



Makroaufnahmen des mit Silikagel beschichteten Wärmetauschers

SoTtech AG

# Wärme ist Antrieb für Kälte

## Sorptionskälte und KWK-Kopplung

**Walter Schindler,**  
Ingenieurbüro für Klima- und  
Anlagentechnik Schindler

Auf der Suche nach möglichen Energie- und CO<sub>2</sub>-Einsparungspotentialen gerät die Klima- und Kältetechnik immer häufiger in den Fokus der öffentlichen Diskussion. In den Medien werden Komfortklimaanlagen als „Stromfresser“ bezeichnet und immer öfter sogar für den Zusammenbruch von Stromversorgungsnetzen verantwortlich gemacht. In Konsequenz haben verschiedene Hersteller begonnen Klimatisierungskonzepte zu entwickeln, in denen Wärme die den Kälteprozess antreibende Energie zur Verfügung stellt.

Unter den Stichworten „Solares Kühlen“ mit der Nutzung überschüssiger Wärmemengen aus Solarkollektoren im Sommer und „Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung“ (KWKK), wo die Überschusswärme von Blockheizkraftwerken im Sommer zum Kühlen genutzt wird, sind Entwicklungen angestoßen worden, die die Klimatechnik im Leistungsbereich unter 50 kW wesentlich beeinflussen könnten. Obwohl es solche thermisch angetriebenen Kältemaschinen längst gibt, sind diese vorhandenen Techniken wenig geeignet, um im Massenmarkt der Klimageräte eingesetzt zu werden. Hier setzen die neuen Entwicklungen an. Und: Alle mit Wärme angetriebenen Verfahren kommen ohne ozonschädigende Kältemittel aus, was den ökologischen Nutzen solcher Anlagen weiter hervorhebt.

**Leistungsbereich 5 – 50 kW Kühlleistung** | Im kleinen Leistungsbereich ist die Zahl effizienter thermisch angetriebener

und für das Einzelhaus oder den kleinen Gewerbebetrieb einsetzbarer Geräte verschwindend klein im Vergleich zur Vielzahl der Produkte mit elektrisch angetriebener Kompressionskältetechnik. Aber gerade hier, wo große Stückzahlen in den Markt gehen, könnten durch neue Techniken Marktanteile übernommen werden.

Die bekannten Verfahren wie Absorption, Desiccant-Evaporative-Cooling (DEC) und Adsorption sind, allen voran natürlich die Absorption, im mittleren Leistungsbereich und in der Großkälte etabliert, aber eben nur dort. Dies soll sich nun ändern. Einige große Hersteller arbeiten an thermisch angetriebenen Kältemaschinen und Klimatisierungskonzepten im kleinen Leistungsbereich. Mehrere kleinere Firmen, die sich teilweise noch in der Startup-Phase befinden, bemühen sich mit weniger bekannten Techniken wie z.B. dem Schukey-Motor marktfähige Geräte zu entwickeln.

**Die bekannten Verfahren** | Die Technik der Absorptionskältemaschinen ist gut 100 Jahre alt und heute verfügbare Maschinen können als ausgereift und leistungsoptimiert angesehen werden. Einsatz finden sie oft in der Großkälte wie Brauereien oder Großanlagen, in denen gleichzeitig Heißdampfnetze in Betrieb sind. Neben mit Dampf beheizten Absorbern gibt es auch direktbefeuerte Maschinen, die direkt mit Gas beheizt werden. Der typische Leistungsbereich beginnt bei ca. 300 kW und geht in den Megawattbereich. Maschinen mit kleinen Leistungen unter 100 kW sind kaum zu finden, abgesehen vom sogenannten Campingkühlschrank (oder auch die Hotelminibar), was hier aber nicht weiter beschrieben werden soll. Die Stückzahlen für Absorptionskältemaschinen sind die bei weitem größten unter den thermisch angetriebenen Kältemaschinen, jedoch immer noch klein im Vergleich zu den Stückzahlen von Kompressionskältemaschinen.

Von Adsorption (im Gegensatz zur Absorption) ist zu sprechen, wenn das verdampfende und damit kühlende Kältemittel von einem zweiten flüssigen Medium aufgenommen und in ihm gelöst wird. Dies geschieht in einem kontinuierlichen Prozess. Stoffpaare sind üblicherweise Ammoniak/Wasser mit Ammoniak als verdampfendem Kältemittel, wobei sehr tiefe Kühlmediumtemperaturen erreicht werden können (-30 °C) und Wasser/Lithiumbromid mit Wasser als Kältemittel. Hier sind die Kühlmediumtemperaturen nach unten bei ca. 5 °C begrenzt.

