes und die Antriebsenergie der thermischen Solaranlage zum Kühlturm transportieren. Bedingt durch hohe Außentemperaturen im Sommer sind oft nur geringe Temperaturspreizungen möglich, was hohe Massenströme impliziert. Der Dimensionierung des Rückkühlkreises (Rohrleitungen, Einbauten, Pumpe,

Kühlturm) ist daher höchste Bedeutung beizumessen. Kleine Fehler in diesem Bereich können eine zu erwartende Primärenergieeinsparung sogar unmöglich machen. Die Entwicklung spezieller Kühltürme zur Erreichung hoher Kühlwasserspreizungen, bei geringem Verbrauch an elektrischer Energie und Wasser, sollte unbedingt vorangetrieben werden.

Die Wasseraufbereitung ist ein essentiell wichtiger Teil eines solarthermischen Kühlsystems in Kombination mit einem offenen Nasskühlturm. Eine Kühlwasserbehandlung hinsichtlich Algenbildung und Hygiene ist unerlässlich. Der Kühlwasseraustausch über eine Abschlammautomatik reicht nicht aus. Eine ordentliche Abstimmung und Funktionsweise der einzelnen Komponenten dieser Teilsysteme ist wichtig für ein erfolgreiches Betriebsverhalten des gesamten Systems.

5 Detailangaben in Bezug auf die Ziele des Programms

- Schaffung der technologischen Basis für das Gebäude der Zukunft, insbesondere das Plus-Energie-Haus. Das Programm setzt einen weiteren Schwerpunkt auf Büro- und Betriebsgebäude sowie auf Gebäudemodernisierung

Solarthermische Kühlung ist auf dem Weg zum Plus-Energie-Haus insbesondere für Österreich eine relevante Technologie. Die Nutzung von solarthermischen Anlagen zu Brauchwasserbereitung und Heizungsunterstützung hat schon einen breiten Anwendungsbereich in der nachhaltigen Energieversorgung von Gebäuden in Österreich gefunden und wird auch in Zukunft verstärkt eingesetzt werden. Der nächste Schritt nun ist die solarthermische Heizung in den dafür sinnvollen Anwendungen, aber auch für solar-thermische Kühlung zu verwenden. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurde nun anhand von bereits existierenden Demonstrationsgebäuden die Technologie solarthermische Kühlung auf ihre derzeitige Einsatztauglichkeit und Effizienz evaluiert und die technologischen Schwachstellen aufgezeigt. Diese technologischen Schwachstellen gilt es mittels F&E Tätigkeiten mittel- und langfristig für eine nächste Generation von solarthermischen Kühlanlagen zu lösen.

Die ausgewählten Demonstrationsgebäude sind alle Büro- und Betriebsgebäude, wobei fünf Neubauten sind (ENERGYbase, BH-Rohrbach, Fa. Sunmaster, Fa. Gasokol, Rathaus Gleisdorf) und daher die solarthermische Kühlung in den übrigen sechs Büro- und Betriebsgebäuden (MA 34, Fa. Kreuzroither, Feistritzwerke, Fa. SOLID, Fa. Bachler, Bankgebäude Lissabon) nachträglich in die Energieversorgung eingebunden wurde. Auch diese Einbindungsstrategien in bestehende Energieversorgungen wurden anhand dieses Forschungsprojektes evaluiert und die Erkenntnisse daraus dokumentiert.

- Überleitung innovativer Technologien und Produkte zur Serien- bzw. industriellen Fertigung

Für Hersteller von Einzelkomponenten solarthermischer Kühlanlagen geben diese Ergebnisse Aufschluss über das derzeitige Betriebsverhalten der einzelnen Anlagenteile sowohl anhand der gemessenen Daten als auch die erzielbaren Werte laut Simulation. Diese Analysen geben maßgebliche Hinweise über weiteren Entwicklungsbedarf an den einzelnen Komponenten und deren Einbindung in Gesamtsysteme.

Dies gilt hauptsächlich für Hersteller von:

- Ab-/Adsorptionskältemaschinen
- Sorptionsräder
- Solarthermische Kollektoren
- Rückkühlwerke
- Regelungstechnik

Damit soll erreicht werden, dass sich die derzeitig entwickelten Komponenten von einer Einzelfertigung pro Anlage zu einem Produktportfolio mit gut für solarthermische Kühlung abgestimmten Komponententeilen (z.B. adaptierte Rückkühlung in Ab-/Adsorptionskältemaschinen, integrierte Regelungsstrategien usw.) entwickeln.

Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, Produktpakete zu entwickeln wie z. B.: Ab-/Adsorptionskältemaschine + Rückkühlkonzept + solarthermische Einbindung, da die derzeitige Vielfalt an Technologiekombinationen die haustechnische Planung sehr aufwändig und damit teuer macht.

