

Grundlagen Thermische Kältesysteme - Absorptionstechnik:

In den nächsten Jahrzehnten wird mit einem großen Anstieg des Energiebedarfs zur Gebäudekühlung gerechnet. Solarthermische Kühlung ist eine energiesparende und ökologische Alternative zur jetzt üblichen Kompressionstechnologie. Die Verbreitung der Technologie wird von der österreichischen Bundesregierung gefördert. Zielsetzung ist die Substitution von fossilen Energieträgern und die damit verbundene CO₂ – Einsparung sowie die Erhöhung der Energieeffizienz.



hat in der Bezirkshauptmannschaft Rohrbach eine Pilotanlage geplant, realisiert und ausgewertet und kann auf umfassendes Wissen und Erfahrung zurückgreifen.

Um ihnen einen Überblick über die Technologie zu geben, stellen wir ihnen einen Projektbericht und eine Zusammenfassung der theoretischen Grundlagen zur Verfügung

Falls sie ein ähnliches Projekt in dieser Technologie planen, sind wir gerne ihr Partner – wir beraten sie auf höchstem Qualitätsniveau !

Inhaltsverzeichnis

1 Kälteeffekte

2 Kälteerzeugung

2.1 *Mechanische Verfahren:*

2.2 *Thermische Verfahren:*

2.3 *Elektrothermische Verfahren:*

2.4 *Magnetokolorische Verfahren:*

3 Thermische Kältesysteme

3.1 *Physikalische und thermodynamische Grundlagen*

3.2 *Absorptionskältemaschine*

4 Die Absorptionskältemaschine der BH Rohrbach

4.1 *Funktionsschema*

4.2 *Zyklus*

4.3 *Kriterien*

4.4 *Betriebserfahrungen*

1 Kälteeffekte

Als Kälteeffekte werden jene Zustandsänderungen im gesamten Kälteprozess bezeichnet, bei denen eine Wärmeaufnahme bei niedriger Temperatur eine Temperaturabsenkung im Nutzungsbereich ermöglicht.

Kälteeffekte entstehen auf Grund folgender Zustandsänderungen:

- Endotherme Phasenumwandlungen, die bei konstanter Temperatur mit Wärmeaufnahme verbunden sind.
- Thermische Zustandsänderungen, bei denen die Temperatur des Arbeitsstoffes infolge Verringerung der kinetischen Energie der Teilchen sinkt.

Nachstehende Zusammenstellung gibt einen Überblick über die verschiedenen Kälteeffekte und deren praktische Anwendung. Es ist ersichtlich, dass der Großteil der angewandten Kälteverfahren auf dem Prinzip des Verdampfens einer Flüssigkeit unter Einsatz von Druckänderung beruht. Auch das Verfahren der Absorptionskälteanlage fällt in diese Kategorie.

Kälteeffekt	Parameteränderung	Technische Anlage
Verdampfen einer Flüssigkeit	Druck, Druck über Temperaturänderung	Kompressions- Absorptions- und Adsorptions- Kältdampfmaschine, Dampfstrahl-Kältemaschine
Verdunsten einer Flüssigkeit	Partialdruckdifferenz	Verdunstungskühlung mit Sorptionsregeneratoren
Verdampfen einer Mehrstoff- flüssigkeit ohne Azeotropismus	Druck	Mehrstoffanlage mit gleitender Kältemitteltemperatur
Desorbieren eines Gase aus einer Flüssigkeit	Druck, Druck über Temperaturänderung	Kompressions-Kältdampfmaschine mit Lösungsmittelkreislauf
Entspannung durch Volumenarbeit	Druck	Kaltgasmaschine, Kaltluftmaschine, Stirling-Kaltgasmaschine
Drossel-effekt (Joule-Thomson- Effekt)	Druck	Lindeprozess
Wirbelrohr-Effekt	Druck	Wirbelrohr
Peltier- oder thermoelektrischer Effekt	Elektrisches Feld	Thermoelektrische Kühlung
Magnetokalorischer Effekt	Magnetisches Feld	Magnetokalorische Kühlung,
Elektrokalorischer Effekt	Elektrisches Feld	Elektrokalorische Kühlung
Galvanomagnetischer Effekt (Etinghausen Effekt)	Elektrisches und magnetisches Feld	Galvanomagnetische Kühlung

Die Verdampfung einer Flüssigkeit beruht auf dem Effekt der Aussonderung schneller Moleküle aus der Oberfläche dieser Flüssigkeit. Durch Absaugen des Dampfes entsteht eine Potentialdifferenz und die Moleküle treten mit hoher kinetischer Energie aus der Flüssigkeitsschwelle heraus. Die Flüssigkeit muss nun sieden, um das Gleichgewicht zwischen Flüssigkeit und Dampfphase wieder herzustellen. Die Energie zum Sieden wird der umgebenden Wärmequelle entzogen und diese somit gekühlt.

