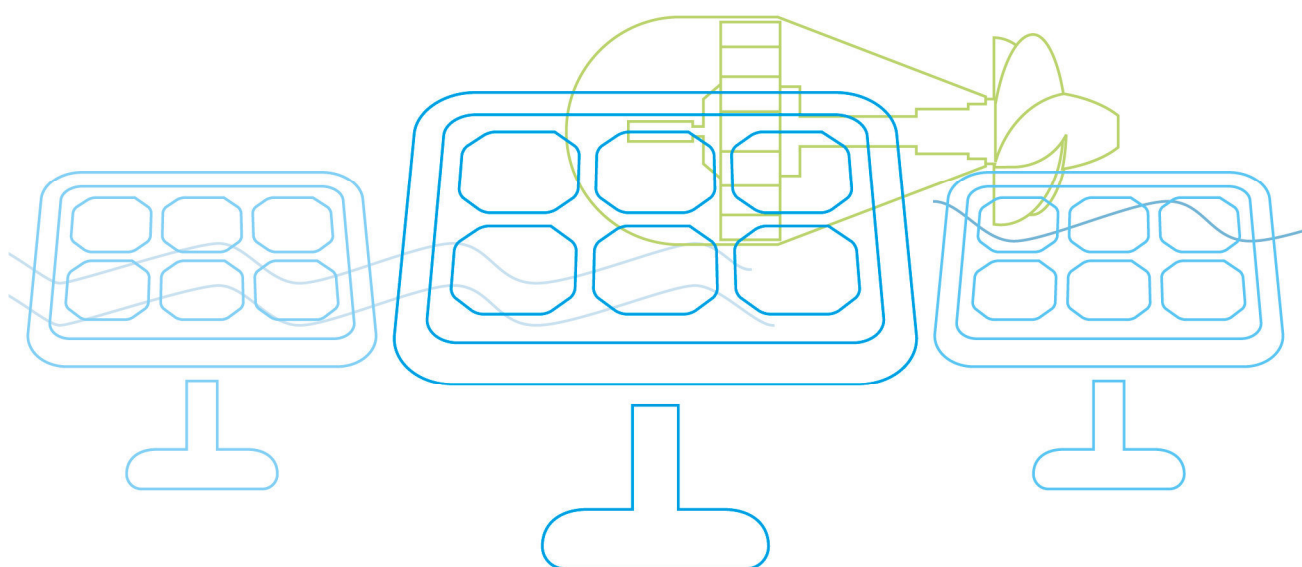




Sunsorber2

Entwicklungen zu einer effizienteren
Adsorptionskältemaschine



VORWORT

Die Publikationsreihe **BLUE GLOBE REPORT** macht die Kompetenz und Vielfalt, mit der die österreichische Industrie und Forschung für die Lösung der zentralen Zukunftsaufgaben arbeiten, sichtbar. Strategie des Klima- und Energiefonds ist, mit langfristig ausgerichteten Förderprogrammen gezielt Impulse zu setzen. Impulse, die heimischen Unternehmen und Institutionen im internationalen Wettbewerb eine ausgezeichnete Ausgangsposition verschaffen.

Jährlich stehen dem Klima- und Energiefonds bis zu 150 Mio. Euro für die Förderung von nachhaltigen Energie- und Verkehrsprojekten im Sinne des Klimaschutzes zur Verfügung. Mit diesem Geld unterstützt der Klima- und Energiefonds Ideen, Konzepte und Projekte in den Bereichen Forschung, Mobilität und Marktdurchdringung.

Mit dem **BLUE GLOBE REPORT** informiert der Klima- und Energiefonds über Projektergebnisse und unterstützt so die Anwendungen von Innovation in der Praxis. Neben technologischen Innovationen im Energie- und Verkehrsbereich werden gesellschaftliche Fragestellung und wissenschaftliche Grundlagen für politische Planungsprozesse präsentiert. Der **BLUE GLOBE REPORT** wird der interessierten Öffentlichkeit über die Homepage www.klimafonds.gv.at zugänglich gemacht und lädt zur kritischen Diskussion ein.

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Neue Energien 2020“. Mit diesem Programm verfolgt der Klima- und Energiefonds das Ziel, durch Innovationen und technischen Fortschritt den Übergang zu einem nachhaltigen Energiesystem voranzutreiben.

Wer die nachhaltige Zukunft mitgestalten will, ist bei uns richtig: Der Klima- und Energiefonds fördert innovative Lösungen für die Zukunft!

A handwritten signature in black ink, reading 'Theresia Vogel'.

Theresia Vogel
Geschäftsführerin, Klima- und Energiefonds

A handwritten signature in black ink, reading 'Ingmar Höbarth'.

Ingmar Höbarth
Geschäftsführer, Klima- und Energiefonds

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	2
Abstract	4
1 Einleitung	5
1.1 Aufgabenstellung	5
1.2 Schwerpunkte des Projektes	7
1.3 Einordnung in das Programm	8
1.4 Verwendete Methoden	8
2 Inhaltliche Darstellung	10
2.1 Recherche	10
2.2 Projektmanagement	10
2.3 Sorptionsmaterialien	10
2.4 Verdampfer	11
2.5 Interner Wärmetauscher	11
2.6 Ad-/Desorberpaket	11
2.7 Regelkonzept	12
2.8 Mehrstufiger Adsorptionsprozess	12
2.9 Klappen	12
2.10 Systemintegration	12
2.11 Prozesssimulation	13
3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen	14
3.1 Recherche	14
3.2 Projektmanagement	15
3.3 Sorptionsmaterialien	15
3.4 Verdampfer	16
3.5 Interner Wärmetauscher	17
3.6 Ad-/Desorberpaket	18
3.7 Regelkonzept	19
3.8 Mehrstufiger Adsorptionsprozess	21
3.9 Klappen	22
3.10 Systemintegration	23
3.11 Prozesssimulation	24
4 Ausblick und Empfehlungen	32
5 Literaturverzeichnis	33
6 Anhang	36
6.1 Publikationen aus dem vorliegenden Projekt	36

Kurzfassung

Steigender Kühlenergiebedarf in Gebäuden (erhöhte Komfortbedürfnisse, extremere Wetterphänomene, transparentere Architektur) führt zu einem erhöhten Einbau und Betrieb von Kältemaschinen kleiner Leistung. Die dabei meist eingesetzten Splitgeräte sind Kompressionskältemaschinen, die mit elektrischem Strom angetrieben werden. Aufgrund des alljährlich steigenden elektrischen Energiebedarfs sowie der teilweise verminderten Leistungsfähigkeit von Kraftwerken in Hitzeperioden kann es in Zukunft vermehrt zu Engpässen in der elektrischen Versorgung kommen.

Durch den Einsatz von wärmebetriebenen Kältemaschinen kann ein Beitrag zur Deckung des zusätzlichen Kühlbedarfs geleistet werden, ohne den elektrischen Energiebedarf ansteigen zu lassen. Als Wärmequelle können Sonnenkollektoren (Solares Kühlen), Fernwärme oder Niedertemperaturabwärmen eingesetzt werden. Besonders wirtschaftlich und nachhaltig ist der Betrieb bei der Nutzung von überschüssiger Abwärme.

Adsorptionskältemaschinen kleiner Leistung weisen einen großen Optimierungsbedarf auf, weil die Entwicklung derzeit nicht sehr weit über den Stand einer manuellen Serienproduktion hinaus gediehen ist. Das Konsortium entwickelt sämtliche Einzelkomponenten des Gesamtprozesses an einem Prototyp seit 2004. Die Verbesserungen an den folgenden Schlüsselkomponenten des Sunsorbers ermöglichen in Zukunft die Produktion einer Adsorptionskältemaschine, die effizienter, kleiner und damit kostengünstiger ist als sämtliche bisher bekannte Typen von Adsorptionskältemaschinen.

- Sorptionsmaterialien: Aufnahme von Sorptionskurven, Entwicklung von verschiedenen Ad/Desorbertypen
- Verdampfer: industrielle Forschung an verschiedenen Verdampfertypen
- Interner Wärmetausch: theoretische und praktische Untersuchungen zur Auswahl des optimalen Umschaltvorganges für spezielle Wärmetauschertypen
- Ad-/Desorberpaket: ausgedehnte Versuchsserien, Auswertung und Synchronisation mit den Ergebnissen aus der Simulation
- Regelkonzept: Identifikation der kritischen Parameter und Regelgrößen
- Klappen: Auswahl des beständigsten Materials, Langzeitversuche
- Prozesssimulation: Entwicklung eines detaillierten Modells des gesamten Prozesses

Dabei wurden erhebliche Verbesserungen zu bereits bestehenden Patenten mitentwickelt, welche zu Schutzrechanmeldungen führen werden.

Weiters wurde die Systemintegration und die Varianten zur Backupversorgung des Sunsorbers entwickelt, sowie der Einsatz eines mehrstufigen Adsorptionsprozesses untersucht.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen von einer Diplomarbeit und eines Symposiums der breiten Öffentlichkeit vorgestellt, um dieser richtungsweisenden Technologie zum Durchbruch zu verhelfen.

Zusätzlicher Forschungsbedarf besteht noch zur Systemintegration (vor allem mit Speicherung der Wärme- und Antriebsenergie) und der damit verbundenen Erhöhung des COP, sowie der Erhöhung der Serienreife des Sunsorbers.

Abstract

The rising demand for cooling in buildings (higher comfort demands, more extreme weather conditions, more transparent architecture) leads to a rising number of low capacity chillers in detached and semidetached houses as well as small office buildings. These split units are powered by compression chillers driven by electricity. The demand for electricity rises every year and the capacity of power stations decreases partly in times of heat-waves. This could lead to increased supply shortfalls of electrical power supply in the future.

Heat-driven chillers could make a contribution to cover the additional cooling demand without a rise of the electrical energy demand in contrast to compression chillers. Heat sources can be solar panels (solar cooling), district heating. Most economical and sustainable is the utilization of up to now unused low temperature waste heat.

Currently available adsorption cooling devices show a high need for optimisation, since the state-of-the-art of these devices is not much above the level of small scale hand series production. The present consortium is developing all single units of the entire process since 2004. The improvements on the following key units of the Sunsorber make the production of an adsorption cooling device possible, which is smaller, more efficient and thus less expensive as any currently available adsorption cooling device at the market.

- materials of adsorption: affiliation of adsorption curves, development of different Ad/Desorption units
- evaporator: applied research in order to design the most promising evaporator
- internal heat exchanger: theoretical and practical investigations in order to identify the most optimized heat exchange between switching the cycles for different heat exchanger types
- Ad/Desorber: extended metering campaigns, evaluation, synchronization of these results with the results from the simulation.
- Control concept: identification of the critical parameters
- Flaps: Identification of the most durable material, long term tests
- Process modeling: development of a detailed process simulation tool

As a result significant improvements of existing patents in this field have been developed, which will lead to applications for patents within the follow up projects.

Several other details, like the implementation into surrounding systems, the redundancy of the heat supply as well as the utilization of a multi stage adsorption process has been taken into account.

The system has been published to the public via a diploma thesis as well as at a symposium at Güssing in order to enable the breakthrough of this trend-setting technology.

Additional R&D is required in terms of system implementation with regard to storage facilities for the cooling energy and thermal power supply in order to increase the COP of the entire process. Another applied research will be necessary to increase the level of readiness for mass production of the sunsorber.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Raumklimatisierung im kleinen Leistungsbereich wird heute hauptsächlich mit Splitgeräten oder Multisplitgeräten (Kompressionskältemaschinen) ausgeführt. Dabei befindet sich der Verdampferteil des Kälteaggregats im abzukühlenden Raum, in der Außeneinheit sind Kompressor und Kondensator untergebracht. Der Raum wird gekühlt, in dem die Raumluft mit Hilfe von Ventilatoren über den Verdampfer geführt wird, wo eine Abkühlung (und teilweise Entfeuchtung) stattfindet. Der Kompressor in der Außeneinheit wird mit elektrischem Strom angetrieben.

In Adsorptionskältemaschinen wird Kälte in Form von Kaltwasser bereitgestellt. Der Kälteeintrag in den Raum erfolgt am besten mit Hilfe von bereits vorhandenen Flächenheizsystemen wie Wand- und Fußbodenheizflächen, wodurch eine angenehme Klimatisierung des Raumes ohne Zugerscheinungen, partielle Kaltluftzonen und ähnliche Phänomene erfolgen kann. Falls die Möglichkeit einer Kühlung über Flächensysteme nicht möglich ist, kann die Wärmeenergie auch mit Hilfe von Fan-Coils (kaltwasserbetriebene Luftkühlregister) aus dem zu klimatisierenden Raum abgeführt werden. Als Antriebsenergie für den Kälteprozess wird jedoch nicht elektrischer Strom, sondern Warmwasser eingesetzt. Deswegen ist mit Hilfe von Adsorptionskältemaschinen auch eine Verminderung des Spitzenstrombedarfs in der warmen Jahreszeit möglich.