Antriebstemperaturen unter 95 °C zum Austreiben des Kältemittels aus seinem Lösungsmittel führen bei diesen Maschinen zu niedrigen Wirkungsgraden und großen Kälteleistungsverlusten. Zur Rückkühlung werden Nasskühltürme eingesetzt, um Kühlwassertemperaturen von unter 30 °C zu erreichen.

**Das DEC-Verfahren (Desiccant-Evaporative-Cooling oder „offene Sorption“)** | Hier handelt es sich um Geräte aus dem Bereich der Lüftungstechnik, und die Kältetechnik ist integrativer Bestandteil des Lüftungsgeräts.

Beim DEC-Verfahren wird die zu behandelnde Luft zuerst und direkt durch ein auf einem Sorptionsrad aufgebrachtes stark wasserdampfabsorbierendes Medium (Silikagel oder Spezialsalz) tief entfeuchtet und anschließend der Verdunstungseffekt von Wasser zur Kühlung der Luft verwendet.

Das sich drehende Sorptionsrad wird im lufttechnisch getrennten Gegenstrom mit stark erhitzter Luft wieder getrocknet. Insgesamt entsteht dadurch ein kontinuierlicher Kühlprozess. Alle Aufgaben der Luftaufbereitung, Entfeuchten, Kühlen und Nachheizen sind in einer klima-/lüftungstechnischen Anlage integriert.

**Adsorption** | Diese Technik ist bei weitem nicht so verbreitet wie die Absorption. Der Vorgang der Adsorption ist das Anlagern eines dampfförmigen Stoffes an einen Feststoff wie das Aufnehmen von Wasserdampf in Silikagel zur Trocknung. Adsorptionskältemaschinen werden als zyklisch arbeitende Kältemaschinen gebaut und durch die Kombination zweier getrennt regenerierbarer Adsorptionsflächen in einer Maschine entsteht durch zyklisches Umschalten ein quasi-kontinuierlicher Betrieb.

Das verdampfende Kältemittel ist Wasser, der entstehende Wasserdampf wird von

adsorbierenden Stoffen wie Silikagel oder Zeolithen aufgenommen. Ist die Adsorptionskapazität erschöpft, wird das aufgenommene Wasser durch Wärme wieder ausgetrieben. Hierfür reichen Temperaturen von 65 °C, um einen zufriedenstellenden Trocknungseffekt zu erreichen.

**Wärmequellen** | Als Wärmequellen kommen Solarkollektoren oder Blockheizkraftwerke in Frage, auch Prozessabwärme und natürlich Heizungswärme aus erneuerbaren Energien und konventionellen Energieträgern können genutzt werden. Letzteres ist jedoch bei den üblichen Wirkungsgraden der thermisch angetriebenen Kältemaschinen im Bereich von 0,3 bis 0,7 (erbrachte Kälteleistung zu aufgewandter Wärmeleistung) ökonomisch und ökologisch nicht sinnvoll, wie folgende kurze Rechnung mit exemplarisch angenommenen Zahlen zeigt:

Der Preis einer Kilowattstunde elektrische Energie inkl. Nebenkosten und Steuern ist ca. 21 Cent bei Kleinabnehmern. Der Wirkungsgrad einer Kompressionskältemaschine soll hier mit 3,0 angenommen werden. Daraus folgen Kosten für 1 Kilowattstunde Kühlung von 7 Cent.

Im Gegensatz hierzu beträgt der Literpreis für Heizöl inklusive Steuern momentan ca. 70 Cent und die Bruttoheizenergie aus Heizöl kostet damit ca. 7 Cent pro Kilowattstunde. Hat eine Sorptionskältemaschine einen Wirkungsgrad kleiner 1, kann also mit einer Kilowattstunde Heizenergie weniger als eine Kilowattstunde Kühlarbeit verrichten, sind die Verbrauchskosten höher als bei einer elektrisch angetriebenen Kältemaschine.