2 Kälteerzeugung

Die Kälteerzeugung kann mechanisch, thermisch, elektrothermisch und magnetokolorisch erfolgen. Nachstehende Auflistung und Kurzbeschreibung dient nur der Übersicht, in Folge werden nur mehr thermische Systeme berücksichtigt, davon im Detail wiederum nur die Absorptions-Kälteanlage.

2.1 Mechanische Verfahren:

- **Kompressions – Kaltdampfmaschine**
Ein verflüssigtes Kältemittel wird durch Entspannung auf eine Temperatur unter der Umgebungstemperatur abgekühlt. Durch die Temperaturdifferenz fließt Wärme aus dieser Umgebung (dem zu kühlenden Bereich) in das Kältemittel. Durch anschließende Kompression wird das Kältemittel auf eine Temperatur höher als jenes Medium gebracht, an das die Wärme dann abgegeben wird (Außenluft, Kühlwasser etc.)

2.2 Thermische Verfahren:

- **Absorptions-Kälteanlagen**
In einem kontinuierlichen Prozess wird der bei der Verdampfung entstehende Kältemitteldampf in einer geeigneten Flüssigkeit aufgenommen und nach einer Regeneration mittels Wärme das Kältemittel wieder gasförmig bereitgestellt.
- **Adsorptions-Kälteanlagen**
In einem zyklischen Prozess in zwei Perioden wird ein flüchtiger Stoff von einem nichtflüchtigen festen Stoff aufgenommen und nach einer Regeneration mittels Wärme das Kältemittel wieder gasförmig bereitgestellt.
- **Strahlverdichter**
In einem Strahlverdichter wird die Energie eines Treibstromes in direkten Kontakt auf einen Förderstrom übertragen. Der Impuls des Treibstromes wird auf den Förderstrom übertragen und es entsteht dadurch am Förderstromeingang ein Unterdruck, welcher dem Verdampfungsdruck entspricht.

2.3 Elektrothermische Verfahren:

- **Peltier – Element**
Beim Anlegen einer Spannung an einen elektrischen Kreis aus zwei verlöteten Leitern entstehen unterschiedliche Temperaturen. Die kalte Lötstelle nimmt Wärme auf und gibt diese an der warmen Lötstelle ab.

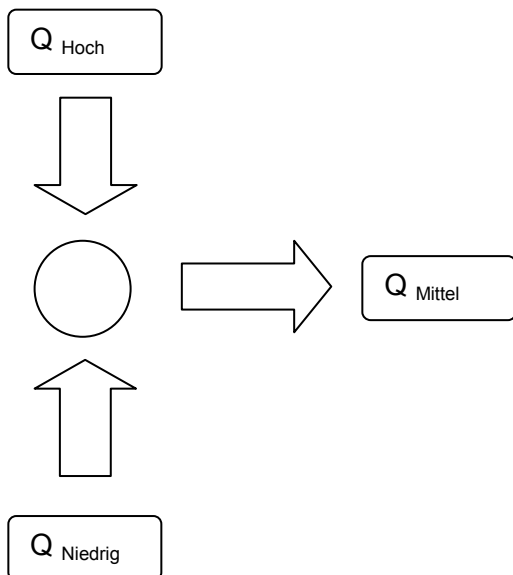
2.4 Magnetokolorische Verfahren:

- Der magnetokolorische Effekt besteht darin, dass in magnetischen Stoffen durch sich ändernde Feldstärke eine Temperaturabsenkung auftritt.

3 Thermische Kältesysteme

3.1 Physikalische und thermodynamische Grundlagen

Eine Kühlmaschine benötigt Energie, um Wärme von einer Quelle mit niedriger Temperatur zu einer Senke mit höherer Temperatur zu transportieren. Das Prinzip des Energieflusses kann grafisch so dargestellt werden:



- \dot{Q}_{Niedrig} Wärmeabfluss aus Bereich niedriger Temperatur, wodurch Nutzkälte entsteht.
- \dot{Q}_{Hoch} Zufuhr von Energie in Form von Wärme mit hoher Temperatur zum Antrieb des Prozesses. Bei der solaren Kühlung ist dies die Wärme aus den Kollektoren.
- \dot{Q}_{Mittel} Entsprechend dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik muss die Summe der zugeführten Energiemengen auch wieder abgeführt werden, dies geschieht auf mittlerem Niveau mittels Rückkühleinrichtung, üblicherweise an die Umgebungsluft oder an einen geeigneten Verbraucher

Erster Hauptsatz:
$$\dot{Q}_{\text{Niedrig}} + \dot{Q}_{\text{Hoch}} = \dot{Q}_{\text{Mittel}}$$

Thermischer Wirkungsgrad:
$$COP = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Niedrig}}}{\dot{Q}_{\text{Hoch}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Kälte}}}{\dot{Q}_{\text{Antrieb}}}$$