Zusammenfassend können folgende Verbesserungen zu bestehenden Lösungen dargestellt werden:

- Kältemittel Wasser: kein Ozonzerstörungs- und Treibhauspotential
- Einsatz von Niedertemperatur(ab)wärme als Antriebsenergie
- Verminderung des Spitzenstrombedarfs in den Sommermonaten

Adsorptionskältemaschinen großer Leistung (Kälteleistung > 50 kW) sind schon seit mehreren Jahren auf dem Markt erhältlich. Im kleinen Leistungsbereich (für Ein- und Zweifamilienhäuser und kleine Bürogebäude) gibt es nach Recherche des Autors in Europa nur zwei Hersteller, die gerade damit beginnen, sich auf dem Markt zu positionieren. Das vorliegende Projekt beschäftigt sich mit den vielen Optimierungspotentialen, die zur Fortentwicklung dieses Stands der Technik untersucht werden müssen. Für eine bessere wirtschaftliche Darstellbarkeit von Adsorptionskältemaschinen im Vergleich zu Kompressionskältemaschinen ist diese Weiterentwicklung unbedingt notwendig.

Durch eine tiefgreifende wissenschaftliche Betrachtung der noch bestehenden Probleme können Lösungen erreicht werden, die den jetzigen Stand der Technik deutlich verbessern. Dadurch kann die Technologie so weit optimiert werden, dass ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung wirtschaftliche Darstellbarkeit im Vergleich mit Kompressionskälteanlagen gegeben ist.

Führt man sich die prognostizierten Absatzzahlen von über 6 Millionen Klimasplitgeräten für das Jahr 2008 in Europa vor Augen, wird deutlich, welche Auswirkungen die Verbreitung dieser zu entwickelnden Technologie haben kann. Der kritische hohe Spitzenlaststrom während Hitzeperioden (Mittagszeit) wird verringert und entlastet so das Stromnetz, bzw. vermindert den Bedarf nach Kraftwerken zur Spitzenlastabdeckung während den Sommermonaten.

Bei jeder herkömmlichen Kompressionskältemaschine wird der Verdichter mit elektrischem Strom angetrieben. Adsorptionskältemaschinen verwenden Warmwasser mit einem Temperaturniveau zwischen ca. 60 und 100 °C als Antriebsenergiequelle. Das niedrigere mögliche Antriebstemperaturniveau von Adsorptionskältemaschinen macht im Gegensatz zu Absorptionskältemaschinen diese Technologie für die Nutzung von Niedertemperaturabwärmen mit geringem Exergiegehalt interessant.

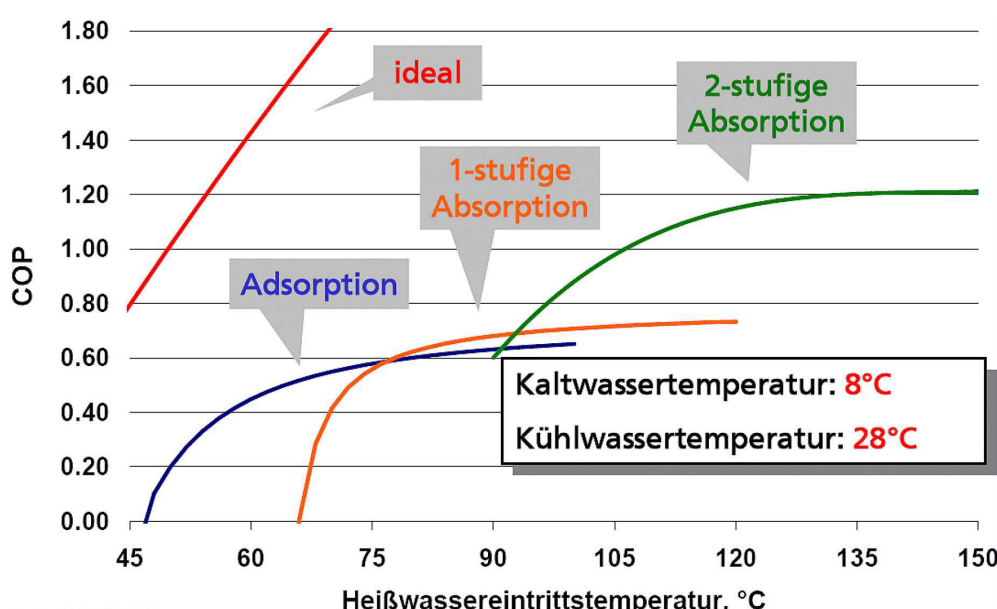


Abbildung 1: Vergleich COP von Absorptions- und Adsorptionskältemaschine zu Carnot-Prozess
(Quelle: Schäfer V.: Kälte aus Wärme, CARMEN Fachgespräche, 13.10.2008)

Aus diesem Grund sind Adsorptionskältemaschinen auch besonders gut dazu geeignet, Wärmequellen mit niedrigem Temperaturniveau wie Fernwärme im Sommer sowie Sonnenenergie aus Flachkollektoren zu nutzen.

Der Anfall von Kühllast im Sommer deckt sich in der Regel zeitlich relativ gut mit dem Angebot an Sonnenenergie, wodurch der Antrieb der Kältemaschine zur Klimatisierung sehr gut mit Warmwasser aus Sonnenkollektoren bewerkstelligt werden kann. Bereits bestehende Solaranlagen, die zur Warmwasserbereitung eingesetzt werden, liefern in den Sommermonaten einen beträchtlichen Anteil an Überschussenergie, da deren Auslegung für die Deckung des Warmwasserbedarfs auch im Frühjahr und im Herbst erfolgt. Dieses Potential an Sonnenenergie, das bis jetzt zwar zur Verfügung steht, aber nicht genutzt wird, kann einen Teil der Antriebsenergie der Adsorptionskältemaschine darstellen.

Ein in Zukunft immer wichtigeres Thema wird die hohe Belastung des Stromverteilnetzes in besonders heißen Perioden werden, wie es bei der Hitzewelle im Sommer 2003 der Fall war. Wie aktuelle Klimastudien bestätigen ist in den nächsten Jahren ein vermehrtes Auftreten von Hitzewellen sehr wahrscheinlich. Durch erhöhten Komfortbedarf, veränderte Bauweise und höhere Lufttemperaturen steigt der Bedarf an Klimatisierungsgeräten stark an. Gleichzeitig treten in Hitzeperioden auch noch folgende Phänomene auf:

- verminderte Wasserführung von Flüssen (geringere Leistung von Laufkraftwerken, Probleme mit Rückkühlung bei Wärmekraftwerken)
- hohe Lufttemperaturen (Probleme mit Rückkühlung bei Wärmekraftwerken)
- vermindertes Windaufkommen (geringere Leistung von Windkraftwerken)

Dies führt zu einem vermehrten Bedarf und verminderten Angebot an elektrischer Energie. Mit dem Einsatz von Adsorptionskältemaschinen kann ein Beitrag zur Entschärfung dieses Problems geleistet werden.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Im Zuge des im Juli 2007 abgeschlossenen HdZ-Projektes „Solare Adsorptionskühlung von Wohn- und Bürogebäuden (SunSorber)“ wurde ein wissenschaftlicher Prototyp einer Adsorptionskältemaschine kleiner Leistung aufgebaut und über 4.000 Betriebsstunden messtechnisch untersucht.



Abbildung 2: Wissenschaftlicher Prototyp aus abgeschlossenem HdZ Projekt

Aus diesem Grund ist umfangreiches Know-How über den geschlossenen Adsorptionskälteprozess vorhanden, wodurch gleichzeitig die Probleme und Optimierungspotentiale der Anlage sehr klar und deutlich ersichtlich sind. Das Vorprojekt hat gezeigt, dass für viele Komponenten noch ein erheblicher Teil an wissenschaftlicher Forschungsarbeit geleistet werden muss, um eine solide Basis für die Optimierung zu schaffen.

Die bereits vorhandene Infrastruktur (Wissenschaftlicher Prototyp, Messeinrichtungen ...) kann in diesem Projekt weiterverwendet bzw. ausgebaut werden, wodurch ein sehr sinnvoller und kostensparender Einsatz von Fördergeldern möglich ist.

1.3 Einordnung in das Programm

3.2 Energie in Industrie und Gewerbe (unter Berücksichtigung von Green ICT)

Themenpunkt: 3.2.6 Niedertemperaturwärmenutzung

Entwicklung von Technologien und Verfahren auf niedrigem Temperaturniveau sowie die Nutzung von Niedertemperaturabwärme für Prozesse oder Raumklima („Kälte und Kraft aus Abwärme“). Der Schwerpunkt liegt auf der Erarbeitung der theoretischen und praktischen Grundlagen sowie auf der Umsetzung im Betrieb.

3.4 Fortgeschrittene Speicherkonzepte und Umwandlungstechnologien mit besonderem Augenmerk auf Schlüsseltechnologien für die Einführung von E-Mobilität

Themenpunkt: 3.4.6 Wärmepumpen/Kälteanlagen

Die Anforderungen der neuen Gebäude erfordern die verstärkte Integration der Heizungs-, Kühlungs- und Ventilationsanlagen unter Einbeziehung von Solarthermie und Wärmerückgewinnung. Hierzu werden auch Komponenten (Kompressions- und Sorptionsanlagen) für die kombinierte Erzeugung von Wärme und Kälte zu entwickeln sein.

1.4 Verwendete Methoden

Um der Technologie zum Durchbruch zu verhelfen ist es notwendig, einerseits ein technisch ausgereiftes Produkt auf den Markt zu bringen, das sicher und effizient funktioniert. Andererseits müssen die Produktionskosten für die Adsorptionskältemaschine deutlich gesenkt werden. Um beide Anforderungen erfüllen zu können, wurden umfangreiche Untersuchungen an den einzelnen Bauteilen der Maschine durchgeführt.

Bei den Untersuchungen der Sorptionsmaterialien wurde folgendes festgestellt: Silikagel, das in gut leitende Verbindung mit dem Wärmetauscher gebracht wird (durch kleben oder als Folie), ist für den Einsatz in Adsorptionskältemaschinen geeignet, kann jedoch mit der spezifischen Kälteleistung nicht mit speziell für diesen Zweck entwickelten Zeolithen mithalten. Ein Wärmetauscher, der mit diesen Zeolithen beschichtet ist, stellt die nach den gemachten Untersuchungen brauchbarste Lösung für den Ad-/Desorberwärmetauscher dar.

Bei der Untersuchung des Verdampfers hat sich die flach liegende Glattrohrspirale als der gangbarste Weg herausgestellt. Untersuchungen mit Rippenrohren zeigten keine relevanten Verbesserungen des Verdampfungsverhaltens unter den vorherrschenden Bedingungen.

Der interne Wärmetauscher konnte mit Hilfe von Messungen optimiert werden. Durch gezieltes zeitlich abgestimmtes Umschalten der Ventile kann somit mit geringem apparatetechnischen Aufwand eine Regeneration beim Umschaltvorgang erreicht werden.

Zur Optimierung des Ad-/Desorberpakets wurde zuerst die Nutzung von sorptiven Trennfolien aus der Batterieindustrie angedacht. Die detaillierte Planung und Analyse hat jedoch gezeigt, dass die Herstellung dieses Wärmetauschers zu teuer wäre. Durch den Zeolith Wärmetauscher konnte ein Bauteil gefunden werden, dessen Leistungsfähigkeit eine signifikante Verbesserung in der Entwicklung der Maschine darstellt.

Im Regelkonzept wurde die Variation der Zykluszeit für eine langfristige Leistungsregelung vorgeschlagen, wobei die Schwierigkeit sicher darin besteht, im Regelalgorithmus Prognosen über den kommenden Leistungsbedarf abzugeben.

Die Untersuchung des mehrstufigen Adsorptionsprozesses hat gezeigt, dass dies eine in der Praxis kaum wirtschaftlich umsetzbare Möglichkeit darstellt, den Wirkungsgrad der Anlage unter bestimmten Randbedingungen zu verbessern.

Bei der Optimierung der Klappen wurden verschiedene Materialien auf die in der Kältemaschine auftretenden Belastungen getestet. Dabei konnten die Klappen aus einer dünnen Silikonplatte als die für diese Anwendung beste Lösung erarbeitet werden.

