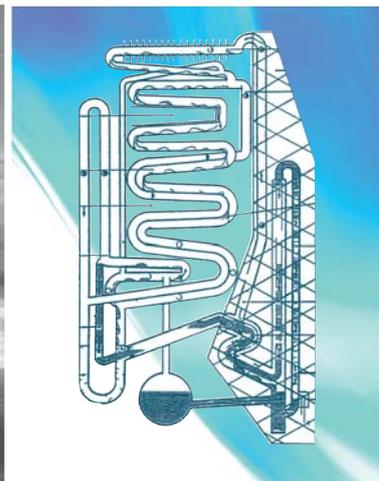


# Österreich Schulungsunterlagen



**Mit uns behalten Sie den Überblick**

**Thema 14:**

**Verfahren zur Kälteerzeugung**

 **SCHIESSL**

## »SIS« INFORMATIONEN-SYSTEM

Das Schiessl Informations-System »SIS« ist mehr als nur ein Shop!

- Alle Produkt-Infos auf einen Blick
- Mit Zubehör und Alternativen
- Schnellsuche und Direktauswahl
- Verfügbarkeit/Lagerstand
- Alle Infos tagesaktuell
- Bequem online bestellen



**BRANDNEU:**  
Laden Sie sich jetzt Ihre Schiessl App fürs Smartphone!

...damit sind Sie immer bestens informiert!



**JETZT EINLOGGEN UNTER**

[www.schiessl.at](http://www.schiessl.at)

[www.schiessl.ch](http://www.schiessl.ch)

[www.schiessl-kaelte.de](http://www.schiessl-kaelte.de)

...fordern Sie noch heute Ihre Zugangsdaten an.



**Mechatroniker**

# **Bundesinnung der Mechatroniker Kälte- und Klimatechnik**

**Herzlich Willkommen  
zu unserer Veranstaltung unter dem Motto**

**Aus der Praxis für den Praktiker-  
"das sollte der Kältemonteur wissen"**

**Thema 14:**

**Verfahren zur Kälteerzeugung**

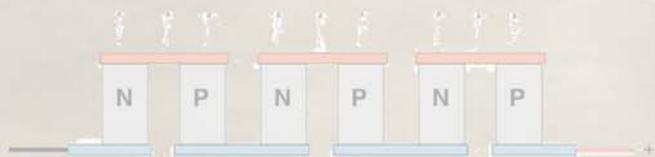
**Referent: Dipl. Ing. Hans-Jürgen Ullrich**