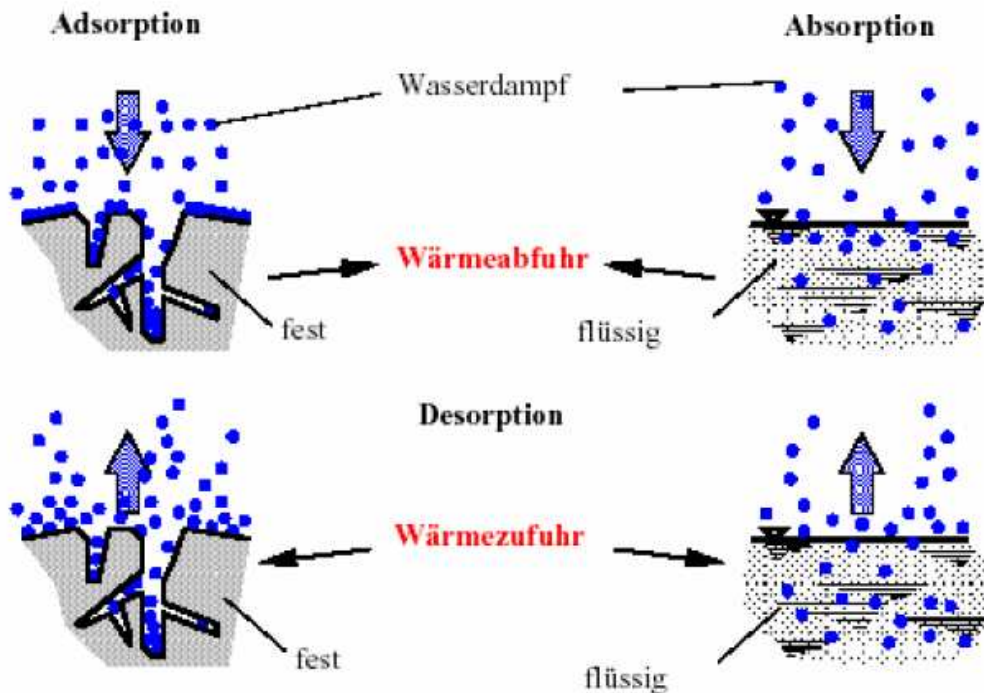
COP bedeutet „Coefficient of Performance“ und beschreibt die Leistungsfähigkeit, in diesem Fall den erzielten Nutzen (Kälte) im Verhältnis zum eingesetzten Aufwand (Antriebswärme). Dieser Wert wird auch als „Wärmeverhältnis“ bezeichnet. Es stellt sich die Frage, warum der COP bei thermischen Systemen wesentlich niedriger als bei Kompressionskältemaschinen ist. Dies ist damit begründet, dass die thermo-dynamische Wertigkeit der verschiedenen Antriebsenergien (Wärme beim thermischen System, elektrische Energie beim mechanischen System) sehr unterschiedlich ist. „Die durch den Carnot-Faktor belastete Erzeugung elektrischer Energie in einem Wärmekraftwerk bleibt unberücksichtigt“

Derzeit am Markt befindliche thermische Kältesysteme erreichen COP – Werte von 0,3 ... 1,2

Adsorption und Absorption sind Prozesse, bei denen Moleküle eines flüchtigen Stoffes (Sorbat) von einem anderen nichtflüchtigen Stoff (Sorptionsmittel, Sorbens) aufgenommen werden. Ist das

Sorptionsmittel ein fester Körper, spricht man von Adsorption, bei einer Flüssigkeit spricht man von Absorption. Bei beiden Prozessen wird Wärme frei.

Um das Sorbat wieder aus dem Sorbens zu entfernen, muss von außen Wärme zugeführt werden, dies wird Desorption oder Regeneration genannt.