Bei der Systemintegration hat sich aus Untersuchungen bereits bestehenden Anlagen gezeigt, dass der Einsatz von wärmebetriebenen Kältemaschinen selten reibungslos funktioniert. Hier muss unbedingt von den Herstellerfirmen Unterstützung bei Planung und Ausführung gegeben werden, sowie eine Überwachung der Anlagen im laufenden Betrieb (Monitoring).

Mit Hilfe der Prozesssimulation wurden die grundlegenden Funktionen der Adsorptionskältemaschine mathematisch nachgebildet, wobei eine relativ gute Übereinstimmung mit den Messdaten erzielt werden konnte. In den nächsten Schritten soll eine Weiterentwicklung dieser Simulation erfolgen, um durch Änderungen diverser Parameter Sensitivitätsanalysen durchführen zu können.

2 Inhaltliche Darstellung

2.1 Recherche

Marktrecherche

- Definition des „Stand der Technik“ durch Marktanalyse
- Optimierungspotential der am Markt verfügbaren Geräte erheben
- Potential der Serienmaschine erheben

Patentrecherche

- Bestimmung bereits patentierter Teile
- Patentierung von selbst entwickelten Technologien und Verfahren

Literaturrecherche

- Daten von Sorptionsmaterialien
- Verdampfung von Wasser bei sehr niedrigem Druck
- Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Ad-/Desorberwärmetauscher und Adsorptionsmaterial
- mehrstufigen Adsorptionsprozess
- Steuerung und Regelung bereits installierter Großanlagen

2.2 Projektmanagement

Begleitende Maßnahmen zur Führung, Koordination und Kontrolle des Projekts. Durch das Zusammenwirken von Lizenzgeber bzw. Technologieträger und Forschungseinrichtung wird einem gemeinsamen Wissensaustausch verstärkt Rechnung getragen.

2.3 Sorptionsmaterialien

Die Adsorption ist ein in der Industrie weit verbreitetes Verfahren für Gasreinigung und Gastrocknung. Durch eine weitreichende und gezielte Suche nach Adsorptionsmittel und deren Adsorptionskurven bei Herstellern sowie in der Literatur wurde eine Liste mit für den geschlossenen Adsorptionsprozess einsetzbaren Adsorptionsmitteln erstellt. Aufgrund von groben Angaben über die Adsorptionsfähigkeit, wie sie von den meisten Herstellern geliefert wurden, konnte eine Vorauswahl von geeigneten Materialien getroffen werden. Mit Hilfe einer Versuchsanlage konnte die grundsätzliche Fähigkeit der in der näheren Auswahl stehenden Sorptionsmaterialien zum Einsatz im geschlossenen Adsorptionsprozess beurteilt werden.

Aufgrund des Einsatzgebietes von Sorptionsmaterialien in der Industrie sind die von den Herstellern und Lieferanten für die am Markt erhältlichen Sorptionsmaterialien angegebenen

Sorptionskurven für eine detaillierte wissenschaftliche Untersuchung nicht geeignet. Detaillierte Sorptionskurven wurden von diversen wissenschaftlichen Einrichtungen für einige Sorptionsmaterialien aufgenommen und konnten für eine mathematische Nachbildung der Sorptionscharakteristik verwendet werden.

Für die Aufnahme von Sorptionskurven wurde eine geeignete einfache Versuchsanordnung aufgebaut und betrieben.

2.4 Verdampfer

Die Verdampfung von Wasser als Kältemittel bei Drücken im Bereich von 10 mbar_{abs} ist in der Literatur kaum beschrieben. In herkömmlichen Kältemaschinen wird Wasser als Kältemittel aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften so gut wie nicht eingesetzt. Der Verdampfungsprozess in Kompressionskältemaschinen mit herkömmlichen Kältemitteln findet bei sehr viel höherem Druck statt. Durch die fehlenden theoretischen Grundlagen ist eine Berechnung des Wärmeübergangs zur Dimensionierung des Verdampferwärmetauschers nur sehr grob möglich.

Mit Hilfe einer Versuchsanordnung konnten die am geeignetsten erscheinenden Wärmetauscherkonzepte für den Einsatz als Verdampfer in Ad- und Absorptionskältemaschinen mit dem Kältemittel Wasser untersucht werden und deren Herstellungs- und Materialaufwand, Betriebsbedingungen usw. analysiert werden. Die Erkenntnisse aus diesen Versuchen können als Basis für Konstruktion und Optimierung für alle Arten von Kälteaggregaten herangezogen werden, die mit Wasser als Arbeitsmedium betrieben werden.

2.5 Interner Wärmetauscher

Der interne Wärmetausch findet bei jedem Umschaltzyklus statt, um einen Teil der durch den alternierenden Betrieb verlorenen Energie rückgewinnen zu können. Eine Optimierung dieses Vorgangs führt zu einer Erhöhung des COP(=Coefficient of Performance) der Kältemaschine.

2.6 Ad-/Desorberpaket

Das Herzstück jeder Adsorptionskältemaschine ist das Ad-/Desorberpaket, welches aus einem Wärmetauscher besteht, der das Adsorptionsmittel je nach Anforderung erwärmt oder kühlt. Dabei ist der Wärmeübergang zwischen Wärmetauscheroberfläche und Adsorptionsmittel von entscheidender Bedeutung.

Eine Optimierung des Ad-/Desorberpakets führt zu einer Erhöhung der Leistung der Kältemaschine, was gleichbedeutend mit einer Verminderung der Baugröße der Adsorptionskältemaschine ist, wodurch die Investitionskosten verringert werden können.

2.7 Regelkonzept

Die optimale Regelung einer Adsorptionskältemaschine stellt eine sehr komplexe Aufgabe dar, da die Leistung mit mehreren Mechanismen beeinflusst werden kann. Die Entwicklung einer optimalen Regelstrategie ist somit von einem tiefgreifenden und vollständigen Verständnis der sich auf die Leistung der Kältemaschine auswirkenden Parameter abhängig. Durch eine Vertiefung des Wissens in diesem Bereich kann nicht nur die Regelung von Neuanlagen optimiert werden. Auch die Betreiber der wenigen bereits installierten Anlagen größerer Leistung können von diesen Erkenntnissen profitieren, indem der COP durch gezielte Regeleingriffe verbessert werden kann.

2.8 Mehrstufiger Adsorptionsprozess

Bei einem mehrstufigen Adsorptionsprozess werden zwei Ad-/Desorber in Serie geschaltet. Dabei wird der desorbierte Wasserdampf des ersten Ad-/Desorbers vom zweiten Ad-/Desorber adsorbiert und so der Temperatur- und Druckhub in zwei Stufen durchgeführt. Das hat den Vorteil, dass die Effizienz des gesamten Prozesses erhöht wird und die Antriebstemperaturen für den Desorptionsprozess noch geringer gewählt werden können. Aus diesem Grund muss genau bewertet werden, ob und unter welchen Bedingungen der höhere Materialaufwand und die kompliziertere Konstruktion gerechtfertigt erscheint.

2.9 Klappen

Die Klappen sollten wenn möglich selbsttätig funktionieren, einen möglichst geringen Druckverlust für die Strömung des gasförmigen Kältemittels darstellen und im geschlossenen Zustand möglichst dicht abschließen. Bei Durchströmung sollte die Klappe bereits bei geringer Druckdifferenz vollständig öffnen und in dieser Position verharren. Dies setzt eine möglichst leichte Klappe voraus.

Durch eine wissenschaftliche Grundlagenbetrachtung in Kombination mit einer optimierten Anordnung der restlichen Bauteile ist eine deutliche Verbesserung des von den Klappen verursachten Druckverlustes, des konstruktiven Aufwandes sowie des Öffen- und Schließverhaltens zu erwarten.

2.10 Systemintegration

Die vernünftige Systemintegration der Kältemaschine in die Haus- und Gebäudetechnik stellt einen wichtigen Schritt zur Erhöhung der Umsetzbarkeit von Adsorptionskältemaschinen dar. Ein Betrieb als Wärmepumpe während der Heizperiode erhöht die jährliche Nutzungsdauer der Anlage, was sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit auswirkt.

Bei der Verwendung von solaren Kühlsystemen ist es notwendig in Zeiten von vermindertem solaren Ertrag, in denen trotzdem Kühlbedarf herrscht, eine Backup-Lösung zur Verfügung zu stellen.

Bei solaren Kühlsystemen sind kurzfristige Bewölkungszustände denkbar, in denen die Sonneneinstrahlung nicht groß genug ist, um den Kühlbedarf des Gebäudes mit Hilfe der Antriebsenergie aus den Sonnenkollektoren zu decken.

Außerdem sind bei solarem Antrieb der Adsorptionskältemaschine klimatische Bedingungen an manchen Tagen denkbar, an denen hohe Lufttemperaturen herrschen, die Kollektorerträge aufgrund von Bewölkung jedoch nicht ausreichen, um die Kältemaschine mit der geforderten Kälteleistung zu betreiben.

2.11 Prozesssimulation

Die Simulation einer Adsorptionskältemaschine setzt eine sorgfältige mathematische Nachbildung des Ad- und Desorptionsprozesses voraus, wodurch die Kenntnis der Sorptionskurven notwendig ist. Daten über Sorptionskurven werden einerseits aus der Literatur übernommen, andererseits selbst gemessen. Mit Hilfe von Messungen an der realen Anlage wurde diese Prozesssimulation verifiziert.

Mit Hilfe der Prozesssimulation konnten Berechnungen wie CO₂-Einsparungen durch den Einsatz von Sorptionskältemaschinen durchgeführt werden. Auch Hochrechnungen von CO₂-Einsparungspotentialen auf Basis von ganz Österreich sind möglich.

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 Recherche

Marktrecherche

Eine Recherche der am Markt verfügbaren Ab- und Adsorptionskältemaschinen im Kälteleistungsbereich bis 20 kW wurde durchgeführt, wobei weltweit etwa 10 verschiedene Hersteller für Ab- und 3 Hersteller für Adsorptionskältemaschinen identifiziert werden konnten. Aufgrund der Rechercheergebnisse konnte jedoch nicht bei allen angebotenen Maschinen eine tatsächliche Marktreife attestiert werden.

Der bestehende Kühlbedarf in Privathaushalten ist schwierig zu erfassen, da er sehr stark von Nutzeransprüchen und –gewohnheiten abhängig ist. Kleine transportable Luftkühlgeräte sowie billige Splitklimagerate werden zur Zeit gut verkauft, jedoch ist der Absatz dieser Geräte sehr stark vom Preis abhängig.

Das europäische Zentrum für erneuerbare Energie sammelt nicht zuletzt im Rahmen von Energiekonzepten für Gemeinden und Industriebetriebe Daten über den europäischen Markt. Die Auswertung dieser und anderer Daten führten zu den Marktpotentialen, welche in diesem Bericht zusammengefasst sind.

Patentrecherche

Bei einer ausführlichen, selbst durchgeführten Patentrecherche wurde festgestellt, dass von der SorTech AG sehr viele Ausführungsvarianten für den Bau einer Adsorptionskältemaschine patentiert worden sind. Das beinhaltet sowohl die Bauweise der kompletten Maschine sowie einzelner Komponenten als auch Regelungs- sowie Verschaltungsvarianten.

Literaturrecherche

Sorptionsmaterialien wie Silikagele werden von der Industrie großtechnisch hergestellt und in vielen verschiedenen Varianten vertrieben. Es wurde jedoch festgestellt, dass es oft sehr schwierig ist, nach einer gewissen Zeit die gleichen Silikagele zu bekommen, die in der Literatur untersucht worden sind, bzw. die Angaben in der Literatur oft nicht ausreichen, um das Produkt am Markt ausfindig machen zu können.

Für eine genauere Abschätzung des Wärmeübergangs zur Auslegung des Verdampferwärmetauschers konnten bisher keine Literaturstellen gefunden werden, die sich mit der Verdampfung bei sehr niedrigen Drücken beschäftigen.

Die Verbesserung des Wärmeübergangs zwischen Ad-/Desorberwärmetauscher und Sorptionsmaterial wird in verschiedenen Literaturstellen behandelt. Dabei werden verschiedene Konzepte vorgestellt, wobei jedoch immer im Auge behalten werden muss, dass eine brauchbare Verbesserung dieses Bauteils auch fertigungstechnisch mit vernünftigem Aufwand umsetzbar sein muss. Dies scheint jedoch bei einigen Ideen nicht unbedingt der Fall zu sein.