- Initiierung von Demonstrationsprojekten (Gebäuden, Siedlungen, Netzen...), um die Sichtbarkeit von neuen Technologien und Konzepten zu gewährleisten

Für die gesamte Baubranche bieten die Ergebnisse dieses Projektes einen ersten fundierten Realitätscheck von derzeitigen solarthermischen Kühlanlagen im Gebäudebereich für Österreich. Es wurden dadurch gut evaluierte Referenzanlagen geschaffen, die Vertrauen und eine Qualitätssicherung für diese Technologie schafft und somit andere Bauträger, Planer usw. dazu ermuntern solarthermische Kühlung einzusetzen. Das Produkt „Solarthermische Kühlung aus Österreich“ soll mittel- und langfristig so wie das solarthermische Heizen von österreichischen Know-how-Trägern national und international vermarktet werden. Ein Beispiel dafür ist die Anlage in Lissabon von der Firma SOLID mit den Verantwortlichkeiten für Planung, Errichtung, Ausführungsüberwachung und Fernmonitoring.

- Unterstützung der internationalen Vernetzung der österreichischen KompetenzträgerInnen, Verstärkung des internationalen Know-how-Transfers sowie Aufbau von Humanressourcen und Integration vorhandenen Wissens in entsprechende Ausbildungen

Durch die Beteiligung am IEA SHC Task 38 wurden diese Erkenntnisse an alle wesentlichen Universitäten und Forschungseinrichtungen international in diesem Bereich weiter getragen. Dieses Projekt ist ein wichtiger Beitrag für die internationalen F&E-Aktivitäten hinsichtlich solarthermischer Kühlung.

Das erstellte Skriptum und Vortragsunterlagen geben einen profunden Überblick über den derzeitigen Stand von solarthermischen Kühlanlagen in Österreich, sowie die gewonnenen Erkenntnisse aus Monitoring und Simulation. Dadurch kann eine fundierte Verbreitung des Wissens von den beteiligten Partnern dieses Projektes zu den zukünftigen WissenschaftlerInnen, ForscherInnen und PlanerInnen geschaffen werden. Durch dieses Projekt wurde aktiv am Aufbau von Humanressourcen und Integration vorhandenen Wissens in entsprechenden Ausbildungsstätten gearbeitet.

Durch die intensive Kooperation mit internationalen Experten im Rahmen der IEA SHC Task 38 konnte auch die Möglichkeit genutzt werden, internationale Erfahrung mit dieser Technologie möglichst rasch und effizient nach Österreich zu bringen.

6 Schlussfolgerungen zu den Projektergebnissen

Die hier dargestellten Ergebnisse haben gezeigt, dass generell hochqualitative Komponenten zur solarthermischen Kühlung am Markt verfügbar sind, jedoch gravierende Mängel in der Planung, Errichtung und im Betrieb von solarthermischen Kühlanlagen auftreten. Solarthermische Kühlung ist eine Technologie, die sensibler auf Auslegungs- und Betriebsfehler reagiert als konventionelle Technologien zur Gebäudeheizung und -kühlung. Eine umfassende Qualitätssicherung vom ersten Design bis zum Anlagenbetrieb ist daher eines der wesentlichen nächsten Schritte, um die Umsetzung von hocheffizienten solarthermischen Kühlanlagen voranzutreiben.

Die Ergebnisse des Projektes werden vom Projektteam als wichtiger Ausgangspunkt für die weiteren Forschungstätigkeiten im bereits laufenden Forschungsprojekt „SolarCooling Opt – Primärenergetische Optimierung von Anlagen zur solaren Kühlung mit effizienter Anlagentechnik und innovativen Regelstrategien“ herangezogen. Weiters werden die Ergebnisse bei Lehrtätigkeiten (Fachhochschulen, Universitäre Lehrgänge) anhand des erstellten Skriptums verbreitet. In dem seit Oktober 2011 laufenden IEA SHC Task 48 „Quality assurance and support measures for Solar Cooling“ sind die Erkenntnisse aus diesem Projekt auch ein wesentlicher Ausgangspunkt. Generell werden die Projektbeteiligten die Erkenntnisse aus diesem Projekt in ihre laufenden Arbeiten mit solarthermischen Kühlanlagen (Durchführbarkeitsstudien, Planung, Simulation, Errichtung, Bauüberwachung, Monitoring und Optimierung) einfließen lassen.

Relevant sind die Ergebnisse und Erkenntnisse des Projektes weiters für alle Beteiligten eines Gebäudeplanungsprozesses (ImmobilienentwicklerInnen, ArchitektInnen, Haustechnikplanung, Facility Management), sowie Forschungs- und Ausbildungseinrichtungen im Bereich Erneuerbare Energie.