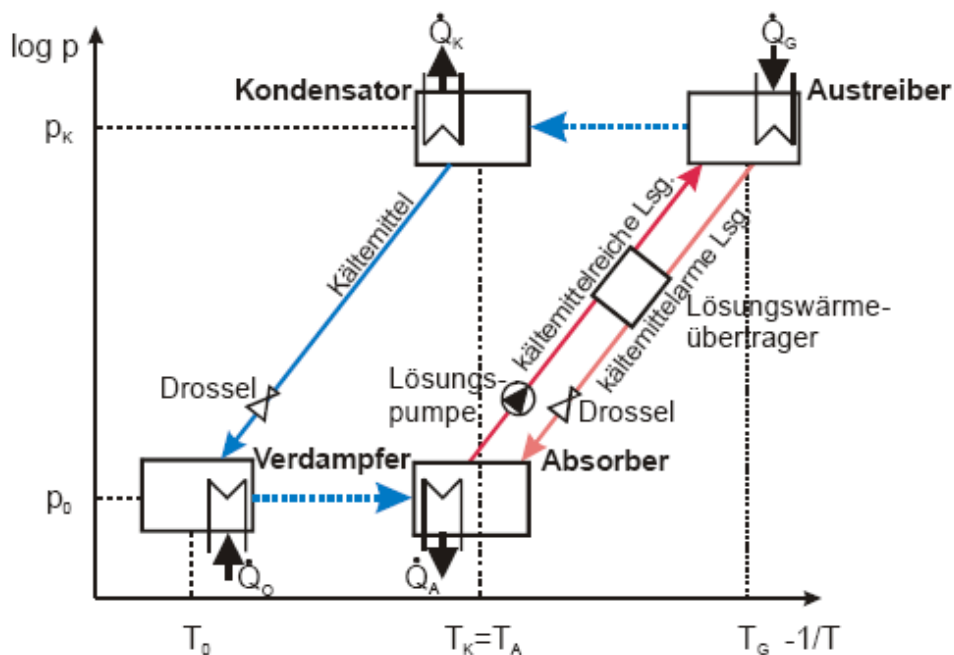


Prinzip Adsorption und Absorption, Quelle: Menerga

3.2 Absorptionskältemaschine

- Grundlagen

Die Absorptionskältemaschine besteht aus den vier Hauptkomponenten Verdampfer, Absorber, Austreiber (Generator) und Kondensator. Kondensator, Verdampfer und Entspannungsventil unterscheiden sich nicht von den Komponenten einer Kompressionskältemaschine. Die mechanische Verdichtung in der Kompressionskältemaschine wird durch eine thermische Verdichtung ersetzt, welche im Kreislauf Absorber – Austreiber stattfindet.



Kreisprozess der Absorptionskältemaschine

Beschreibung der einzelnen Schritte des kontinuierlich ablaufenden Prozesses:

Verdampfer:

Das Kältemittel verdampft bei der Temperatur T_0 und dem Druck p_0 und nimmt dabei die dem zu kühlendem Medium (z.B. Kaltwasser) entzogene Verdampfungswärme Q_0 auf. Die Temperatur T_0 muss immer tiefer als die Temperatur des zu kühlenden Mediums sein, damit ein Wärmestrom fließen kann. Die niedrige Verdampfungs- temperatur und damit der niedrige Verdampfungsdruck können nur aufrechterhalten werden, wenn der gebildete Kältemitteldampf aus dem Verdampfungsgebiet abgezogen wird, dies geschieht im Absorber durch ein geeignetes Lösungsmittel, einem Mehrkomponentengemisch.

Absorber:

Der im Verdampfer gebildete Kältemitteldampf wird im unterkühlten kältemittelarmen Lösungsmittel absorbiert, wobei die Wärme Q_A bei der Temperatur T_A frei wird. Diese Wärme muss abgeführt werden, entweder über einen Verbraucher oder mittels Rückkühler. Der Absorber bildet somit die „Saugseite“ des thermischen Verdichters. Das nun kältemittelreiche Lösungsmittel wird die Lösungsmittelpumpe auf den Kondensationsdruck p_K verdichtet und in den Austreiber gefördert.

Austreiber (Generator):

Unter Zufuhr der Wärme Q_G und der Temperatur T_G wird ein Teil des Kältemittels als Dampf aus der Lösung ausgetrieben (Desorption). Die dafür erforderliche von außen zugeführte Wärme stellt die Antriebsenergie des gesamten Prozesses dar. Die nun kältemittelarme Lösung wird durch eine Drossel auf den Absorberdruck p_0 entspannt und wieder dem Absorber zugeführt, wo sie erneut Kältemitteldampf aufnehmen kann, der Lösungskreislauf wird somit geschlossen.

Kondensator:

Der Kältemitteldampf kondensiert beim Druck p_K . Die freiwerdende Kondensationswärme muss ebenfalls abgeführt werden, dies geschieht wie beim Absorber. Das Kondensat wird in einer Drossel auf den Druck p_0 entspannt und dem Verdampfer zugeführt, somit ist auch der Kältemittelkreislauf geschlossen.

Lösungswärmeübertrager:

Hier wird mit dem internen Wärmetauscher die verarmte Lösung abgekühlt, um nach der Entspannung die Aufnahmebereitschaft zur neuerlichen Kältemitteldampf – Absorption zu unterstützen.

Der Hauptunterschied zum Kompressionskälteprinzip liegt darin, dass in einer Absorptionskälteanlage der Kältemitteldampf nicht mechanisch in der Gasphase, sondern nach der Absorption im Absorber als Flüssigkeit verdichtet werden kann, was wesentlich weniger Energie in Anspruch nimmt.