3.2 Projektmanagement

Begleitende Maßnahmen zur Führung, Koordination und Kontrolle des Projekts. Durch das Zusammenwirken von Lizenzgeber bzw. Technologieträger und Forschungseinrichtung wurde einem gemeinsamen Wissensaustausch verstärkt Rechnung getragen.

Die Zusammenarbeit sowie der Know-How Transfer Zwischen Bioenergy2020+ und GET kann als hervorragend bezeichnet werden. Durch regen Austausch der beteiligten Sachbearbeiter, gemeinsamer elektronischer Datenbasis sowie zeitlich flexibel durchgeführten Arbeitsmeetings ist eine effiziente Zusammenarbeit gegeben, die doppelte Arbeiten vermeidet.

Ein wesentlicher Schwerpunkt wurde dabei vom europäischen Zentrum für erneuerbare Energie eingebracht. Einerseits wurde der KnowHow Transfer erleichtert und andererseits kamen effiziente Projektmanagementmethoden zum Einsatz.

Als Resultat aus all dem kann genannt werden, dass die budgetierten Kosten exakt eingehalten und geringfügige Abweichungen zeitgerecht erkannt und an die Abwicklungsstelle kommuniziert wurden.

Damit wurde einerseits die möglichst effiziente Verwendung von Fördergeldern und andererseits der Einsatz von wertvollen Fördermitteln der Projektpartner sichergestellt.

Dieses professionelle Projektmanagement hat weiters dazu geführt, dass mehr Ergebnisse nach außen kommuniziert wurden, als ursprünglich geplant waren.

Außerdem wurden Teile des Projektes ausführlicher als ursprünglich budgetiert abgehandelt, was zu einem höheren Mehrwert der Projektpartner und der eingebundenen Öffentlichkeit sowie zu einem weitaus größeren Multiplikatoreffekt führt.

Das Konsortium und vor allem der verwertende Partner Güssing Energy Technologies GmbH profitierte im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit vom breiten Netzwerk des EEE.

3.3 Sorptionsmaterialien

Silikagele werden von der Industrie in vielen verschiedenen Varianten angeboten, es ist allerdings oft schwierig, genau dasselbe Material zu bekommen, für das bereits in der Literatur Messdaten vorhanden sind. So konnten einige Literaturstellen gefunden werden, in denen die Sorptionskurven von verschiedenen Silikagelen vermessen wurden, es konnten jedoch nicht mehr die gleichen Silikagele erworben werden.

Es wurden Versuche unternommen, Messungen unter realen Bedingungen (Vakuum, Wasserdampfatosphäre) durchzuführen, doch mit den vorliegenden Budgetmitteln konnte keine Messeinrichtung gefunden werden, mit der unter realen Bedingungen reproduzierbare Daten gemessen werden konnten.

Aus diesem Grund wurde eine einfache Vorrichtung gebaut, mit deren Hilfe die Gleichgewichtszustände bei vier verschiedenen Temperaturen und vier verschiedenen Wasserdampfpartialdrücken in feuchter Luft bestimmt werden konnten.

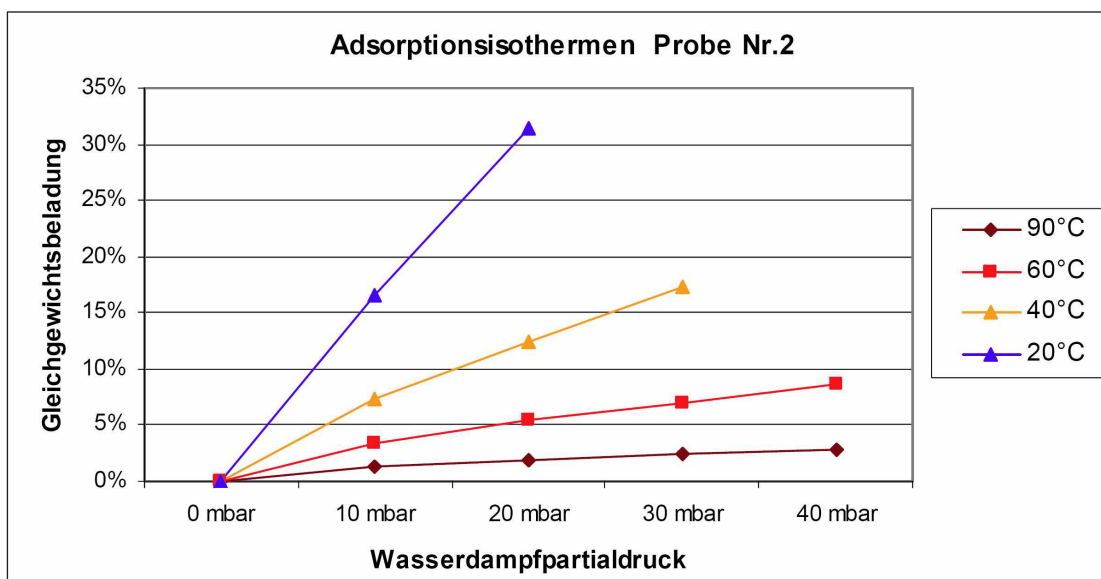


Abbildung 3: Adsorptionsisotherme



Abbildung 4: verschiedene Silikagelproben in Messröhrchen

3.4 Verdampfer

Um eine möglichst einfache und langlebige Konstruktion mit geringer Fehleranfälligkeit zu erhalten, wurde versucht, Lösungen mit möglichst wenig bewegten Teilen anzustreben, wodurch verschiedene Verdampferkonzepte ausgeschieden werden mussten. Durch die Verwendung eines überfluteten Verdampfers konnte die Forderung der möglichst einfachen Konstruktion am besten erfüllt werden, weil durch einen geschickten Aufbau des Verdampfers der Einsatz einer Pumpe mit bewegten Teilen vermieden werden kann. Da die theoretischen Berechnungen mit vielen Unsicherheiten und Abschätzungen verbunden sind, wurde ein Versuchsaufbau mit verschiedenen Arten von Verdampferrohren aufgebaut. In Versu-

chen wurde die Leistungsfähigkeit der unterschiedlichen Verdampferrohre unter verschiedenen Betriebsbedingungen bestimmt.

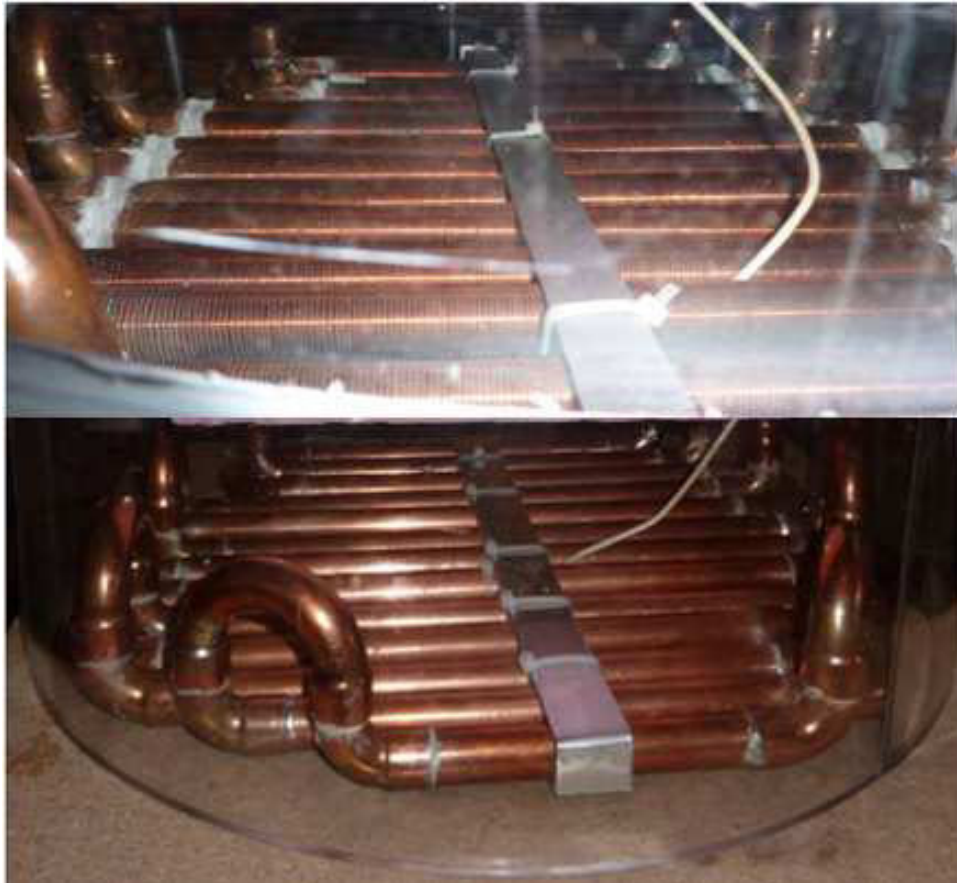


Abbildung 5: Rippenrohr- und Glattrohrverdampfer

3.5 Interner Wärmetauscher

Für die Optimierung des internen Wärmetauschers wurde ein Vergleich der Geschwindigkeit der Erwärmung und Kühlung des Adsorptionsmittels angestellt. Anhand dieses Vergleichs ist deutlich zu sehen, wie lange der interne Wärmetauschvorgang mindestens dauern muss, um den Großteil des rückgewinnbaren Energiepotentials von einem zum anderen Ad-/Desorber übertragen zu können.

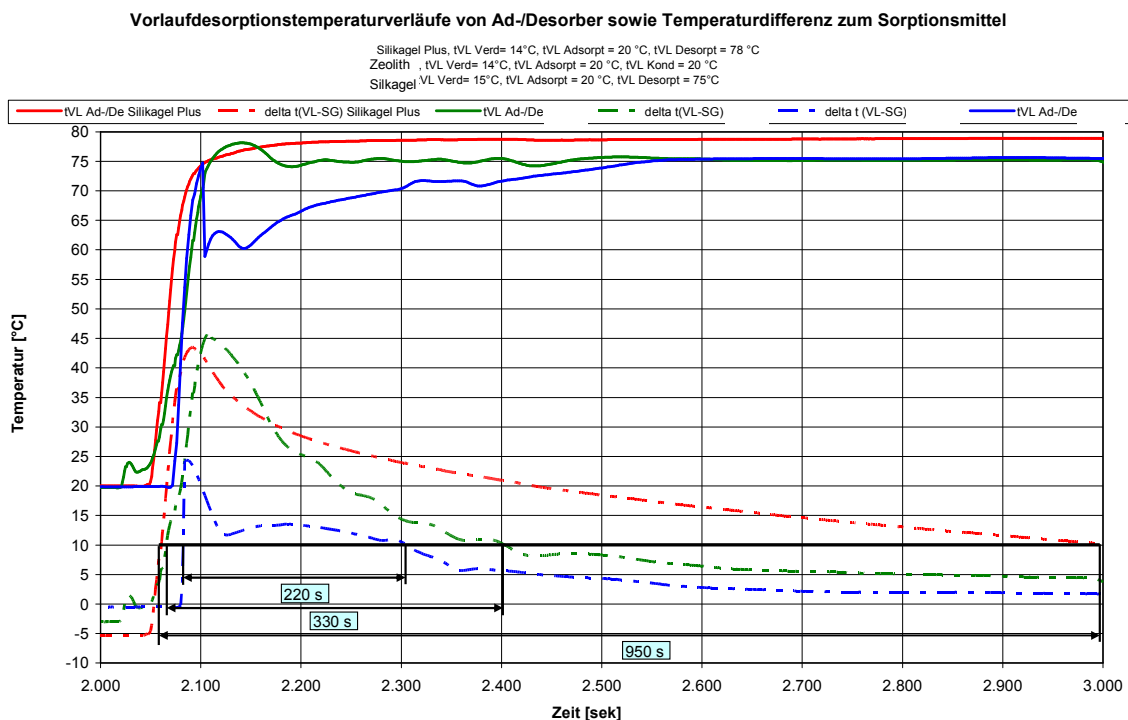


Abbildung 6: Vergleich der Zeitdauer bei Zeolithwärmetauscher, aufgeklebtem Silikagel und losem Silikagel im Lamellenrohrwärmetauscher, bis sich die Sorptionsmaterialtemperatur bis auf 10 K der Desorptionsvorlauftemperatur angepasst hat.