### Überschüssige Wärmemengen |

Im Sommer entstehen bei Solarthermieanlagen oft große überschüssige Wärmemengen, teilweise müssen die Anlagen zum Schutz vor Überhitzung gekühlt werden. Bei Gewerbebetrieben entsteht oft Prozessabwärme, die im Sommer nur schwer abzuführen ist. Bei dem Betrieb von Blockheizkraftwerken (BHKW) zur Stromerzeugung entsteht immer auch Wärme, für die es aber im Sommer oft keine Abnehmer gibt. Gleichzeitiger Kühlbedarf könnte also sehr wohl unter Verwendung der überschüssigen Wärmemengen, für die keine Verbrauchskosten entstehen, durch eine Sorptionskältemaschine gedeckt werden. Im Falle eines BHKW könnte es sogar wirtschaftlich sein, wenn gleichzeitig großer Bedarf an elektrischer Energie besteht, diese

Leistung auch im Sommer durch das BHKW bereitzustellen und nicht vom Stromversorger zu beziehen.

### Bundesforschungsprojekt im Förderprogramm ZIM-KOOP als VP-Projekt |

(Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im Leistungsbereich von 10 kW Dynamische Rechnersimulationen und Hardware-in-the-Loop-Tests mit den Mini-BHKW der Firmen SenerTec und PowerPlus Technologies und der Sorptionskältemaschine der Firma SorTech – öffentlich finanziert, BMWi, 2009-2012) Anfang 2009 startete das Projekt „Praxistest und Kombiregler einer KWKK-Anlage“ als Verbundprojekt, in dem kleinere und mittlere Unternehmen und Forschungseinrichtungen gemeinsam und technologieübergreifend Feldtests mit Mini-BHKW und Sorptionskältemaschinen durchführen. Ziel des Projekts ist der Nachweis der Dauertauglichkeit des KWKK-Betriebs der Sorptionskältemaschine der Fa. SorTech und der Mini-BHKW der Firmen SenerTec und PowerPlus Technologies unter praxisnahen Bedingungen und die markttaugliche Weiterentwicklung der gemeinsamen Regelung und Hydraulik. Darüber hinaus wird eine neue Art Feldtest aufgebaut in Form eines „Hardware-in-the-Loop“-Prüfstands an der Fachhochschule Düsseldorf.

Die Projektbeteiligten sind:

- SorTech AG, Halle a.d. Saale
- EDL & HV Freischlad GbR, Haiger
- KAS Anlagen GmbH, Henstedt-Ulzburg
- Fachhochschule Düsseldorf, Arbeitsgruppe E<sup>2</sup>, Prof. Dr.-Ing. Mario Adam
- RWTH Aachen, Lehrstuhl für Technische Thermodynamik, AG Sorptionssysteme, Dr.-Ing. Claude Bouvy
- SenerTec Kraft-Wärme-Energiesysteme GmbH, Schweinfurt
- PowerPlus Technologies GmbH, Gera
- Stadtwerke Düsseldorf AG

Lieferant Regelung und Konvektoren:

- Klima- und Anlagentechnik Schindler GmbH

### Feldtest der KWKK-Anlage beim Blumenhaus Bade in Henstedt-Ulzburg |

Für den ersten Feldtest wurde durch die Fa. KAS Anlagen GmbH eine Anlage aus der Sorptionskältemaschine mit trockenem Rückkühler und Klimakonvektoren aufgebaut, die zusammen mit zwei Mini-BHKW die KWKK-Anlage ergeben. Die



Anlage mit Sorptionskältemaschine im Blumenhaus Bade, Henstedt-Ulzburg

Klimatisierung gilt einem Verkaufsraum des Blumenhauses Bade mit Gärtnerei. Tagsüber dient die Anlage der Komfortklimatisierung, nachts wird der Raum verschlossen und auf 14 °C abgekühlt, um die Schnittblumenware frisch zu halten. Die Kühlleistung beträgt im Tagbetrieb 9 kW, im Nachtbetrieb 5 kW. Besonderes Augenmerk galt der Hydraulik in Zusammenhang mit drei drehzahlregulierten Hoch-Effizienz-Pumpen und den besonderen Anforderungen der Mini-BHKW an die Kühlwassertemperaturen.