- **Arbeitsstoffe und Anwendung**

Es eignen sich ca. 10 Stoffpaare für den Einsatz in Absorptionsanlagen, allerdings haben sich in der praktischen Anwendung nur zwei davon durchgesetzt:

Wasser – Lithiumbromid:

Als Kältemittel wird Wasser H_2O , als Lösungsmittel Lithiumbromid $LiBr$ verwendet. $LiBr$ ist ein Lithiumsalz der Bromwasserstoffsäure, bildet farblose, stark hygroskopische Kristalle, ist nahezu ungiftig, geruchlos und nicht brennbar. Der wesentliche Nachteil dieser Stoffpaarung ist, dass der Einsatzbereich durch den Gefrierpunkt des Wassers begrenzt ist und so nur minimale Kaltwasseraustrittstemperaturen

von 5°C möglich sind. Energetisch günstiger Betrieb ist allerdings nur bei höheren Kaltwassertemperaturen möglich, daher Einsatz hauptsächlich nur für Raumkühlung. Die maximale Austreiber-temperatur dieses Gemisches beträgt ca. 60°C, der gesamte Prozess läuft im Vakuum (8 ...50 mbar) ab. Bei zu hohen Heizmittel- oder zu niedrigen Kühlmitteltemperaturen besteht Kristallisationsgefahr.

Ammoniak – Wasser:

Als Kältemittel wird Ammoniak NH₄, als Lösungsmittel eine wässrige Ammoniaklösung verwendet. Ammoniak kann bis zu Verdampfungstemperaturen von minus 60°C eingesetzt werden, Einsatz daher auch für Kälteerzeugung möglich oder in der Klimatechnik bei Eisspeicherung. Der wesentliche Nachteil dieser Stoffpaarung ist, dass das Lösungsmittel toxisch und stark ätzend ist, sich leicht verflüchtigen kann und dass sehr hohe Systemdrücke (0,3 ... 3 bar) erforderlich sind.

	Absorption (Wasser-Lithiumbromid)	Absorption (Ammoniak-Wasser)	Adsorption	DEC-Anlagen
Verfahrensprinzip	Kaltwassererzeugung	Kaltwassererzeugung	Kaltwassererzeugung	Luftentfeuchtung u. Verdunstungskühlung
Kältemittel	Wasser	Ammoniak	Wasser	-
Sorptionsmittel	Lithiumbromid	Wasser	Silikagel	Silikagel
Kälte-träger	Wasser	Wasser-Glykol	Wasser	Luft
Kältetemperatur-Bereich	6 bis 20°C	-60 bis +20°C	6 bis 20°C	15 bis 20°C
Antriebstemperaturen	75 bis 160°C	80 bis 120°C	60 bis 90°C	45 bis 95°C
Kälteleistung je Einheit	ab 15 kW	ab 80 kW	ab 50 kW	6 bis 300 kW
COP	0,6 – 1,2	0,3 – 0,7	0,4 – 0,7	0,5 – 1
Solarantrieb	Vakuurröhren-kollektoren, Flachkollektoren	Vakuurröhren-kollektoren	Vakuurröhren-kollektoren, Flachkollektoren	Flachkollektoren, Luftkollektoren

Übersicht thermische Kältesysteme, Quelle: Arsenal Research

4 Die Absorptionskältemaschine der BH Rohrbach

4.1 Funktionsschema

Die Daten sind Nennbetriebsdaten und entsprechen nicht der tatsächlichen Betriebsweise. Im Rückkühlkreislauf sind Absorber und Kondensator in Serie geschaltet (Der Austritt Absorber ist Eintritt des Kondensators, mit „A“ bezeichnet).

Die im Schema dargestellten Flüssigkeitsschalen sind nicht vollflächig, sonder als Ring ausgebildet. Der Prozessablauf kann über Schaugläser in den Kesseln beobachtet werden.

Absorber:

Im Absorber wird der aus dem Verdampfer kommende Kältemitteldampf mit konzentrierter Lösung in Verbindung gebracht, wobei die Lösung ebenfalls mit einem Berieselungssystem fein verteilt wird. Bei diesem Vorgang wird der Kältemitteldampf von der Lösung absorbiert. Die dabei frei werdende Wärme wird durch das Kühlwasser aufgenommen und über ein Rückkühlwerk an die Umgebung abgegeben. Die entstehende kältemittelreiche Lösung sammelt sich im Sumpf des Absorbers und wird dort von der Lösungsmittelpumpe angesaugt.

4.3 Kriterien

Von Seiten des Herstellers sind außer nachstehendem Diagramm keine Betriebskennlinien veröffentlicht. Abbildung 10 zeigt die Abhängigkeit der Kälteleistung von der Heizwassertemperatur, der Kühlwassertemperatur und der Kaltwassertemperatur. Es ist ersichtlich, dass die Kälteleistung mit steigender Kühlwassertemperatur fallender Kaltwassertemperatur stark abnimmt. Bei einer Heizwassertemperatur von 85 °C z.B. wird die Nennleistung von 30 kW nur bei einer Kühlwassertemperatur von 27 °C und einer Kaltwassertemperatur von 10 °C erreicht. Die Konsequenzen daraus werden später beschrieben.