**Diese Schulungsunterlagen wurden zur Verfügung gestellt von**



**SCHIESSL**

**Ihrem zuverlässigen Großhandelspartner**



# Inhalt:

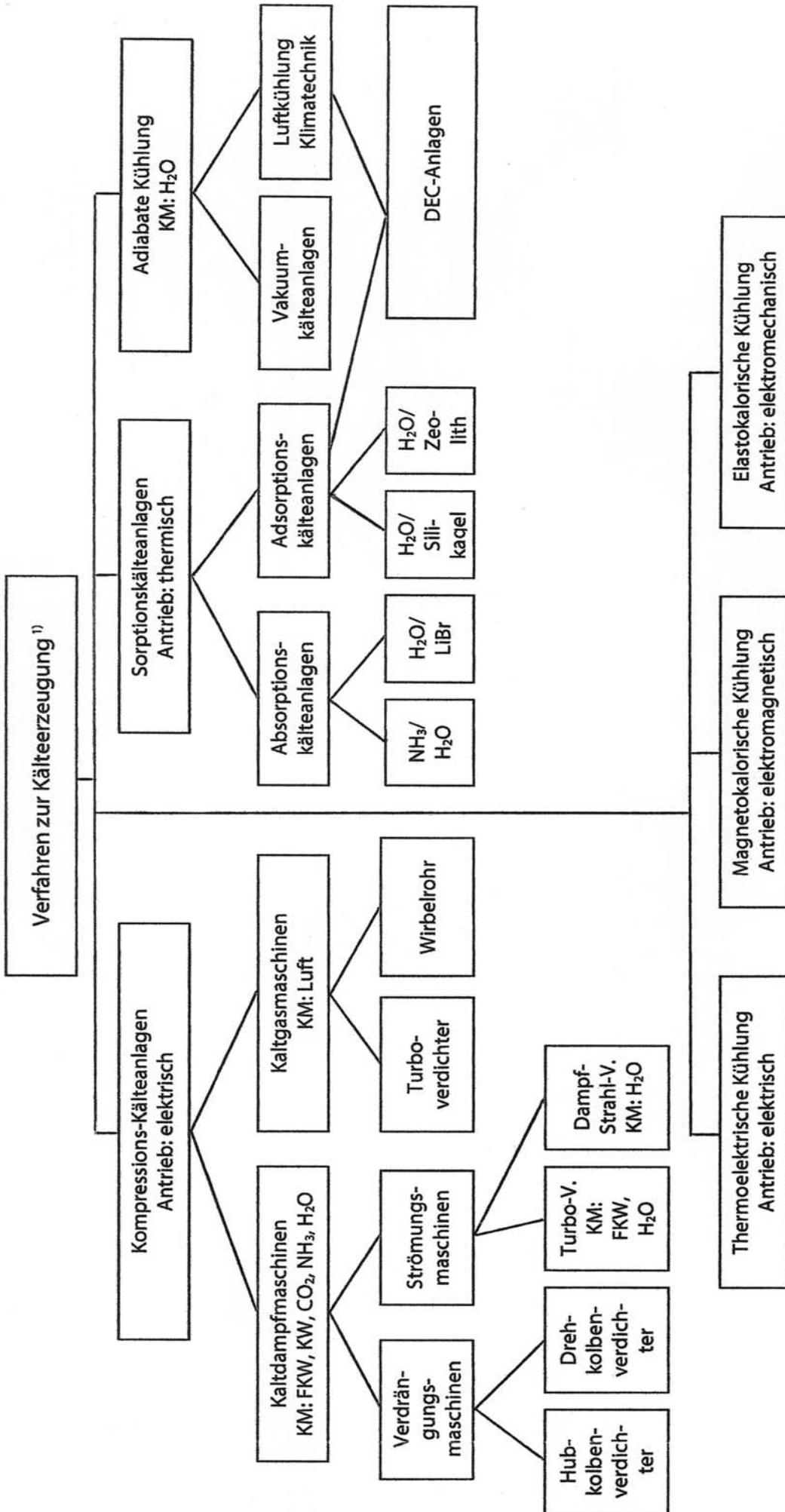
Seite

<b>1.</b>	<b>Kompressionskälteanlagen mit Wasser als Kältemittel</b>	<b>2</b>
1.1	Grundlagen	2
1.2	Anwendungsgebiete	3
1.2.1	Klimatisierung mit Kaltwasser	3
1.2.2	Erzeugung von Binäreis mit der Vakuumeistechnologie	4
<b>2.</b>	<b>Kaltgasmachines</b>	<b>6</b>
2.1	Funktionsweise	6
2.2	Anwendungsbereiche	6
2.3	Versuchsanlage zur Schnellabkühlung von Lebensmitteln	6
2.4	Kaltluftanlage zur Klimatisierung des ICE 3	7
2.5	Klimatisierung von Flugzeugen	8
<b>3.</b>	<b>Das Wirbelrohr</b>	<b>9</b>
3.1	Entwicklungsgeschichte	9
3.2	Aufbau und Funktion	9
3.3	Vorteile von Wirbelrohren	10
3.4	Anwendungsbereiche	11
3.5	Hersteller / Lieferanten	11
<b>4.</b>	<b>Dampfstrahl-Kälteanlagen (DSKM)</b>	<b>12</b>
4.1	Geschichtliche Entwicklung	12
4.2	Funktionsprinzip	12
4.3	Einsatzbereiche	14
4.4	Leistungsregelung von Dampfstrahlkältemaschinen (DSKM)	15
4.5	Vorteile der DSKM	15
4.6	Nachteile von DSKM	15
4.7	Lieferanten von DSKM	
<b>5.</b>	<b>Absorptionskälteanlagen</b>	<b>16</b>
5.1	Geschichtliche Entwicklung	16
5.2	Funktionsprinzip	16
5.3	Antriebsenergien / Heizmedien	17
5.4	Einsatzbereiche	18
5.4.1	NH <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O - Absorptionskälteanlagen	18
5.4.2	H <sub>2</sub> O / LiBr - Absorptionskälteanlagen	19
5.5.	Hersteller und Lieferanten	20
5.5.1	NH <sub>3</sub> / H <sub>2</sub> O - Absorptionskälteanlagen	20
5.5.2	H <sub>2</sub> O / LiBr - Absorptionskälteanlagen	20