**Hydraulik**

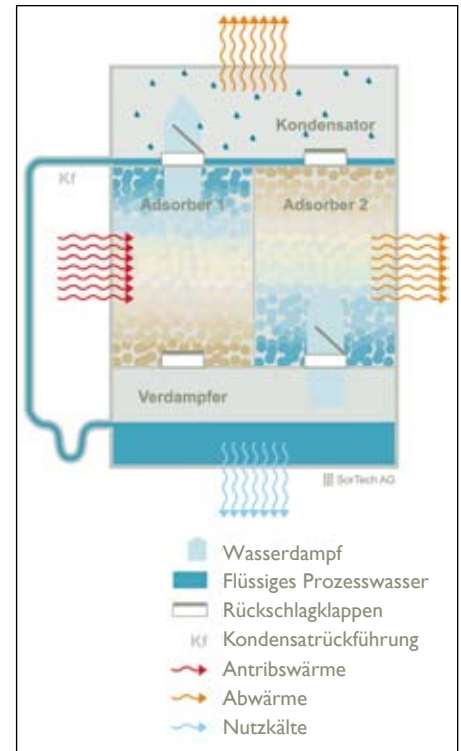
- Der HT-Kreis, der die Antriebswärme für die Sorptionskältemaschine liefert, hat auf der Kältemaschinenseite eine Vorlauftemperatur von 65 °C.
- Der MT-Kreis mit dem Rückkühler zur Wärmeabfuhr an die Außenluft stellt sich über die drehzahlregulierten EC-Ventilatormotoren und die Außentemperatur auf 20 bis max. 35 °C ein. Bei höheren Außen-

temperaturen wird durch die Steuerung der Kältemaschine eine getaktete Besprühung mit Stadtwasser aktiviert. Zum Schutz der Aluminiumlamellen sind diese mit einer Epoxybeschichtung versehen.

- Der NT-Kreis mit den Klimakonvektoren (Fancoils) ist in der Vorlauftemperatur variabel je nach Kühlanforderung aus dem Raum und bewegt sich zwischen 10 °C (höchste Kühlanforderung, Nachtbetrieb) und 20 °C (kleinste Kühlanforderung, Tagbetrieb). An den Klimakonvektoren befinden sich keine Regelventile, die Steuerung der Kühlleistung der Konvektoren wird rein über die Veränderung der Kaltwasser-Vorlauftemperatur realisiert.

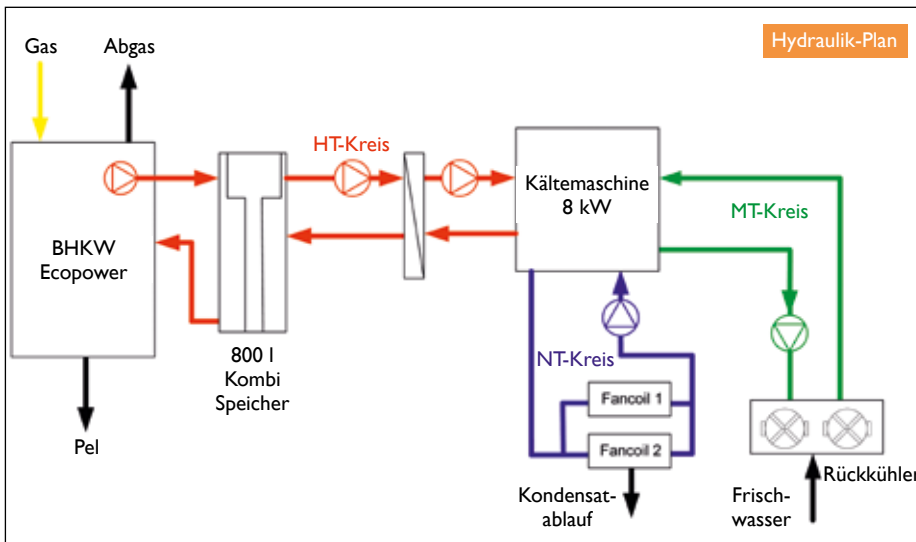
**Regelung**

- Die Kältemaschine besitzt einen eigenen Regler zur Steuerung der internen Ventile, Überwachung der eigenen Sicherheitselemente und Regelung der Rückkühlleistung über die Drehzahl der Ventilatoren des Rückkühlers. Synchronisiert mit den internen Phasen der Adsorption und Desorption (Erwärmung zum Austreiben des aufgenommenen Wassers) gibt die Kältemaschine die Freigabe zum Betrieb der HT- und der MT-Pumpe.
- Die beiden BHKW laufen im Master-Slave-Betrieb und werden über die Temperatur des Heißwasserspeichers angesteuert.
- Die übergeordnete Regelung der Anlage ist in einem zentralen, separaten Schaltkasten aufgebaut, über den auch die elektrische Versorgung der Anlage (mit Ausnahme der BHKW) erfolgt. Zeitgesteuert wird zwischen dem Nachtbetrieb und dem Tagbetrieb umgeschaltet, womit die Sollwertänderung und eine Änderung