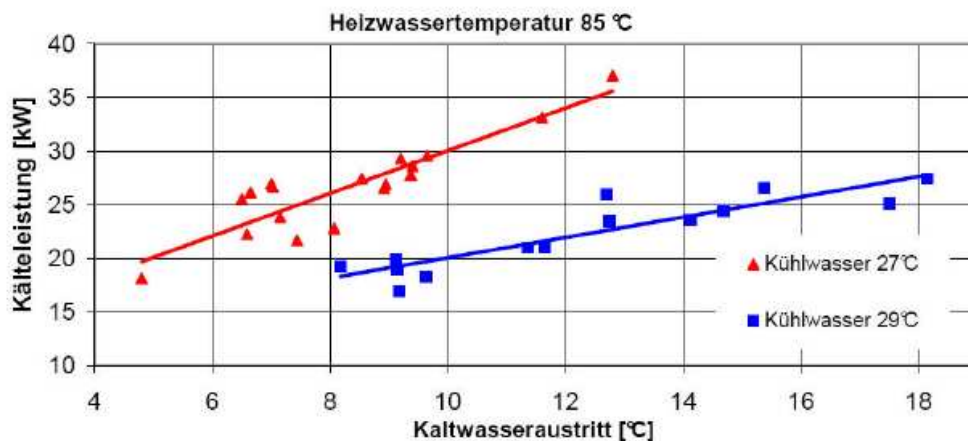


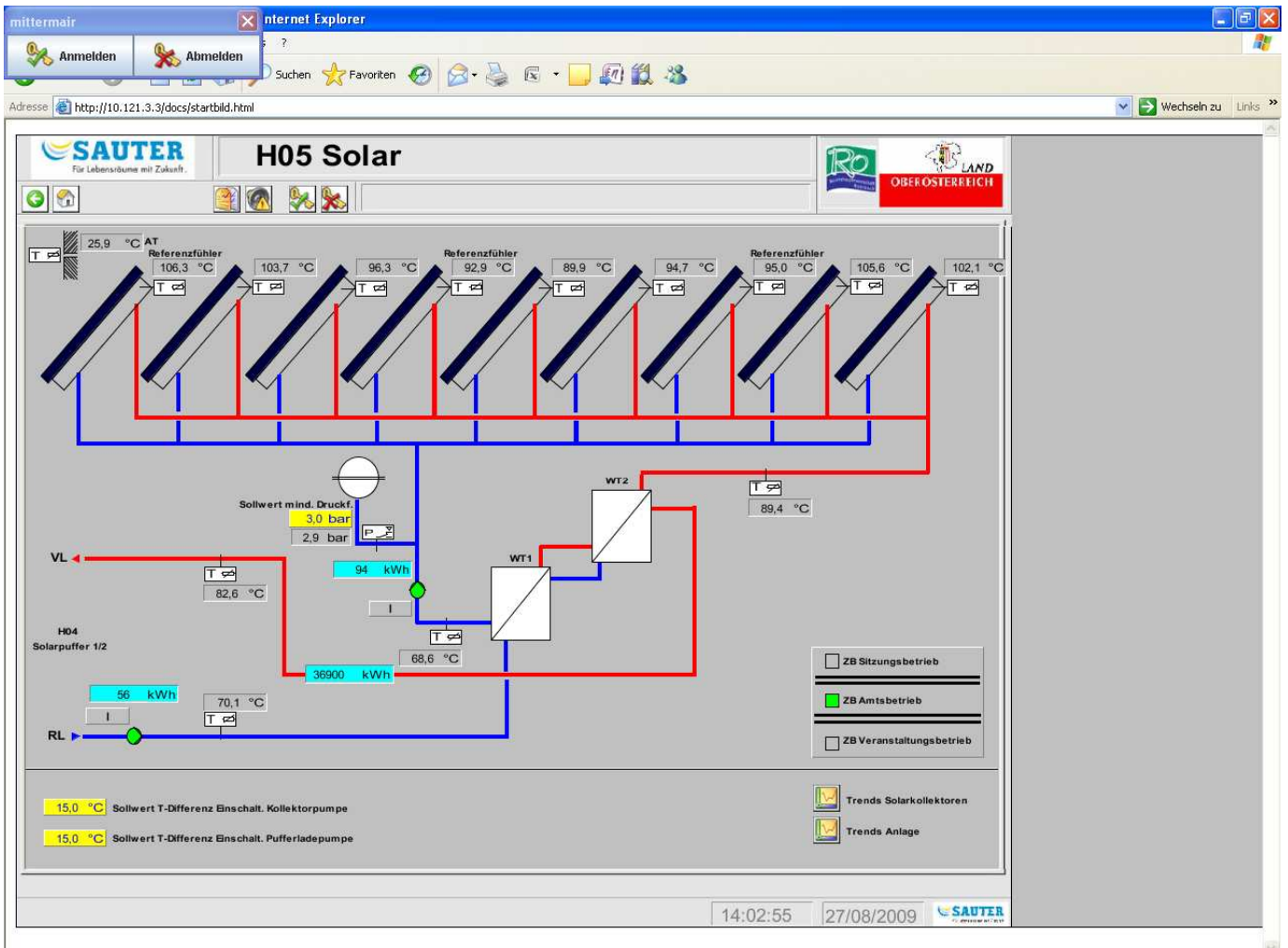
Abbildung 1: Betriebskennlinien, Quelle EAW