# Inhalt:

Seite

<b>6.</b>	<b>Adsorptionskältemaschinen</b>	21
6.1	Funktionsprinzip	21
6.2	Aufbau und Betriebsweise	21
6.3	Vorteile von Adsorptionskältemaschinen	24
6.4	Antriebsenergien / Wirtschaftlichkeit	24
6.5	Einsatzgebiete	25
6.6	Lieferanten und Hersteller	25
<b>7.</b>	<b>Adiabate Kühlung (Verdunstungskühlung)</b>	28
7.1	Funktionsprinzip	28
7.2	Anwendungsgebiete	28
7.3	Adiabate Kühlung der Luft in Klimaanlage	28
7.4	Vakuumkühlung	30
7.4.1	Funktionsprinzip	30
7.4.2	Anwendungsbereiche	30
<b>8.</b>	<b>DEC-Anlagen (Desiccative Evaporative Cooling)</b>	32
8.1	Funktionsprinzip	32
8.2	Beispielanlage	32
<b>9.</b>	<b>Thermoelektrische Kühlung</b>	35
9.1	Funktionsprinzip	35
9.2	Aufbau von thermoelektrischen Batterien	36
9.3	Hauptanwendungsgebiete	36
9.4	Vor- und Nachteile	37
9.5	Lieferanten	37
<b>10.</b>	<b>Die magnetokalorische Kühlung</b>	38
10.1	Funktionsprinzip	38
10.2	Bisherige Entwicklungen	38
10.3	Aufbau von Kühlgeräten	39
10.4	Ausblick	39
<b>11.</b>	<b>Der elastokalorische Kühlprozeß</b>	39



KM = Kältemittel

V = Verdichter

<sup>1)</sup> außer Kryotechnik

# 1. Kompressionskälteanlagen mit Wasser als Kältemittel

## 1.1 Grundlagen

Wasser als Kältemittel ist eine sehr umweltfreundliche Lösung, da Wasser (R718) keinen Treibhauseffekt hat. Die Kälteerzeugung muß im Unterdruckbereich erfolgen. Für einen Verdampfungstemperaturbereich von  $-1^{\circ}\text{C}$  bis  $10^{\circ}\text{C}$  ergibt sich ein Sättigungsdruck von 5,5 bis 9,4mbar gemäß der Dampfdruckkurve des Wassers (Bild 1).

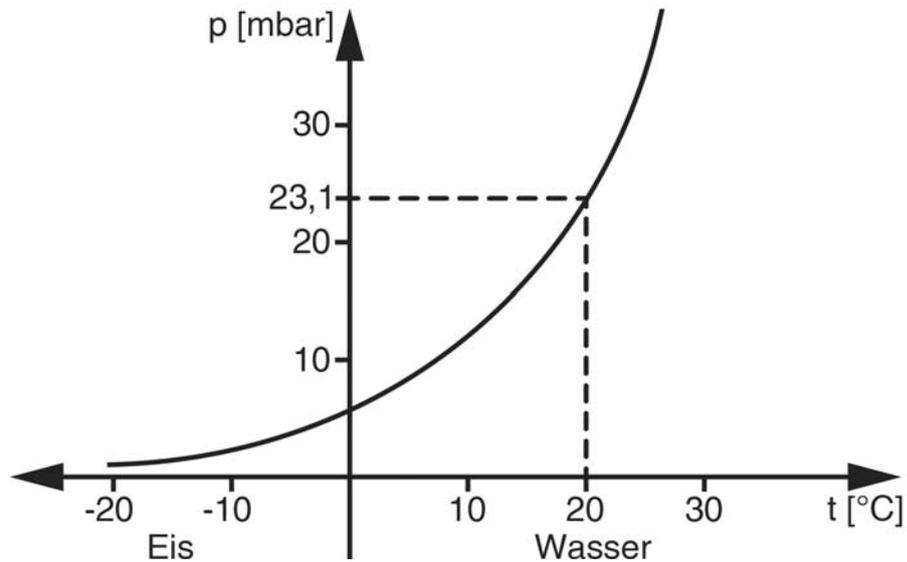


Bild 1: Dampfdruckkurve des Wassers

Im Vergleich zum Kältemittel  $\text{NH}_3$  muß bei gleicher Kälteleistung wegen der geringen Dampfdichte und der geringen volumetrischen Kälteleistung der etwa 300 Mal größere Volumenstrom verdichtet werden. Das Druckverhältnis ist gegenüber  $\text{NH}_3$  doppelt so groß. Deshalb kommen für Kälteanlagen mit Wasser als Kältemittel nur Radialturboverdichter in Betracht. Tabelle 1 zeigt einen Vergleich der Kältemittel Wasser und  $\text{NH}_3$ .