Abbildung 6 zeigt einen beispielhaften Vergleich von losem Silikagel Plus zwischen den Lamellen, auf die Lamellen aufgeklebtem Silikagel und dem mit Zeolith beschichteten Wärmetauscher. Dabei ist einerseits die Desorptionsvorlauftemperatur aufgetragen (durchgezogene Linie), andererseits der Temperaturunterschied zwischen Sorptionsmittel und Vorlauftemperatur (strichlierte Linie). Zur Veranschaulichung der Problematik mit dem internen Wärmetausch wurde bei einem Temperaturunterschied von 10 °C eine Linie gezogen, und die zur Erreichung notwendige Zeitdauer abgelesen. Dabei kann man sehen, dass die Aufwärmzeit beim beschichteten Zeolithen mit etwa 220 s weniger als ¼ der Zeit dauert, als beim losen Silikagel mit etwa 950 Sekunden. Gegenüber dem aufgeklebtem Silikagel kann immer noch eine Zeitersparnis von etwa 110 Sekunden erreicht werden, was den Zeolithwärmetauscher für kurze Zykluszeiten mit extrem kurzem internem Wärmetauschvorgang prädestiniert, wodurch während dessen die Kaltwasserproduktion kaum zum Erliegen kommt.

3.6 Ad-/Desorberpaket

Bei der Optimierung des Ad-/Desorberpaketes wurden zwei verschiedene Konzepte durch umfangreiche Messserien geprüft:

- Lamellenrohrwärmetauscher, mit Zeolith beschichtet
- Lamellenrohrwärmetauscher, mit Silikagel beklebt

Die Messergebnisse zeigen, dass der beschichtete Zeolithwärmetauscher aufgrund seiner besseren Wärmeübertragung, größeren Haltbarkeit und besseren Adsorptionsfähigkeiten in dem für diese Anwendung notwendigen Temperatur- und Druckbereich die bessere Lösung für eine Adsorptionskältemaschine darstellt.

Beim Vergleich eines mit Zeolith beschichteten Lamellenrohrwärmetauschers mit einem Silikagel beschichteten Lamellenrohrwärmetauscher sieht man deutlich, dass die durchschnittlichen Verdampferleistungen in etwa übereinstimmen, die durchschnittlichen Austreiberleistungen beim Silikagelwärmetauscher jedoch um etwa 50 % größer sind. Dadurch ergibt sich ein um etwa 35 % höherer COP beim Einsatz des beschichteten Zeolithwärmetauschers im Vergleich zum Silikagel Ad-/Desorber. Dadurch lässt sich feststellen, dass für den Einsatz in Adsorptionskältemaschinen der beschichtete Zeolithwärmetauscher als Ad-/Desorber deutlich besser geeignet ist, um eine konkurrenzfähige Maschine zu entwickeln.

3.7 Regelkonzept

Erste Untersuchungen im Bezug auf das Regelkonzept zeigen, dass eine Leistungsanpassung der Adsorptionskältemaschine durch verschiedene Regelgrößen möglich ist. Dabei haben sich jedoch zwei Größen als sinnvolle Regelgrößen heraus kristallisiert:

- Rückkühltemperatur
- Zykluszeit

Rückkühltemperatur

Die Rückkühltemperatur hat aufgrund folgender Tatsachen einen starken Einfluss auf die Leistung der Maschine: Der Adsorptionskälteprozess kann thermodynamisch als eine Kombination aus einem links laufenden Kälteprozess mit einem rechts laufenden Wärmekraftprozess gesehen werden. Dabei hat das Rückkühltemperaturniveau Auswirkungen auf beide (links- und rechts-laufender) Prozesse, wodurch eine Erhöhung des Rückkühltemperaturniveaus den Gesamtprozess doppelt negativ beeinflusst.

Der Rückkühlventilator stellt außerdem den größten elektrischen Energieverbraucher im Gesamtsystem dar. Deswegen kann eine Erhöhung des Rückkühltemperaturniveaus durch eine Verminderung der Rückkühlventilatorleistung zur Leistungsregelung der Adsorptionskältemaschine verwendet werden, wodurch auch elektrische Energie eingespart werden kann. Abbildung 7 illustriert deutlich, wie stark sich die Kälteleistung bei einer Erhöhung des Rückkühltemperaturniveaus von 25 auf 30 °C ändert (Leistungsverminderung ca. 45 %).

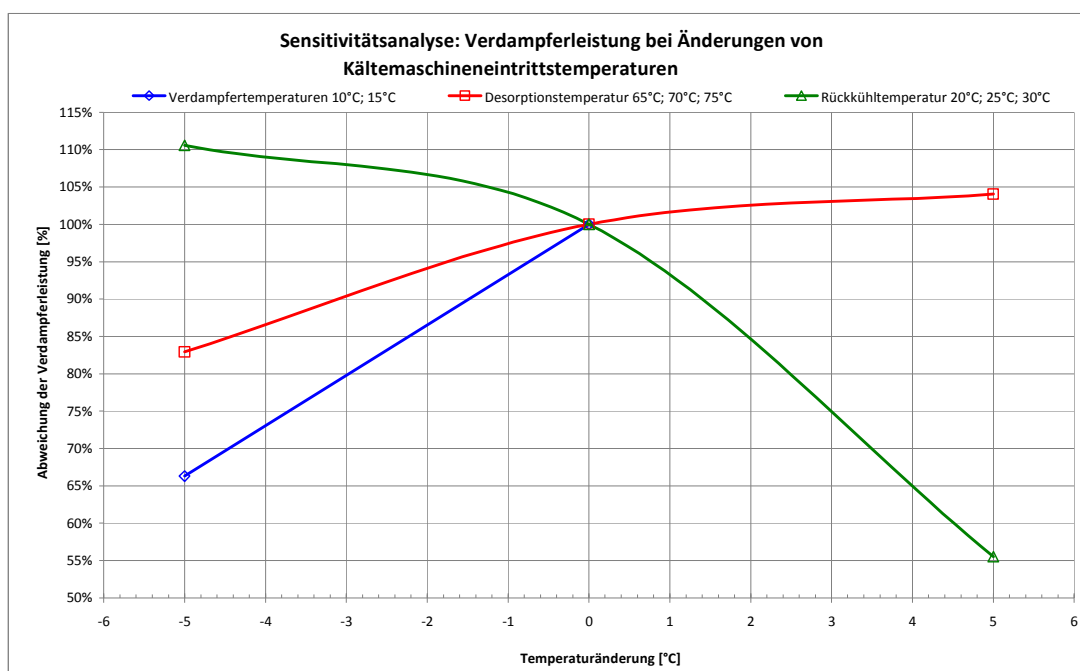


Abbildung 7: Sensitivitätsanalyse zur Änderung der Kälteleistung bei Variation der Kältemaschineneintrittstemperaturen

Zykluszeit

Unter Zykluszeit versteht man jene Zeitspanne, in der sich ein Ad-/Desorber in der Ad- oder Desorptionsphase befindet. Der gute Wärmeübergang des beschichteten Zeolithwärmehaushalters erlaubt sehr kurze Zykluszeiten, trotzdem zeigen Messungen mit Variationen der Zykluszeiten, dass bei längeren Zykluszeiten zwar die mittlere Verdampferleistung sinkt, der COP dagegen jedoch steigt (siehe Abbildung 8).

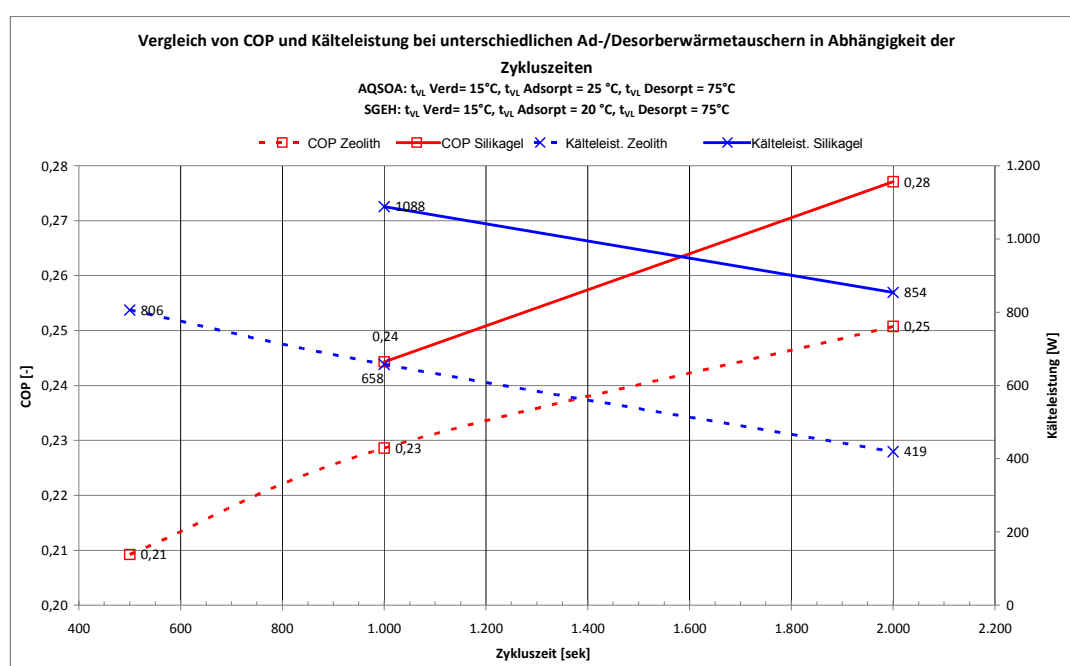


Abbildung 8: COP und Kälteleistung in Abhängigkeit der Zykluszeiten

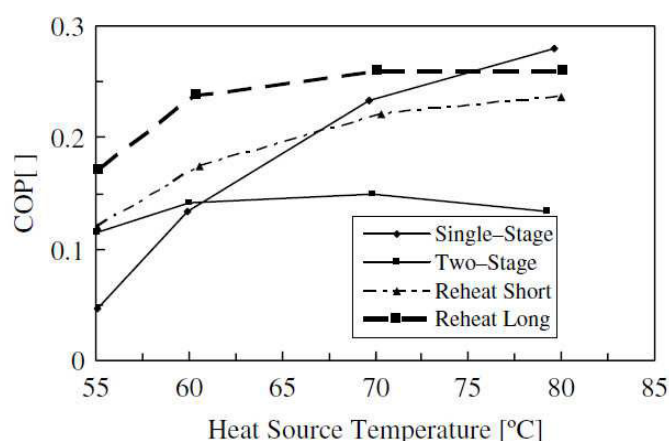


Abbildung 10: COP in Abhängigkeit von Wärmequellentemperatur und mehrstufiger Adsorption ohne und mit zwei verschiedenen langen Wärmerückgewinnungsphasen (Quelle: Alam, K.C.A. et al.: Experimental study of a low temperature heat driven re-heat two-stage adsorption chiller, Applied Thermal Engineering 27 (2007))

Deswegen wurde versucht, mit Hilfe einer groben Wirtschaftlichkeitsberechnung abzuschätzen, unter welchen Bedingungen der erhöhte apparatetechnische Aufwand einer mehrstufigen Adsorptionskältemaschine aus wirtschaftlicher Hinsicht gerechtfertigt scheint.

Die Abschätzung der Kostensituation brachte eine Erhöhung der Investitionskosten einer zweistufigen Kältemaschine von etwa 50 % gegenüber den Kosten einer einstufigen Maschine. Wie im Dühring-Diagramm in Abbildung 9 zu sehen ist, kann bei einem einstufigen Prozess der Temperaturhub von etwa 8 °C Verdampfungstemperatur bis etwa 30 °C Kondensationstemperatur nur mit einer Antriebstemperatur von etwa 78 °C realisiert werden, wenn man eine Adsorptionstemperatur von etwa 30 °C zu Grunde legt. Bei einer Aufsplittung des Temperaturhubs auf 2 Stufen ist der gleiche Prozess mit einer Antriebstemperatur von etwa 60 °C zu bewerkstelligen, bei 3 Stufen sogar mit etwa 50 °C.

Wie jedoch in Abbildung 10 zu sehen ist, muss bei niedrigen Austreibertemperaturen von einem äußerst geringen COP ausgegangen werden. Somit kann allgemein festgestellt werden, dass eine mehrstufige Adsorptionskältemaschine in Sonderfällen bei den richtigen Randbedingungen (Abfallwärme auf einem Temperaturniveau von etwa 60 bis 70 °C, Wärmesenke oder Rückkühlmöglichkeit bei einem Temperaturniveau von etwa 30 °C sowie Kühlbedarf bei einem Temperaturniveau von etwa 10 °C) sinnvoll eingesetzt werden kann, aber nicht unbedingt zur Verbesserung einer klassischen Adsorptionskältemaschine, was Ziel des vorliegenden Projektes ist, beiträgt.