Im Zuge der Inbetriebnahme der Anlage wurden von EAW noch folgende Kriterien in Erfahrung gebracht:

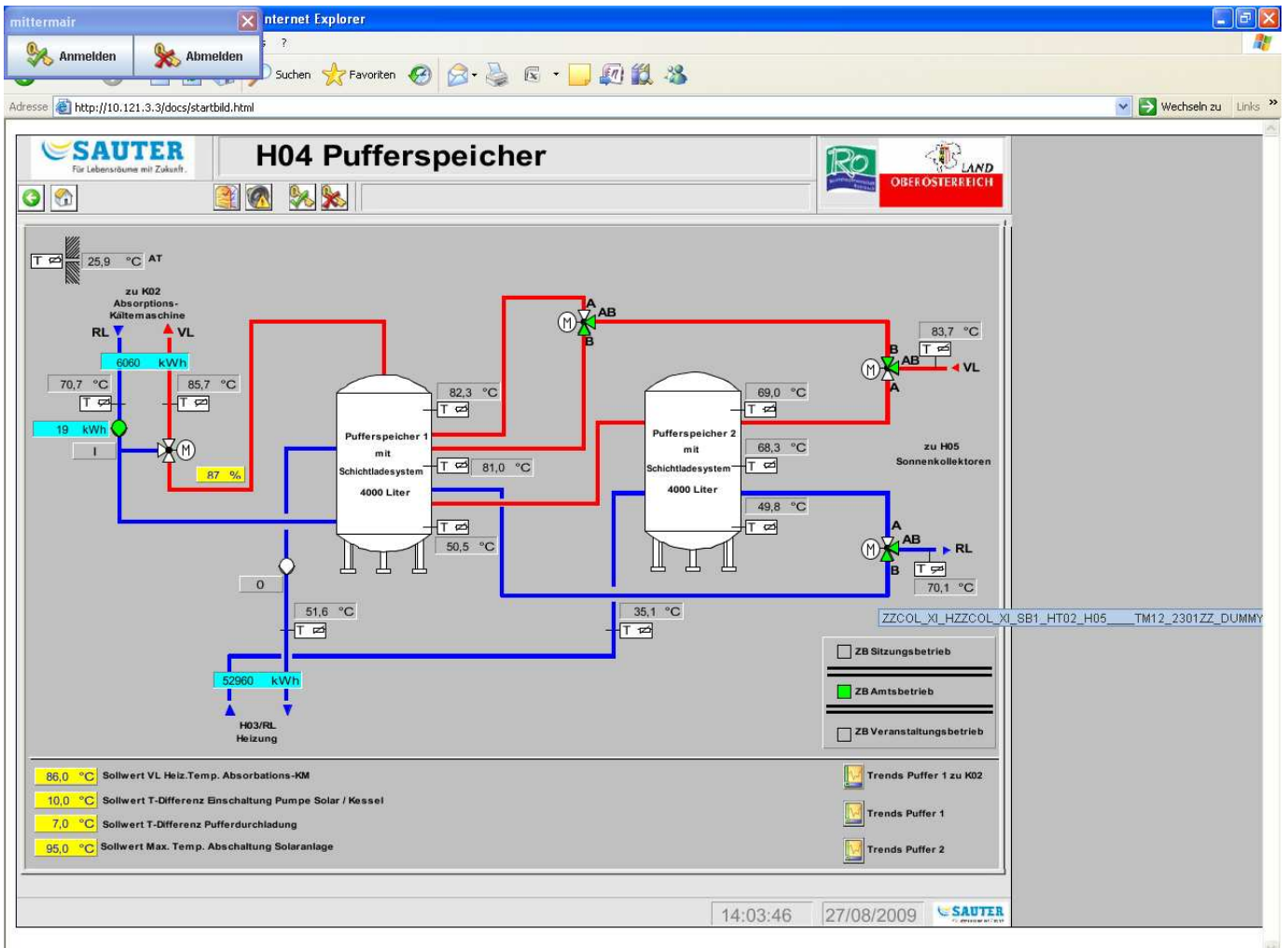
- Die Lithiumbromidlösung besteht aus ca. 50% Lithium und 50% Brom. Sie wird durch Restsauerstoff verbraucht und muss ca. alle 2 Jahre erneuert werden.
- Sämtliche Pumpen werden von Liquifanten geschaltet
- Der Kühlbetrieb beginnt erst, wenn die Temperatur der Lösung höher als 63 °C ist, die Anlaufphase kann daher 20 ... 30 Minuten dauern.