Tabelle 1: Vergleich der Kältemittel Wasser und $\text{NH}_3$ :						
Temperatur	$0^{\circ}\text{C}$		$10^{\circ}\text{C}$		$20^{\circ}\text{C}$	
	Wasser (R718)	Ammoniak (R717)	Wasser (R718)	Ammoniak (R717)	Wasser (R718)	Ammoniak (R717)
Dampfdruck [bar]	0,006	4,3	0,012	6,2	0,023	8,6
Dampfdichte [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]	4,8	3463	9,4	4876	17,3	6710
Volumenbezogene Kälteleistung [ $\text{kJ}/\text{m}^3$ ]	12	4364	23	5966	42	7946
Volumenstrom für 700kW Wälte [ $\text{m}^3/\text{h}$ ]	208000	664	108000	466	59000	352
Druckverhältnis für 25K Temperaturhub	5,2	2,3	4,6	2,2	4,1	2,1

Der Kälteprozeß mit Wasser als Kältemittel ist energetisch sehr effizient.

## 1.2 Anwendungsgebiete

### 1.2.1 Klimatisierung mit Kaltwasser

- Am ILK Dresden wurde ein Kaltwassersatz mit einer Kälteleistung von 700kW entwickelt (Bild 2).

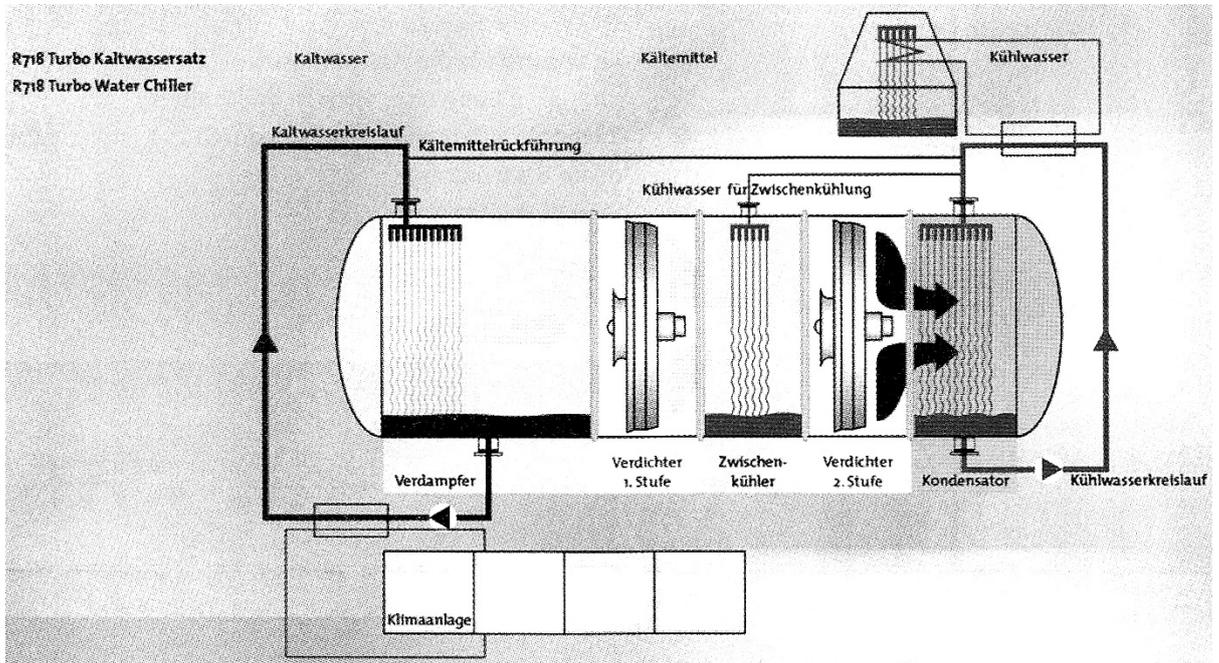


Bild 2: Turbokaltwassersatz des ILK Dresden

Das Kältemittel Wasserdampf wird in 2 Stufen in einem Druckverhältnis von 5,0 verdichtet, anschließend kondensiert der Wasserdampf durch Einsprühen von Kühlwasser. Das kalte Wasser von hohem Druck wird dann in den Verdampfertank entspannt und kühlt sich dabei weiter ab. Es kann jetzt die Wärme aus dem Kaltwasserkreislauf der Klimaanlage aufnehmen.