ImmobilienentwicklerInnen:

Für diese Zielgruppe ist relevant, solarthermische Kühlung in Österreich generell als Alternative für bestimmte Anwendungen in Betracht zu ziehen. Solar DEC-Anlagen haben sowohl hinsichtlich Primärenergieeinsparung als auch hinsichtlich Kosten bereits jetzt ein großes Potenzial in Österreich.

ArchitektInnen:

Beim Einsatz von solarthermischer Kühlung ist die Architekturplanung gefordert die dafür notwendigen solarthermischen Kollektoren am Gebäude (Fassade, Dach) zu integrieren. Es gibt dazu national und international Best-Practice Beispiele, jedoch gehört die Integration von Solarthermie in das Gebäudekonzept noch nicht zur gängigen Architekturplanung. Es fehlen dafür leicht handhabbare Tools in einer frühen Planungsphase.

Haustechnikplanung:

Das Thema solarthermische Kühlung ist noch nicht in der Haustechnikplanung in Österreich angekommen, sondern ist bis auf wenige Ausnahmen ein Thema in Forschungseinrichtungen und Universitäten. Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieses Projektes zeigen, dass solarthermische Kühlung mit hohen Primärenergieeinsparungen

auch in Österreich einsetzbar ist. Voraussetzung ist eine sorgfältige Planung mit einem großen Augenmerk auf energieeffizienten Komponenten.

Facility Management:

Die Ergebnisse aus dem Monitoring der solarthermischen Kühlanlagen haben viele Probleme aufgezeigt, die durch ein Fehlen eines kompetenten Facility Management oder Fehlen jeglichen Facility Managements aufgetreten sind. Hier gilt es die Erkenntnisse aus dem Projekt gezielt an diese Zielgruppe zu verbreiten.

7 Ausblick und Empfehlungen

Die Potenzialabschätzungen anhand dynamischer Simulationen haben gezeigt, dass das Optimum hinsichtlich Primärenergieeinsparung in keiner der untersuchten solaren Kühlanlagen erreicht wurde. Die daher verhältnismäßig niedrigen elektrischen COP laut Monitoringauswertung lassen sich auf ineffiziente Komponenten (Pumpen, Rückkühlung), zu komplexe Anlagentechnik, nicht optimale Auslegung der Gesamtanlage oder regelungstechnische Fehler zurückführen. Bei einer sorgfältigen Planung, Ausführung und Betriebsüberwachung sind Primärenergieeinsparungen bis zu 80%, bezogen auf konventionelle Kühltechnologien, erzielbar. Der elektrische COP sollte dabei, abhängig nach Anlagenkonfiguration, bei 6-8 liegen. Die Qualitätssicherung spielt daher zukünftig eine wichtige Rolle zur Umsetzung von effizienten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich und als Exportprodukt. Die Monitoringauswertungen und Simulationen haben gezeigt, dass solargestützte Desiccant Evaporative Cooling (DEC) Anlagen eine Sonderstellung für den österreichischen Markt einnehmen, da durch das Feuchterückgewinnungspotenzial im Winter sehr hohe Primärenergieeinsparungen im Vergleich zu Referenzanlagen mit konventionellen Technologien erzielt werden können. Hier gilt es, dieses Know-how in die Haustechnikbranche zu verbreiten, sowie leicht handhabbare Auslegungstools zur Verfügung zu stellen.