Wirkprinzip

der Ventilardrehzahl der Klimakonvektoren verbunden ist. Im Tagbetrieb laufen die Konvektoren aus Komfortgründen mit kleinster Drehzahl, im Nachtbetrieb zur Steigerung der Kühlleistung mit einer höheren Drehzahl. In Abhängigkeit der Kühlanforderung aus dem zu klimatisierenden Verkaufsraum wird der Temperatursollwert für den Kaltwasservorlauf vom Regler im Schaltkasten gebildet und dann über ein gleitendes 0 – 10 V-Signal an die Kältemaschine übergeben. Ist die Solltemperatur im Verkaufsraum erreicht, gehen alle Pumpen und die Kältemaschine außer Betrieb.



**Sorptionskältemaschine** | Die wesentlichen Bauteile der Kältemaschine sind zwei würfelförmige, mit Silikagel beschichtete Wärmetauscher. Unter den beiden Wärmetauschern sitzt der Verdampfer mit reinem Wasser als Kältemittel und dem Kaltwasserwärmetauscher, darüber der Kondensatorwärmetauscher zum Rückkondensieren des Wasserdampfs. Alle vier Bauteile sind in einem gasdichten Edelstahlbehälter untergebracht. Im Inneren des Behälters herrscht tiefes Vakuum bis auf den Wasserdampfdruck. Der Kühlvorgang verläuft vollkommen geräuschfrei, nur die Stellmotoren der außen am Behälter befindlichen Ventile sind manchmal zu hören.

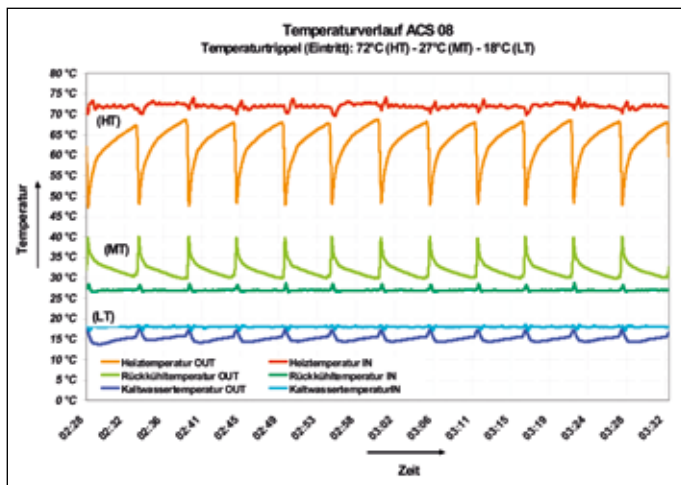
Der Kühlprozess verläuft in vier Phasen:

1. Adsorber 1 wird mit Heißwasser (HT) desorbiert und gibt Wasserdampf zum Kondensator hin ab, Adsorber 2 adsorbiert Wasserdampf, der aus dem Verdampfer kommt. Durch den Adsorptionsprozess entsteht Wärme im Adsorber 2, die zusammen mit der Kondensationswärme am Kondensator über den MT-Kreis an den Rückkühler und dort an die Außenluft abgeführt wird. Durch das Verdampfen des Wassers im Verdampfer entsteht am dortigen Wärmetauscher ein Kühleffekt, der über den LT-Kreis zur Verfügung steht.