- Die Efficient Energy GmbH in D-85622 Feldkirchen bei München hat einen Kaltwassersatz mit einer Leistung von 40kW mit dem Kältemittel Wasser entwickelt. Das Wasser wird bei +5°C verdampft.

Herzstück der Geräte ist ein Turboverdichter für Wasserdampf.

## 1.2.2 Erzeugung von Binäreis mit der Vakuumeistechnologie

Binäreis oder Eisbrei ist ein Zweiphasengemisch aus Wasser, kleinen Eispartikeln und einem gefrierpunktsenkendem Stoff wie z.B. Salz, Glykol oder Ethanol. Es ist ein zukunftssträchtiger Kälteträger mit vielen Vorteilen gegenüber herkömmlichen Kühlsolen.

Die Eisbreierzeugung kann auf mechanischem Wege in einem Eisgenerator (Trommelverdampfer) erfolgen. Die Eiskristalle an der Trommeloberfläche werden mit einem Spatel abgeschabt wie bei einem Speiseeisbereiter (Bild 4). Die Anlagen arbeiten mit Verdampfungstemperaturen von  $t_0 = -10$  bis  $-12^\circ\text{C}$ .

Eine andere Methode ist die Vakuumeistechnologie (Bild 3). Die Eisbreierzeugung erfolgt durch Direktverdampfung von Wasser am Tripelpunkt bei 5,5mbar und  $-1^\circ\text{C}$  in einem Vakuumtank. Die zur Erzeugung des Wasserdampfes benötigte Wärme wird dem Wasser im Tank entzogen. Das führt zur Eisbildung. Das Eis-Salzwasser-Gemisch wird in einen Eisspeicher gepumpt, damit Erzeugung und Bedarf entkoppelt werden. Dadurch kann auch günstiger Nachtstrom genutzt werden.

Die Energieeffizienz liegt wegen der hohen Verdampfungstemperatur deutlich höher gegenüber dem Eisgenerator.