3.9 Klappen

Nach erfolgreicher Auswahl einer in technischer sowie wirtschaftlicher Hinsicht umsetzbaren Klappenlösung und Auswahl des geeigneten Klappenmaterials wurde bei einem Langzeitversuch geprüft, wie sich die Flexibilität des Materials durch ständiges bespritzen mit Wasser und den dadurch entstehenden Ablagerungen verändert. Dabei konnte festgestellt werden,

dass die Klappe aus dem gewählten Silikonmaterial auch noch nach deutlichen Ablagerungen, wie sie in Abbildung 11 zu sehen sind, dicht abschließt.



Abbildung 11: Silikonklappe nach Langzeitsprühversuch mit Ablagerungen

Versuche mit anderen Materialien haben gezeigt, dass es zu einer Verhärtung der Klappe kommt, die ein Dichtschließen nach längerer Zeit verhindert. Dies ist insofern von Bedeutung, da die gesamte Maschine verschleißt wird, und keine Möglichkeit besteht, die Klappen bei Wartungen auszutauschen.

3.10 Systemintegration

Der hauptsächliche Einsatzort einer Adsorptionskältemaschine kleiner Leistung ist das Ein- bzw. Zweifamilienhaus sowie kleine Bürogebäude. Das System wurde für diese Leistungsgröße entwickelt.

Wärmepumpenanwendung

Die optimale Betriebsweise bevorzugt ein Flächenheiz- bzw. -kühlsystem, bei dem mit höherem Temperaturniveau die notwendige Kühlleistung in die zu kühlenden Räume eingebracht werden kann. Ein Flächensystem ist auch Voraussetzung dafür, dass die Kältemaschine als Wärmepumpe verwendet werden kann. Die Auskopplung von Energie auf dem Kondensations- bzw. Adsorptionstemperaturniveau begrenzt die möglichen Vorlauftemperaturen auf etwa 40 °C.

Für die Niedertemperaturwärmequelle gelten folgende Einschränkungen: Es muss sichergestellt sein, dass das Temperaturniveau der Wärmequelle über 5 °C liegt, da in der Kältemaschine Wasser als Kältemittel eingesetzt wird. Der hohe Temperaturhub zwischen Wärmequellentemperaturniveau und Wärmesenkentemperaturniveau bedingt ein hohes Desorptionstemperaturniveau von mind. 70 bis 75 °C. Dadurch muss ein konventionelles Wärmequellensystem vorhanden sein, dass nicht auf Niedertemperaturanwendung optimiert ist (wie z.B. thermische Kollektoren zur Heizungsunterstützung, wassergeführte Kachelöfen...).

Der zu erwartende Mehrertrag für die Adsorptionskältemaschine als Wärmepumpe liegt in etwa bei 30 bis 50 % der eingesetzten Desorptionsenergie.

Wenn all diese Faktoren in Betracht gezogen werden, liegt der Schluss nahe, dass die Wärmepumpenanwendung der Adsorptionskältemaschine nur in Ausnahmefällen als sinnvoll erachtet werden kann.

Backupsystem

Bei Ein- bzw. Zweifamilienhäusern sowie kleinen Bürogebäuden ist bei vernünftiger Bauweise der spezifische Kühlenergiebedarf relativ gering. Meist ist die Spezifikation der Lufttemperatur und Feuchte, die eingehalten werden muss, auch nicht so eng gesetzt wie bei industriellen Prozessen, wo eine Überschreitung Produktionsausfälle oder ähnliche Probleme nach sich zieht. Bei diesen kleinen Anlagen ist es meist aus finanziellen Gründen nicht möglich, wie bei größeren Anlagen die wärmebetriebene Kältemaschine zur Grundlastdeckung zu verwenden, während die Leistungsspitzen von Kompressionskältemaschinen abgedeckt wird.

Wenn geeignete Abwärme als Antriebsenergie benutzt wird, steht diese meist in mehr oder weniger konstanter Menge und Qualität zur Verfügung. Das Backupsystem wird also meist bei solaren Kühlsystemen benötigt. Wie schon bei der Untersuchung der Wärmepumpenanwendung beschrieben, ist ein konventionelles Wärmebereitstellungssystem für die Deckung der Heizlast im Winter erforderlich. Um die Investitionskosten für das solare Klimatisierungssystem nicht noch weiter ansteigen zu lassen, muss dieses bereits vorhandene bzw. sowie so notwendige Wärmeversorgungssystem für die Bereitstellung der Desorptionsenergie im Backupfall verwendet werden.

3.11 Prozesssimulation

Die Simulation der Prozesse beruht auf Bilanzgleichungen für Temperaturen, Wärmemengen und Stoffströme, wobei einige Vereinfachungen der realen Gegebenheiten gemacht werden. Man erhält so einen Satz von gewöhnlichen Differenzialgleichungen.

Der Nachteil dieses Vorgehens ist, dass manche Aspekte (wie etwa Temperaturgradienten innerhalb eines Bauteils) nicht berücksichtigt werden können. Der große Vorteil ist aber, dass man auf diesem Weg eine sehr allgemeine Beschreibung der relevanten Vorgänge erhält, die man durch Anpassung weniger Parameter auch auf analoge Maschinen anderer Bauart umlegen kann. Zudem ist die Laufzeit der Simulation kurz (auf einem aktuellen PC etwa 10-15 Sekunden für einen vollen Zyklus mit ca. 50 Minuten Echtzeitdauer). Das erlaubt es beispielsweise, unbekannte Parameter durch Anpassung an die Messdaten mittels Optimierungsalgorithmen (die wiederholte Simulationsläufe erfordern) zu bestimmen.

Wie sich im direkten Vergleich zeigt, ist die Beschreibung der meisten Messdaten schon mit der Anpassung weniger Parameter (wie Wärmeverlusten an die Umgebung und Korrekturen der internen Wärmeleitzahlen) sehr gut. Das ist ein deutliches Zeichen, dass die wesentlichsten Prozesse erfasst wurden, und auch mit einem vergleichsweise einfachen Bilanzmodell nicht nur eine qualitative, sondern für viele Größen auch eine quantitative Beschreibung der real ablaufenden Vorgänge möglich ist.

Prinzipieller Aufbau des Modells

Die Umsetzung des Modells erfolgt in Form von drei Simulink™-Modellen sowie einem umfassenden Matlab™-Programm, das das Zusammenspiel der Modelle regelt und einige Funktionen für Vergleich und weitere Analyse von Mess- und Simulationsdaten bereitstellt. Das Ineinandergreifen der einzelnen Modellelemente ist in Abb. 12 dargestellt, die Benutzeroberfläche des Programms wird in Abb. 13 gezeigt.

Das erste Modell beschreibt Verdampfer und Adsorber, das zweite Desorber und Kondensator. Diese beiden Modelle können unabhängig voneinander ausgeführt werden; beide zusammen liefern die Daten für einen Arbeitszyklus. Das dritte Modell beschreibt den Umschaltprozess: Dabei werden Ad- und Desorber hydraulisch gekoppelt, während Verdampfer und Kondensator von den anderen Elementen isoliert werden.

Die drei Modelle können sequentiell so ausgeführt werden, dass jeweils die Startwerte des neuen Durchlaufs aus den Endwerten der vorangegangenen Simulation ermittelt werden können. Nur für die erste Ad-/Desorbersimulation sind Startwerte aus den Messdaten bzw. initial guesses (etwa für die Beladung des Adsorbers) notwendig. Die einzigen benötigten Eingangsdaten sind die Vorlauftemperaturen während des Arbeitszyklus sowie die (gemittelten) Wassermassen, d.h. der Durchfluss.

Nach einer kurzen Diskussion der theoretischen Grundlagen werden die einzelnen Modelle genauer beschrieben. Dabei spiegelt die Farbe der Blöcke weitgehend das effektive Temperaturniveau wider. Das tiefste Temperaturniveau (jenes des Nutzkaltwassers) wird in Hellblau dargestellt, das mittlere Niveau (Umgebung und Kühlwasser) in Grün und das hohe Niveau (Heißwasser) in Orange. Die Übergänge zwischen hohem und mittlerem Niveau, wie sie während des Umschaltprozesses auftreten, werden in Gelb dargestellt.

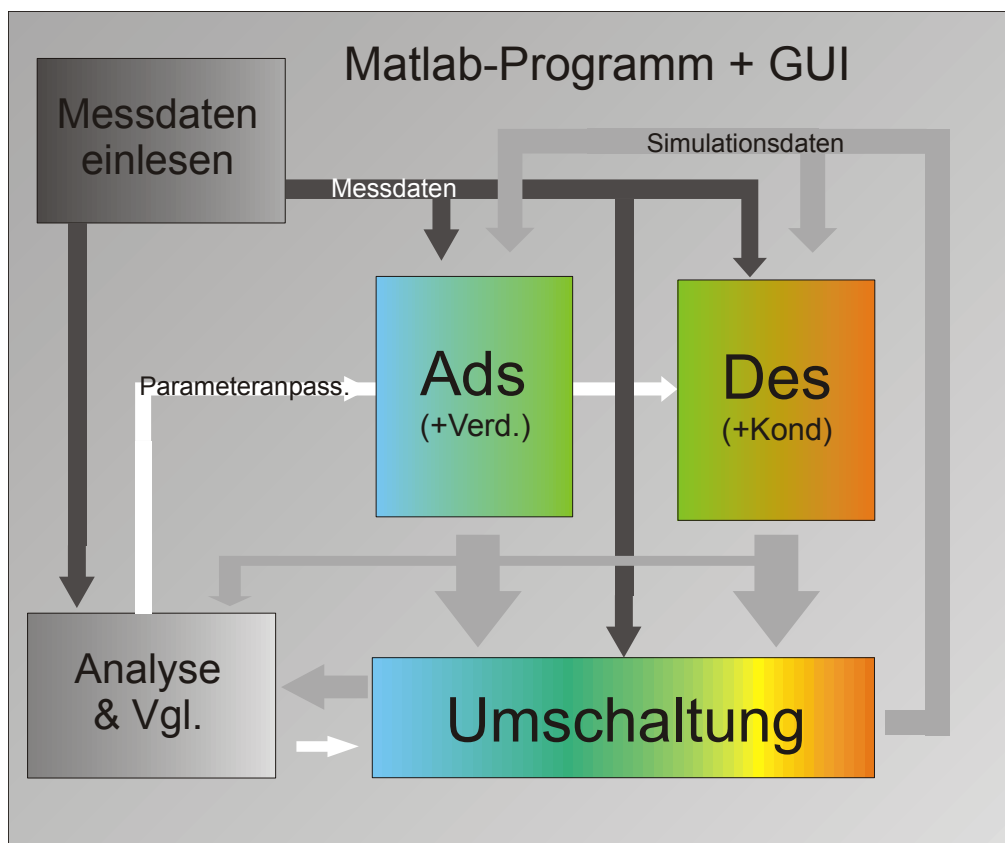


Abbildung 12: Schematischer Aufbau des Gesamtmodells

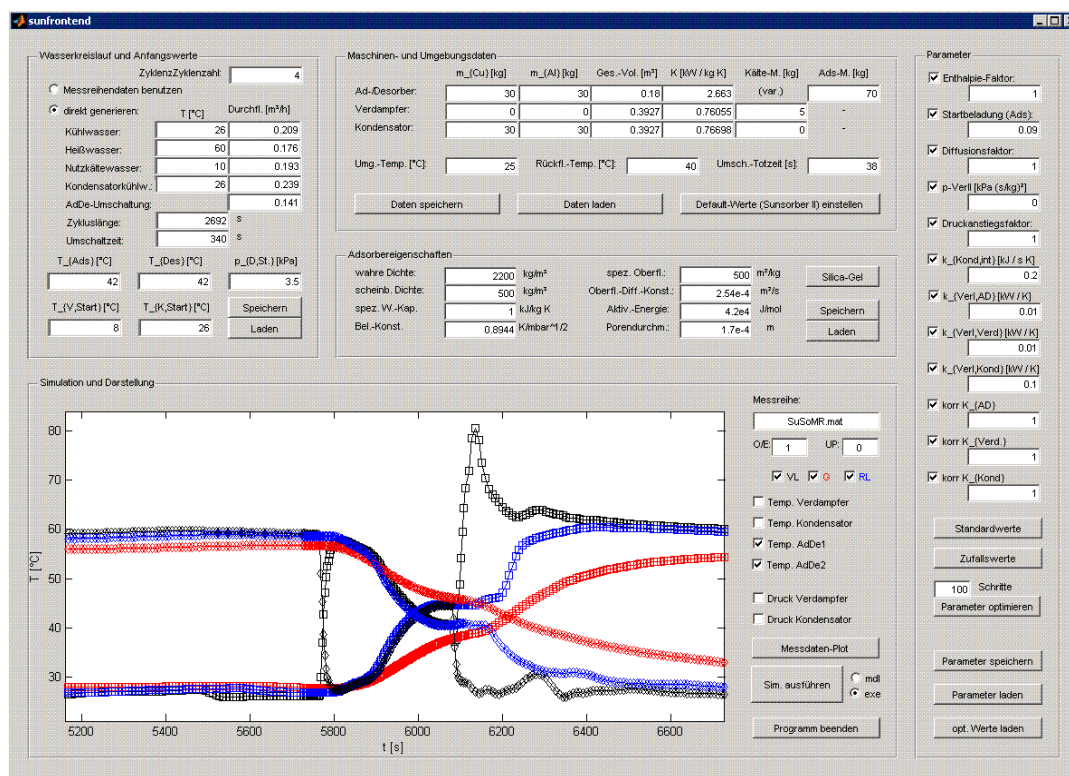


Abbildung 13: Benutzeroberfläche (Graphical User Interface, GUI) des Programms

Direkter Vergleich von Simulations- und Messdaten

In den Abbildungen 16 bis 23 werden für die wichtigsten Größen des Modells die Messdaten mit den zugehörigen Simulationsdaten verglichen. Die Vorlauftemperaturen sind nur für die Ad/Desorber und nur während der Umschaltphasen gezeigt (in Abb. 16 und 17), da sie nur in diesem Fall aus der Simulation berechnet werden. Ansonsten werden die Vorlauftemperaturen als Eingangsgrößen verwendet bzw. sind (während des Umschaltvorgangs für Verdampfer und Kondensator) nicht relevant.