4.4 Betriebserfahrungen

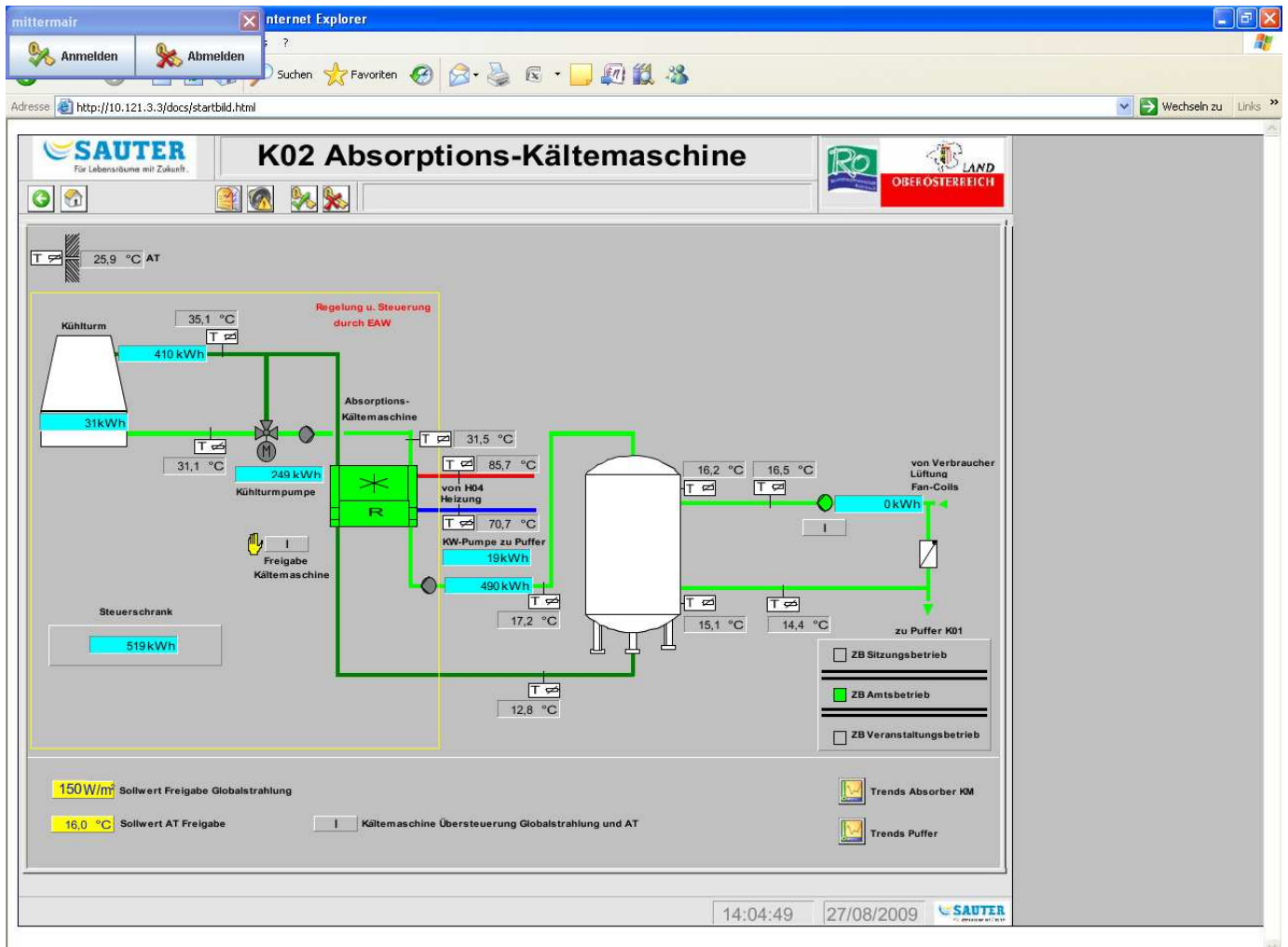
Bei diesem Projekt handelt es sich um ein Forschungsprojekt mit Förderung aus Mitteln des EFRE (Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung) und Landesmitteln. Bei der Inbetriebnahme des Gesamtsystems sind einige unerwartete Zustände aufgetreten, welche eine mehrmalige Nachjustierung der Steuerung erforderten. Die Funktion des Gesamtsystems „Solares Heizen und Kühlen“ ist gegeben, es bestehen noch geringfügige Leistungseinschränkungen (ca. 12 %, siehe Datenauswertung). Es wurden wertvolle Erkenntnisse gewonnen, welche in die Konzeption der nächsten Anlagengeneration einfließen.



27.08.2009: Plangemäßer Betrieb der Kollektoranlage



27.08.2009: Plangemäßer Betriebszustand der Pufferspeicher



27.08.2009: Zufriedenstellender Betrieb der Absorptionskältemaschine, die Kälteleistung beträgt 88 % der projektierten Leistung