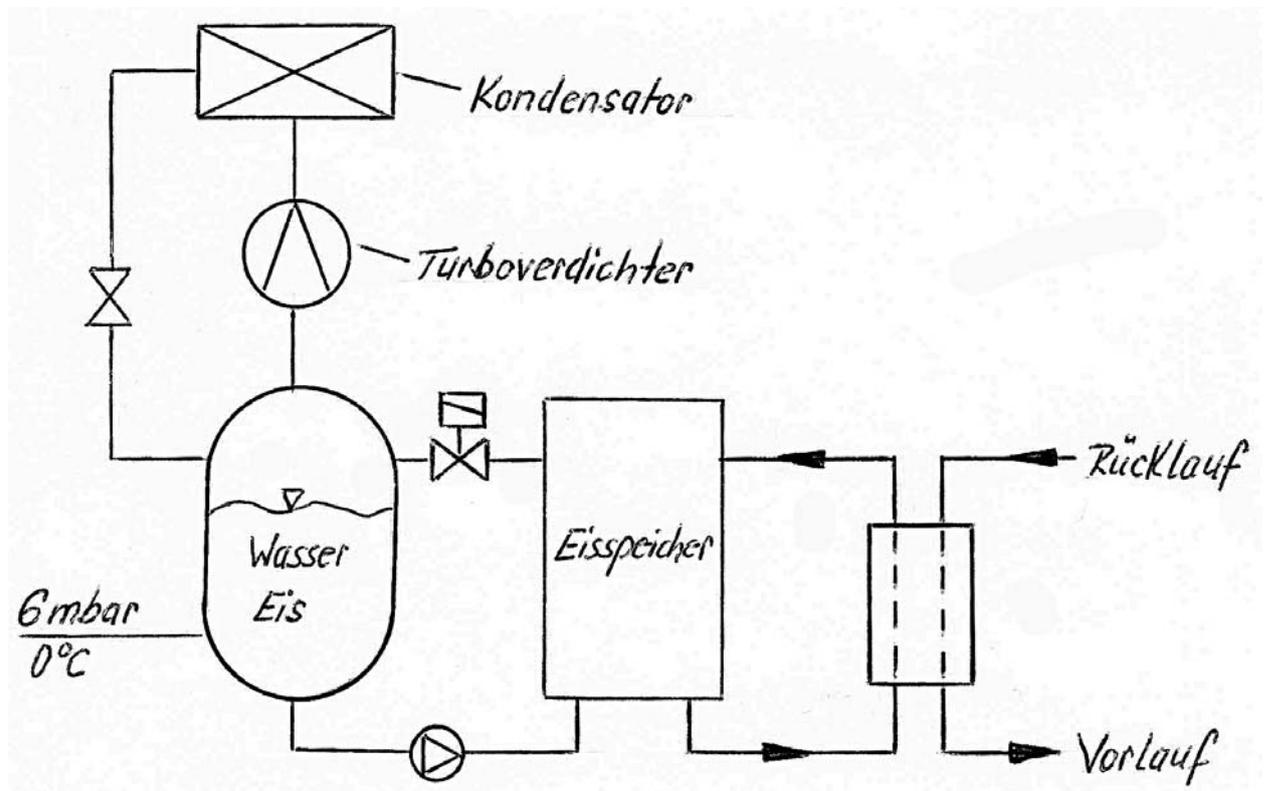


Bild 3: Kreislaufschema einer Vakuumeiserzeugungsanlage

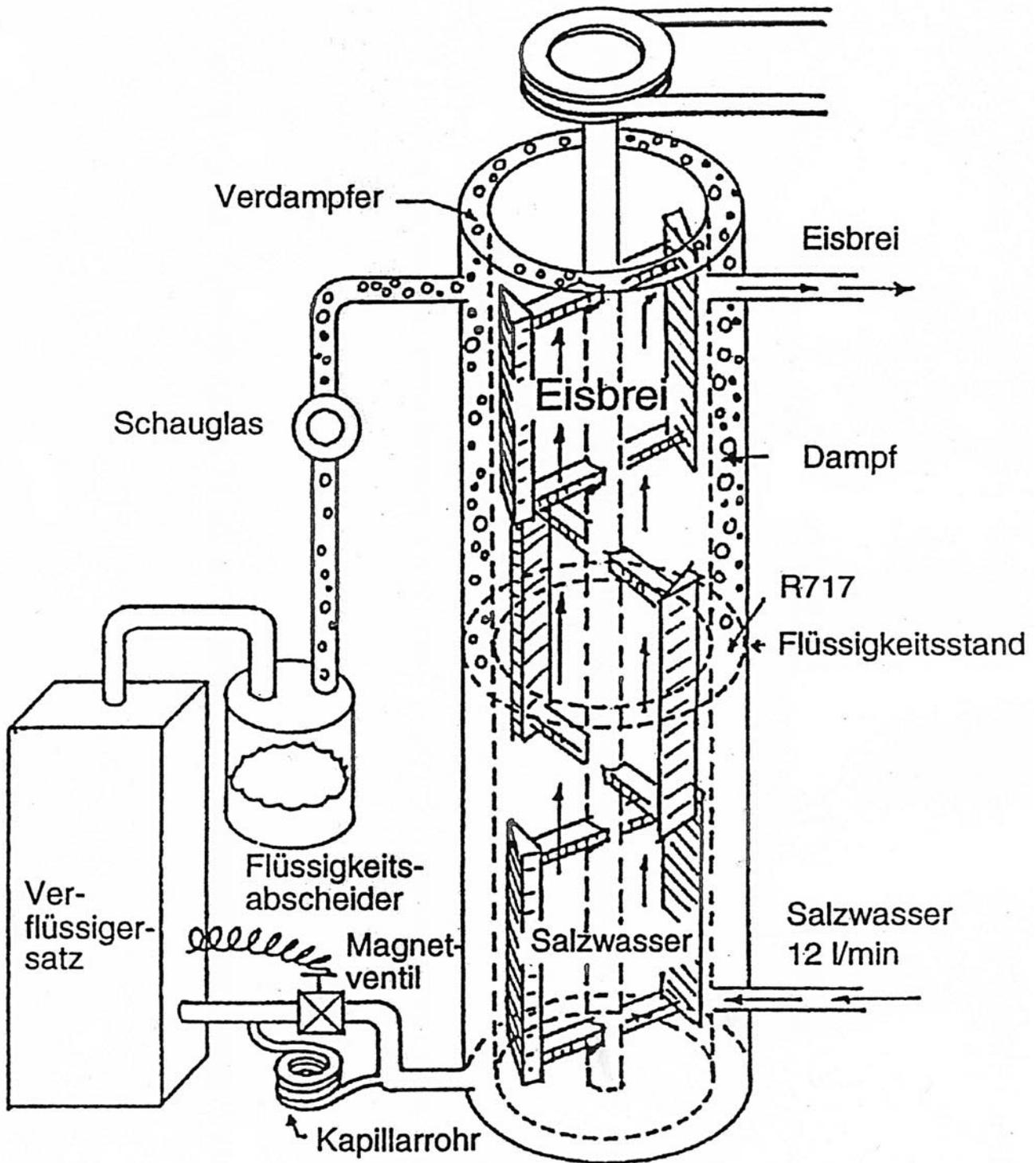


Bild 4: Breieisproduktion auf der Innenseite einer stillstehenden Trommel  
(System Integral)

Die am ILK Dresden entwickelte Anlage hat eine Kälteleistung von 50kW. Der Turboverdichter mit einem Volumenstrom von  $\dot{V} = 5\text{m}^3/\text{s}$  hat einen Laufraddurchmesser von 1,3m und ein Druckverhältnis von  $\pi = 2,5$ .

Die Speicherkapazität des 6m<sup>3</sup> großen Speichers beträgt  $Q = 350\text{kWh}$

## 2. Kaltgasmaschinen

### 2.1 Funktionsweise

Im Gegensatz zu Kaltdampfmaschinen werden Gase verwendet, in der Regel Luft, die im Kälteprozeß nicht verflüssigt werden. Das verdichtete Gas gibt die an der Kühlstelle aufgenommene Wärme in einem Wärmetauscher ab. Bei der anschließenden Entspannung in einer Turbine kühlt sich das Gas weiter ab und kann wieder Wärme aufnehmen. Da die Kälteleistung nur der sensiblen Wärme des kalten Gases entspricht, werden gegenüber dem Kaltdampfprozeß wesentlich größere Massenströme benötigt. Deshalb werden überwiegend Turboverdichter eingesetzt.

### 2.2 Anwendungsbereiche

- Klimatisierung von Schienenfahrzeugen und Flugzeugen