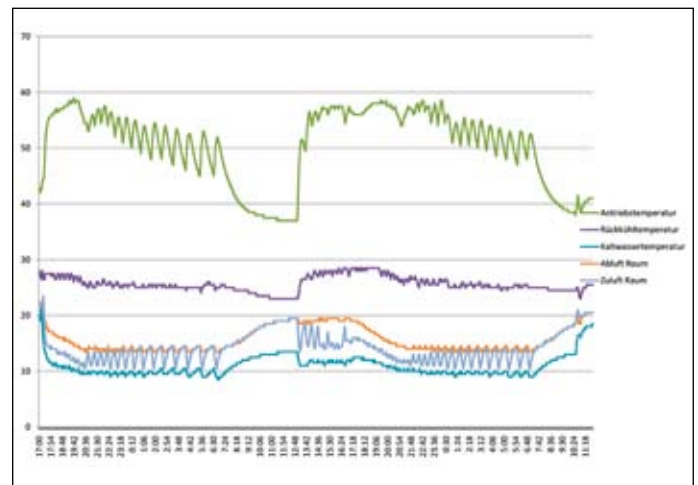
der Kühlbetrieb wieder aufgenommen. Die Anlage läuft seitdem vollkommen automatisch, ohne dass vom Betreiber irgendwelche regelmäßigen Eingriffe notwendig sind. Die mit einfachen Sensoren aufgenommenen Temperaturverläufe über zwei Nächte und einen Tag sind in den beiden Grafiken zu sehen (Tagsollwert 18 °C, Nachtsollwert 14 °C).

**Weitere Projektschritte** | Mit der Installation und Inbetriebnahme der Anlage ist erst ein kleiner Teil des Gesamtprojekts realisiert. Die noch folgenden Projekt-Arbeitspakete sind:

Firmen SenerTec und PowerPlusTechnologies, einer Sorptionskältemaschine von SorTech und einem Pufferspeicher. Dieser Prüfstand wird als „Hardware-in-the-Loop“-Prüfstand rechnergesteuert das Gebäude mit Wärme- und Kälteverteilung, Rückkühler, Anlagenregelung, Nutzerverhalten und sogar das Wettergeschehen am Standort der realen Anlage in Echtzeit simulieren. So wird es möglich sein, den realen Feldtest im Labor nachzustellen und Optimierungen an der Anlage oder deren Regelung im Labor vorab zu untersuchen.



Der Temperaturverlauf der drei Medienströme im Verlauf der vier Phasen



Temperaturverlauf über zwei Nächte und einen Tag

2. Adsorber 1 wird zum Abkühlen mit MT-Temperaturniveau angeströmt, der noch heiße Austritt wird eine kurze Zeit lang noch in den HT-Kreis abgeführt. Der zu desorbierende Adsorber 2 wird mit HT-Temperaturniveau angeströmt, gibt aber kurzzeitig das Restvolumen „kühlen“ MT-Wassers noch in den MT-Kreis ab. Die Phase 2 wird mit Erreichen einer bestimmten Temperaturdifferenz zwischen beiden Adsorberrückläufen beendet.
3. Wie Phase 1 aber mit vertauschten Rollen von Adsorber 1 und Adsorber 2.
4. Wie Phase 2 aber mit vertauschten Rollen von Adsorber 1 und Adsorber 2.

- Aufbau des Monitorings mit Installation einer komplexen Sensorik zur Erfassung aller wesentlichen physikalischen Parameter, um alle Betriebszustände genau und vollständig erfassen zu können. Hierzu wird ein eigener Server installiert werden, um online über das Internet alle Parameter abrufen zu können.
- Aufbau eines Prüfstands an der FH Düsseldorf, Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien und Energieeffizienz, mit BHKW der

Die technischen Probleme bei der Klimatisierung im kleinen Leistungsbereich mit thermisch angetriebenen Kältemaschinen scheinen, zumindest bei den seit langem bekannten physikalischen Verfahren, überwindbar zu sein. Ob dies auch auf der wirtschaftlichen Seite gelingt, bleibt abzuwarten. Noch sind Anlagen dieser Art immer auch Forschungsobjekte und Prototypen. Aber die Zeit arbeitet für diese Technik. Auf wenig ist so viel Verlass wie auf steigende Energiekosten.

**Erste Betriebserfahrungen** | Die Inbetriebnahme der Anlage erfolgte am 11.11.2009 ohne wesentliche Probleme. Anpassungen der Regelung und Erweiterungen an der Steuerung wurden zwar vorgenommen, generell lief die Anlage jedoch störungsfrei, bis die Außentemperaturen weiteren Kühlbetrieb überflüssig machten. Mit dem Ansteigen der nächtlichen Außentemperaturen jetzt im Frühjahr über 5 °C wurde



HiL-Prüfstand für ein vorheriges Projekt mit Wärmepumpen (Quelle: FH Düsseldorf, Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Arbeitsgruppe E<sup>3</sup>)



Der Verkaufsraum mit zwei Klimakonvektoren der Fa. Rhoss