In Abbildungen 18 und 19 erkennt man, dass für die Ad/Desorber die Übereinstimmung zwischen Messdaten und Simulationsdaten sehr gut ist. Das legt nahe, dass die wesentlichen Mechanismen im Modell richtig erfasst worden sind. (Dabei ist allerdings zu beachten, dass auch in der Parameteroptimierung die Ad- und Desorbtemperaturen am stärksten gewichtet wurden; auch hier wäre es aufschlussreich, die Robustheit der Parameter noch ausführlicher zu überprüfen.)

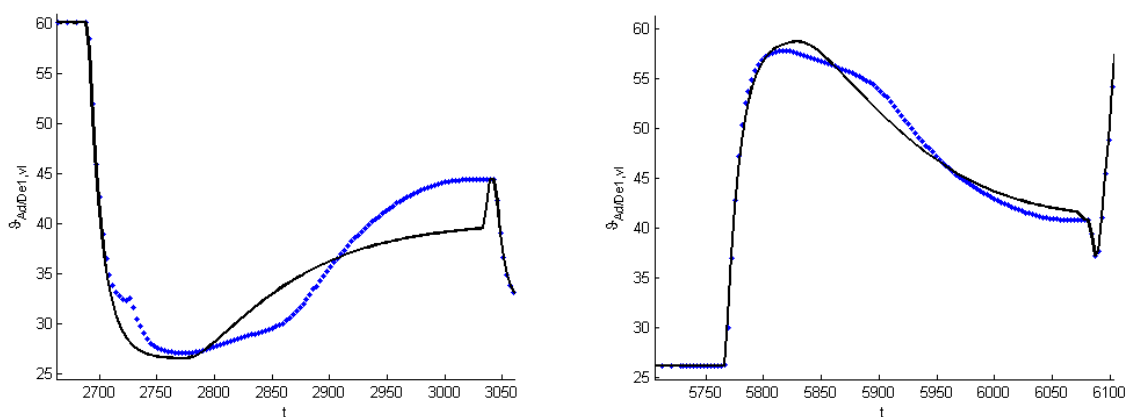


Abbildung 16: Vorlauftemperaturen in °C für Ad/Desorber 1 in den Umschaltphasen
(*** Messdaten, — Simulation)

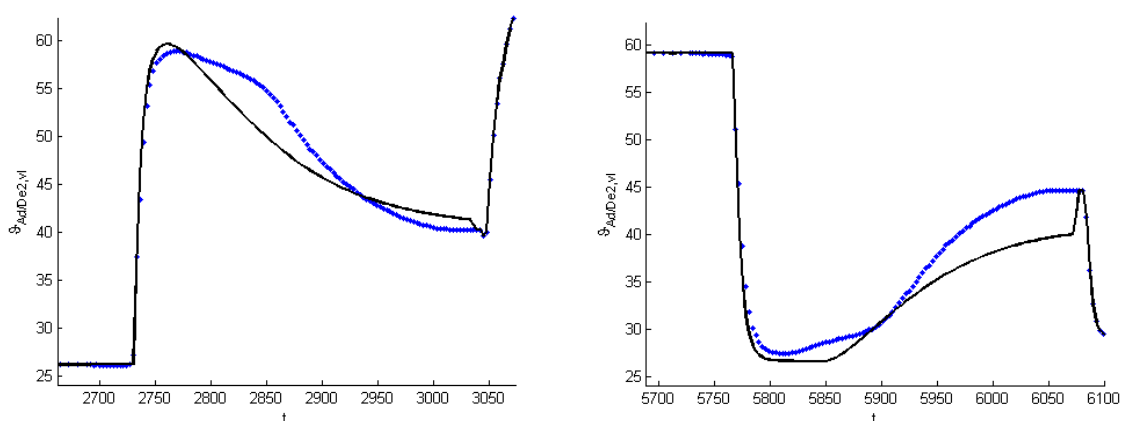


Abbildung 17: Vorlauftemperaturen in °C für Ad/Desorber 2 in den Umschaltphasen
(*** Messdaten, — Simulation)

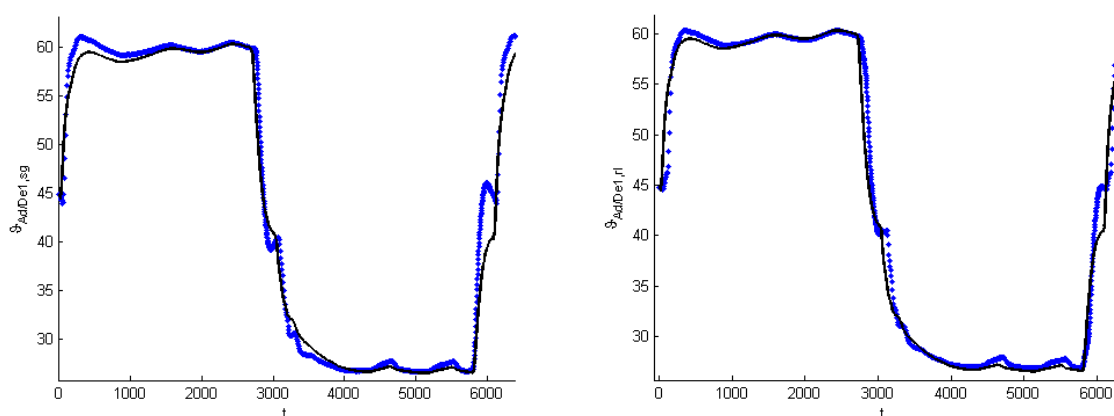


Abbildung 18: Bett-Temperatur und Rücklauftemperatur in °C für Ad/Desorber 1
(*** Messdaten, — Simulationsergebnisse)

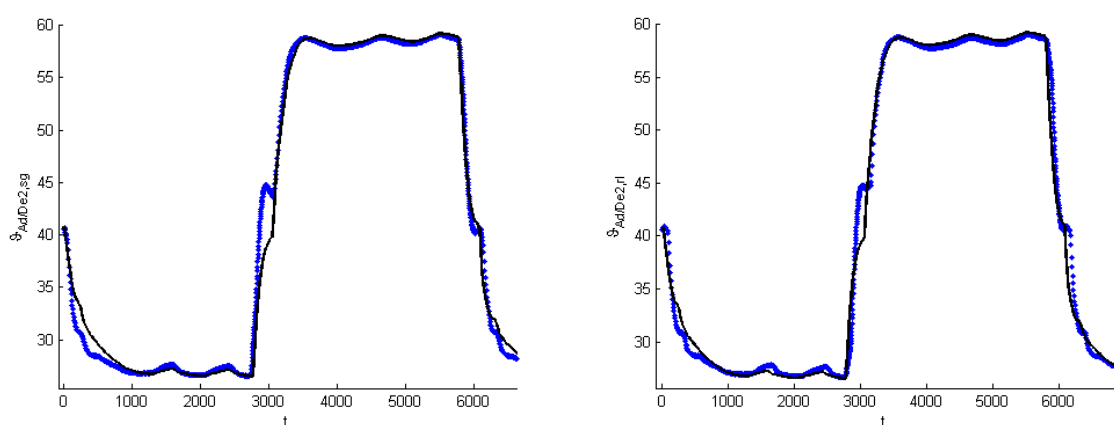


Abbildung 19: Bett-Temperatur und Rücklauftemperatur in °C für Ad/Desorber 2
(*** Messdaten, — Simulationsergebnisse)

In den Abbildungen 20 bis 22 sind Temperaturen und Drücke für Verdampfer und Kondensator dargestellt, in Abbildung 23 der Coefficient of Performance.

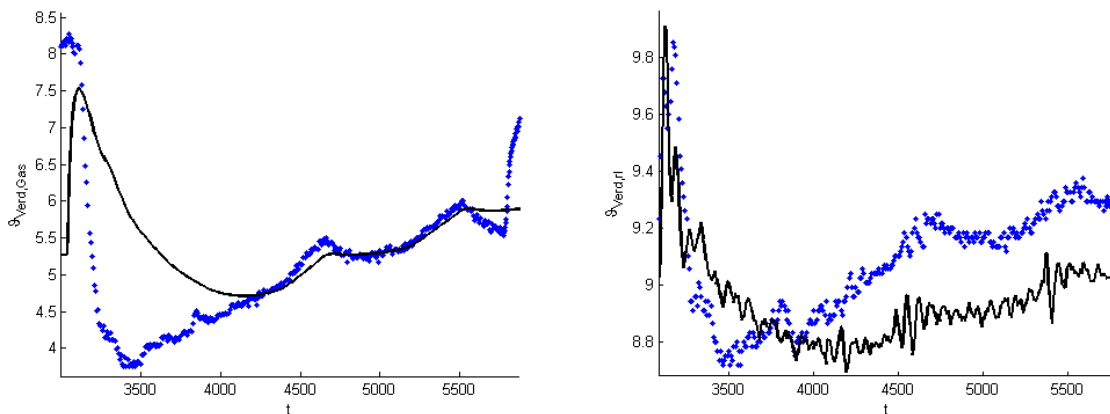


Abbildung 20: Gastemperatur und Rücklauftemperatur in °C für Verdampfer
(*** Messdaten, — Simulationsergebnisse)

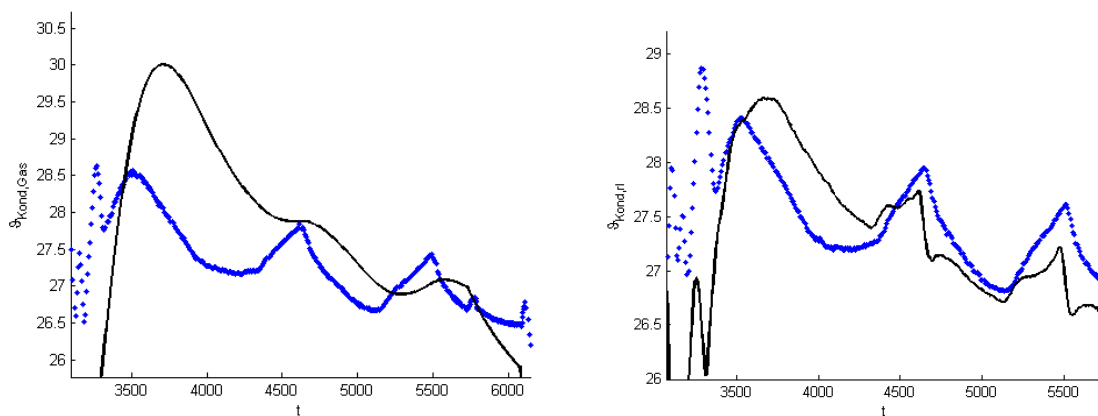


Abbildung 21: Gastemperatur und Rücklauftemperatur in °C für Kondensator
(*** Messdaten, — Simulationsergebnisse)