- Versuchsweise zum Schnellabkühlen und Gefrieren von Lebensmitteln
- Tieftemperaturtechnik unter  $-110^{\circ}\text{C}$
- Kryotechnik unter  $-150^{\circ}\text{C}$  zur Gaszerlegung und -verflüssigung

Auf die beiden letzten Anwendungsgebiete wird hier nicht eingegangen.

### 2.3 Versuchsanlage zur Schnellabkühlung von Lebensmitteln

In Bild 5 ist das Kreislaufschema (offener Prozeß) einer Anlage zu sehen. Die Luft wird mit einem Schraubenverdichter aus dem Kühltunnel abgesaugt. Durch Einspritzung von Wasser wird die aufgenommene Wärme abgeführt. Nachdem das Wasser in einem Abscheider abgeschieden ist, erfolgt die Entspannung und Abkühlung der Luft auf  $-50^{\circ}\text{C}$ . Mit dieser kalten Luft erfolgt die Schnellablühlung oder das Gefrieren der Lebensmittel im Kühltunnel. Energetisch sinnvoll ist dieser Prozeß nur bei Temperaturen unter  $-45^{\circ}\text{C}$ .

Ergebnis der Versuchsanlage:

- Schnellabkühlung von Fertiggerichten:  $+70^{\circ}\text{C} \Rightarrow +10^{\circ}\text{C}$  (35 min)
- Gefrieren von Waren:  $+20^{\circ}\text{C} \Rightarrow -20^{\circ}\text{C}$  (60 min)

$$\text{COP} = 1,5$$

Ein 2-stufiger Verdichter mit R507/R404A und Flüssigkeitsunterkühlung hat bei  $t_o = -55^{\circ}\text{C} / t_k = +40^{\circ}\text{C}$  nur einen  $\text{COP} = 0,7$ .