8 Verzeichnisse

Literaturverzeichnis

- [Haas, 2007] Haas et al, Wärme und Kälte aus Erneuerbaren 2030, Dachverband Energie-Klima, Wien 10/2007
- [Preisler, 2008] A. Preisler et al, EU-Projekt ROCOCO, Reduction of Costs of Solar Cooling Systems, TREN/05/FP6EN/S07.548855/020094, Brüssel, 3/2008
- [IEA, 2007] International Energy Agency (IEA), Head of Communication and Information Office, Renewables for Heating and Cooling, France, 10/2007
- [ESTTP, 2006] European Solar Thermal Technology Platform (ESTTP), Solar Thermal Vision 2030, Brussels, 05/2006
- [Mugnier, 2011] Mugnier, Daniel; Motta, Mario; Henning, Hans-Martin; Nunez, Thomas; White, Stephen; Jakob, Uli: "Quality assurance and support measures for solar cooling – Task 48 description and work plan"; Oktober 2011; <http://www.iea-shc.org/task48/documents/Work-Plan-TASK48-Solar-Cooling.pdf>; Online am 13.01.2012
- [SCOpt] SolarCoolingOpt, NE-IF: SolarCoolingOpt – Primärenergetische Optimierung von Anlagen zur solaren Kühlung mit effizienter Anlagentechnik und innovativen Regelstrategien, Neue Energien 2020 Projekt, Nr. 825544
- [Sparber 2009] W. Sparber, A. Thuer, W. Streicher, H.-M. Henning, F. Besana, F, (2009), Unified Monitoring Procedure and Performance Assessment for Solar Assisted Heating and Cooling Systems, IEA Task 38, Bolzano
- [Breidenbach 2010] K. Breidenbach, (2010), Der Kälteanlagenbauer, Band 2: Grundlagen der Kälteanwendung, VDE Verlag GmbH, Berlin
- [Carrier 2010] Carrier, (2010), Datenblatt Wassergekühlte Flüssigkeitskühler ohne Verflüssiger mit eingebautem Hydronikmodul, Online, www.waltermeier.com/de/media/download.html?media.id=1546, (last accessed April 24, 2012).
- [TRNSYS 17.1] TRNSYS, The Transient Energy System Simulation Tool, <http://www.trnsys.com>, (last accessed April 24, 2012).
- [Matlab] <http://www.mathworks.de/products/matlab/>, (last accessed April 24, 2012).
- [Henning 2004] Henning, H.M., Modellierung des Verhaltens von Adsorptionskältemaschinen, Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany, November 2004
- [VDI Wärmeatlas] VDI Wärmeatlas, Verein Deutscher Ingenieure VDI Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (GVC), Karlsruhe/Düsseldorf
- [Doell 2008] J. Döll, (2008), Type 209 – Version2.0, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystem, Freiburg

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau Evaluierung solarthermischer Kühlanlagen (Quelle: IEA SHC Task 38).....	13
Abbildung 2: Aufbau Referenzanlagen (konventionelle Kühlung); (Quelle: IEA Task 38) 13	
Abbildung 3: Ergebnisüberblick aller Systeme in drei Sommermonaten (Ersteller: AEE INTEC)	21
Abbildung 4: Jahresverlauf des elektrischen COP für die ENERGYbase im Vergleich zur simulierten Referenzanlage und die daraus resultierende Primärenergieeinsparung $f_{sav,shc,fossil, 2010}$ (Ersteller: AIT)	23
Abbildung 5: Auswertung elektrische COPs Kompressionskälteanlage 100 kW _{Kälte} (Ersteller: ASIC)	24
Abbildung 6: Taktendes Betriebsverhalten der AKM am 18.08.2009 (Ersteller: AEE INTEC)	25
Abbildung 7: Stationäres Betriebsverhalten der AKM am 15.07.2010 (Ersteller: AEE INTEC)	25
Abbildung 8: Kennzahlen der Kälteerzeugung durch die Absorptionskältemaschine (Ersteller: AEE INTEC)	26
Abbildung 9: Teillast-Kennlinie der Kompressionskältemaschine mit unterschiedlichen Verdichtertypen [Breidenbach 2010, S.372].....	29
Abbildung 10: Leistung der Kompressionskältemaschine bei unterschiedlichen Rückkühl- und Kaltwassertemperaturen [Carrier 2010].....	29
Abbildung 11: Elektrischer COP bei unterschiedlichen Rückkühl- und Kaltwassertemperaturen [Carrier 2010].....	30
Abbildung 12: Komponenten Referenzanlage (Ersteller: AIT)	30
Abbildung 13: links: Kühlung und Entfeuchtung rechts: Heizung und Befeuchtung (Ersteller: AIT)	31
Abbildung 14: Zusammenfassung der Ergebnisse für den mittleren elektrischen COP (Arbeitszahl) für alle simulierten Anlagen (n.b.: nicht berechnet) (Ersteller: UIBK)	39

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der im Projekt SolarCooling Monitor untersuchten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich und Lissabon (Ersteller: AEE INTEC)	17
Tabelle 2: Übersicht der im Projekt SolarCooling Monitor untersuchten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich und Lissabon (Ersteller: AEE INTEC)	18
Tabelle 3: Übersicht der im Projekt SolarCooling Monitor untersuchten solarthermischen Kühlanlagen in Österreich und Lissabon und deren 3-Monatsmittelwerte bzw. Jahresmittelwert für Anlage 1 (Ersteller: AEE INTEC)	22

Abkürzungen

AKM	Ab- bzw. Adsorptionskältemaschine
COP	hier: mittlerer Coefficient of Performance (=Arbeitszahl)
DEC	Desiccant Evaporative Cooling
IEA	International Energy Agency
KKM	Kompressionskältemaschine
LiBr	Lithium Bromid
LiCl	Lithium Chlorid