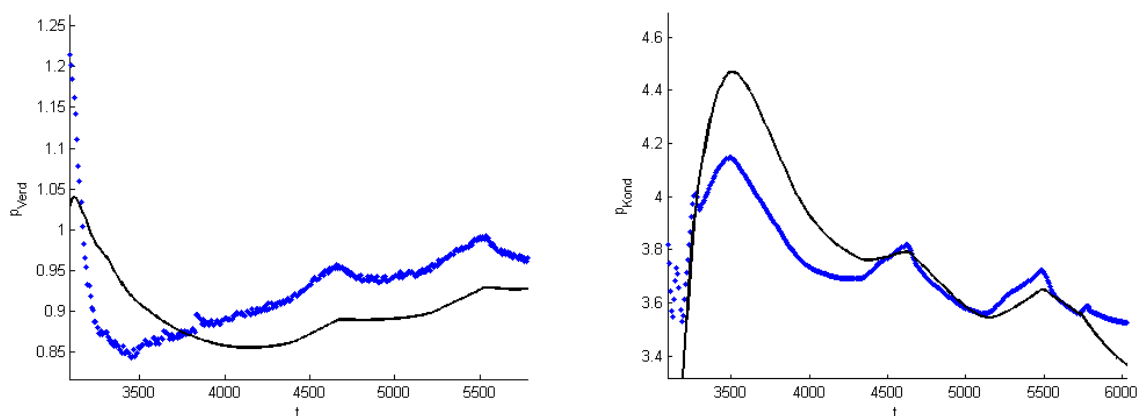


Abbildung 22: Druck in kPa in Verdampfer und Kondensator
(*** Messdaten, — Simulationsergebnisse)

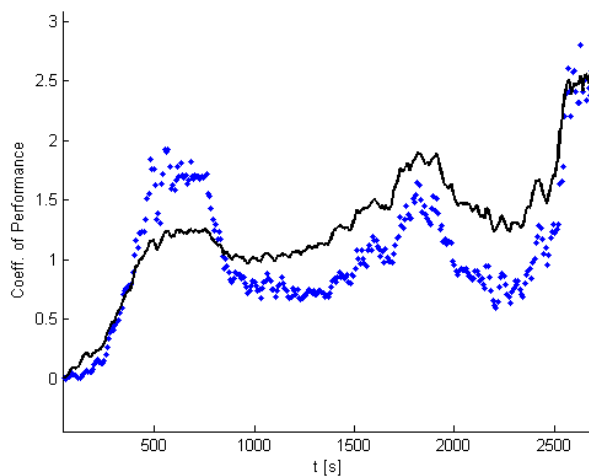


Abbildung 23: Coefficient of Performance für Verdampfer-Desorber-Teilprozess
(*** aus Messdaten berechnet, — Simulationsergebnisse)

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Verwendung von wärmebetriebenen Kältemaschinen ist vor allem dann sinnvoll und interessant, wenn Wärme als Antriebsenergie zur Verfügung steht, die sonst nicht genutzt wird bzw. werden kann und weggekühlt werden muss.

Im Zuge der Entwicklungen in Richtung Dezentralisierung von Energiebereitstellungssystemen wie beispielsweise erdgasbetriebene Hauskraftwerke (Brennstoffzellen, Verbrennungsmotoren usw.) werden in Zukunft immer mehr Abwärmequellen in Einfamilienhäusern zur Verfügung stehen, die in der heißen Jahreszeit ungenutzt weggekühlt werden müssen. Um einen wirtschaftlich effizienten Betrieb von Erdgas-Brennstoffzellen sicherstellen zu können, muss das System möglichst lange Laufzeiten aufweisen.

Ein großes Problem von wärmebetriebenen Kältemaschinen ist außerdem die Rückkühlung. In den kühleren Nachtstunden ist eine effizientere Rückkühlung möglich.

Durch intelligente Kombination von Speichersystemen, Brennstoffzelle und Adsorptionskältemaschine als Gesamtsystem können folgende Vorteile erzielt werden:

- Die Abwärme von Brennstoffzellen kann zum Antrieb der Adsorptionskältemaschine verwendet werden.
- Ein Teil der am Tag benötigten Kühlenergie kann in den kühleren Nachtstunden unter deutlich besseren Rückkühlbedingungen generiert werden.
- Beide Systeme (Brennstoffzelle und Adsorptionskältemaschine) können kleiner dimensioniert werden, da die Spitzen über die Speichersysteme abgefangen werden können.

Im Zuge dieser Untersuchungen ist auch die Weiterentwicklung der Simulation ein unerlässliches Werkzeug, um Parametervariationen und Sensitivitätsanalysen durchführen zu können.

5 Literaturverzeichnis

Chua H.T., K. C. Ng, W. Wang, C. Yap, X.L. Wang: Transient modeling of a two-bed silica gel - water adsorption chiller; International Journal of Heat and Mass Transfer, 47, 2004

Eigengrün, St.: Theoretische und experimentelle Untersuchung des dynamischen Verhaltens von periodisch arbeitenden Sorptionskälteaggregaten; VDI Reihe 19 Nr. 77. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994

Freni A., F. Russo, S. Vasta, M. Tokarev, Yu.I. Aristov, G. Restuccia: An advanced solid sorption chiller using SWS-1L; HPC 2004 – 3rd International Conference on Heat Powered Cycles, Cyprus, 2004

Geyer J., Paar K.: Development of a low capacity adsorption chiller, 61st ATI National Congress; International Session "Solar Heating and Cooling", 2006

Hauer A.: Beurteilung fester Adsorbentien in offenen Sorptionssystemen für energetische Anwendungen; Dissertation, Technische Universität Berlin, 2002

Henning H-M.: Regenerierung von Adsorbentien mit solar erzeugter Prozeßwärme; VDI Reihe 3 Nr. 350. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1994

Hildbrand C., Dind P., Pons M., Buchter F.: A new solar powered adsorption refrigerator with high performance; Solar Energy, 77, 2004

Jakob U., Eicker U.: Solare Kühlung in Gebäuden; 9. Energietage Rheinland-Pfalz, Bingen, 2006

Jakob U.: Auch die Sonne kann kühlen - Ein Überblick über Sorptionskältemaschinen kleiner Leistung; Erneuerbare Energien, 6/2008

Jakob U.: Neue Entwicklungen im Bereich der solaren Kühlung; Proceedings of the 2nd Energy Forum – Solararchitektur & Solares Bauen, Brixen, 2007

Leong K. C., Y. Liu: Numerical study of a combined heat and mass recovery adsorption cooling cycle; International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004

Liu Y.L., Wang R.Z., Xia, Z.Z.: Experimental study on a continuous adsorption water chiller with novel design, International Sorption Heat Pump Conference, Denver, 2005

Meyer J-P: Die kleinen im Paket; Sonne, Wind & Wärme, 3/2008

Mittelbach W.: Adsorptionskältetechnik aus Sicht eines Herstellers; Seminar Solare Klimatisierung, Rudolstadt, 2008

Nunez T.: Charakterisierung und Bewertung von Adsorbentien für Wärmetransformationsanwendungen; Dissertation, Universität Freiburg, 2001

Offenlegungsschrift DE 10 2005 058 624 A1; Verfahren zur Herstellung eines Adsorberwärmetauschers; Mittelbach W., 2006

Offenlegungsschrift DE 101 19 258 A1; Adsorber-/Desorber-Wärmetauscher; Lang R., 2001

Offenlegungsschrift DE 196 44 938 A1; Adsorptionskältemaschine und Verfahren zu deren Betrieb; Lutz, J., Wernecke H., Habermehl B., 1996

Paar K.: "Solare Adsorptionskühlung von Wohn- und Bürogebäuden (Sunsorber), Endbericht Programmlinie Haus der Zukunft, 2007

Patent WO 2007/098904 A2; Adsorptions-Wärmepumpe, Adsorptions-Kältemaschine und Adsorberelemente hierfür; Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 2007

Patentschrift DE 10 2006 011 409 B4; Adsorptionsmaschine mit Wärmerückgewinnung; Paulßen S., 2008

Patentschrift DE 101 59 652 C2; Verfahren zur Wärmeübertragung sowie Wärmeübertrager hierfür; Mittelbach W., Henning H-M, 2003

Patentschrift DE 102 17 443 B4; Feststoff-Sorptionswärmepumpe; Henning H-M., 2004

Patentschrift DE 3633465 C2; Adsorptionskältemaschine, Matsushita et al., 1987

Safarik M.: Solare Klimakälteerzeugung – Technologie, Erprobung, Simulation; Dissertation, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik, Otto-von-Guericke-Universität, Magdeburg, 2003

Saha B. B. et al.: Performance evaluation of a low-temperature waste heat driven multi-bed adsorption chiller; In-ternational Journal of Multiphase Flow, 29, 2003

Saha B. B. et al.: Waste heat driven dual-mode, multi-stage, multi-bed regenerative adsorption system; International Journal of Refrigeration, 26, 2003

Schawe D.: Theoretical and Experimental Investigations of an Adsorption Heat Pump with Heat Transfer between two Adsorbers; Dissertation, Universität Stuttgart, 2001

Tien C.: Adsorption Calculations and Modeling; Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1994

Wang D.C., Z.Z. Xia, J.Y. Wu, R.Z. Wang, H. Zhai, W.D. Dou: Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part I. Design and performance prediction, International Journal of Refrigeration, 28, 2005

Wang D.C., Z.Z. Xia, J.Y. Wu, R.Z. Wang, H. Zhai, W.D. Dou: Study of a novel silica gel-water adsorption chiller. Part II. Experimental study, International Journal of Refrigeration, 28, 2005

Wang R.Z., Oliveira R.G.: Adsorption refrigeration - an efficient way to make good use of waste heat an solar energy; International Sorption Heat Pump Conference, Denver, 2005

Yong L., Sumathy K.: Modeling and simulation of a solar powered two bed adsorption air conditioning system; Energy Conversion and Management, 45, 2004

6 Anhang

6.1 Publikationen aus dem vorliegenden Projekt

Im Zuge dieses Projektes wurde folgende Diplomarbeit erstellt:

Holzmann, Anita: Modellierung und Simulation einer Adsorptionskältemaschine; Institut für Elektrische Antriebe und Maschinen; Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Technische Universität Wien, 2010

Am 30.11.2011 wurden die Forschungsergebnisse im Zuge eines Symposiums im Technologiezentrum Güssing dem Fachpublikum vorgestellt. Die Vortragenden wurden so ausgewählt, dass die Zuhörer einen breit gefächerten Einblick in das interessante Themengebiet erhalten konnten. Nach der Begrüßung und den neuesten Entwicklungen am Standort Güssing von Herrn Dr. Richard Zweiler (Güssing Energy Technologies GmbH) folgte die Vorstellung der Projektergebnisse dieses Forschungsprojekts durch Herrn DI(FH) Klaus Paar (Güssing Energy Technologies GmbH) und DI Klaus Lichtenegger (Bioenergy 2020+). Im nächsten Vortrag berichtete Herr DI Hilbert Focke (Austrian Solar Innovation Center ASIC) von den Betriebserfahrungen mit thermischen Kältemaschinen in der Praxis. Ing. Franz Schlögl (Lechner & Partner) brachte seine Sichtweise über die Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie aus Sicht eines über 20 Jahre in der Kältetechnik tätigen Ingenieurs ein. Zum Schluss konnte auch Herr Manfred Szöke (SHT Haustechnik) dem interessierten Publikum die Sichtweise des Großhandels zum Einsatz von wärmebetriebenen Kältemaschinen näher bringen.



Abbildung 24: Vortragende beim Symposium (von links, ohne Titel: Franz Schlögl, Klaus Paar, Manfred Szöke, Richard Zweiler, Hilbert Focke, Klaus Lichtenegger)

Eine Exkursion ins Sunsorber-Forschungslabor sowie zu einer Erdgasbrennstoffzelle in Güssing rundete das Programm des Symposiums ab.



Abbildung 25: Fachpublikum beim Symposium

IMPRESSUM

Verfasser

Güssing Energy Technologies GmbH

Richard Zweiler

A-7540 Güssing, Wiener Straße 49

Tel.: +43 3322 42606 311

Fax.: +43 3322 42606 399

E-Mail: r.zweiler@get.ac.at

Eigentümer, Herausgeber und Medieninhaber

Klima- und Energiefonds

Gumpendorfer Straße 5/22

1060 Wien

office@klimafonds.gv.at

www.klimafonds.gv.at

Disclaimer

Die Autoren tragen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts. Er spiegelt nicht notwendigerweise die Meinung des Klima- und Energiefonds wider.

Der Klima- und Energiefonds ist nicht für die Weiternutzung der hier enthaltenen Informationen verantwortlich.

Gestaltung des Deckblattes

ZS communication + art GmbH