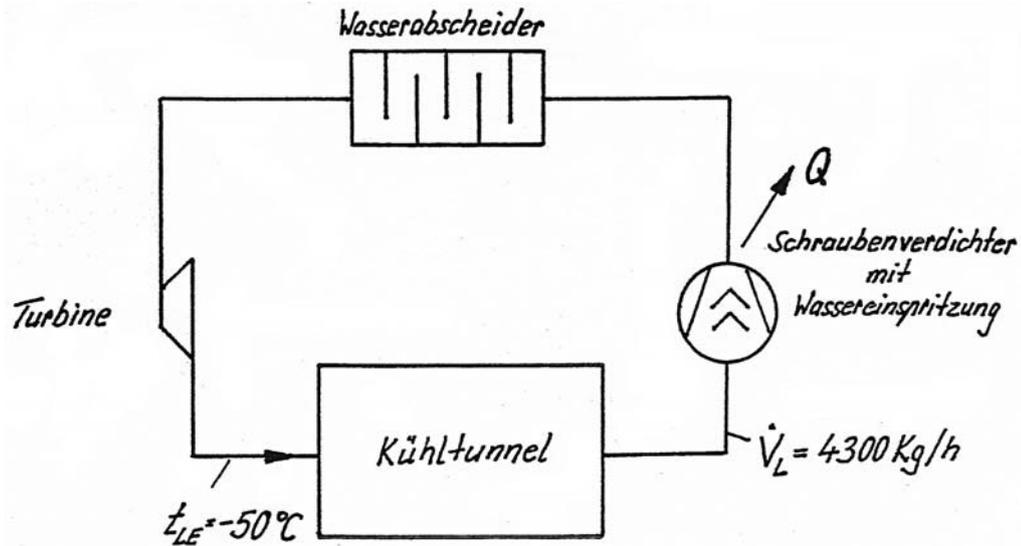


Bild 5: Versuchsanlage zur Schnellabkühlung von Lebensmitteln

## 2.4 Kaltluftanlage zur Klimatisierung des ICE 3

Das Kühlaggregat für die Klimatisierung der Fahrgastkabinen des ICE3 der DB wird von der Fa. Liebherr in Korneuburg bei Wien produziert. Die kompakte Einheit besteht aus einem radialen Turboverdichter, AC Synchronmotor und Turbine auf einer Welle. Dadurch kann die bei der Entspannung der Luft in der Turbine gewonnene Energie gleich wieder für den Antrieb des Verdichters genutzt werden (Bild 6).

### Technische Daten der Kompakteinheit:

AC Synchronmotor: 40kW

1stufiger Radial-Turboverdichter

Kälteleistung: 33kW

Drehzahl: 40000min<sup>-1</sup> mit Frequenzumrichter

Magnetlager, kein Schmiermittel

Gewicht: 80kg

Prozeßluftstrom: 2500m<sup>3</sup>/h

Zuluft zur Fahrkabine: 3000m<sup>3</sup>/h

COP ähnlich einer R134a-Kälteanlage

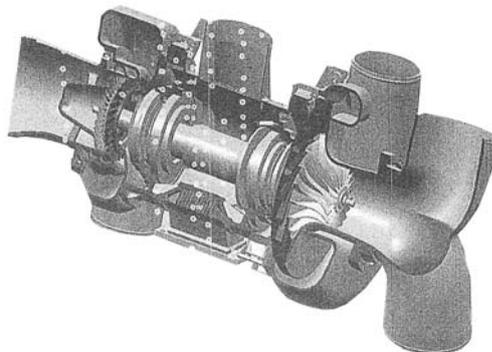


Bild 6: Kälteaggregat des ICE3

Die erste Version war eine Kaltgasmaschine mit geschlossenem Prozeß mit außenliegendem Wärmetauscher. Die zweite Version wurde im offenen Prozeß ausgeführt. Damit entfällt der äußere Wärmetauscher und damit auch die jährliche Wartung.

Bild 7 zeigt das Kreislaufschema und das T,s-Diagramm des Prozesses.

Geschlossener Prozeß (Überdruck):

Der Verdichter K saugt die Luft vom Zustand III aus dem Wärmetauscher an und verdichtet sie bei gleichzeitiger Erwärmung auf ca +100°C.

Die Wärme wird in einem äußeren Wärmetauscher abgegeben und die Luft kühlt sich vom Zustand IV auf I ab. Bei der Entspannung in der Turbine auf den Zustand II kühlt sich die Luft stark ab und kann im Wärmetauscher die Wärme aus der Zuluft für die Passagierkabine aufnehmen.

Offener Prozeß (Unterdruck):

Die angesaugte Umgebungsluft entspannt in der Turbine auf 0,5bar Unterdruck und kühlt sich dabei auf etwa 0°C ab. Sie kann im Wärmetauscher die Wärme aus der Zuluft aufnehmen. Der Verdichter verdichtet die Luft auf Atmosphärendruck. Die Luft wird in die Umgebung gefördert und gibt dabei die Wärme ab.

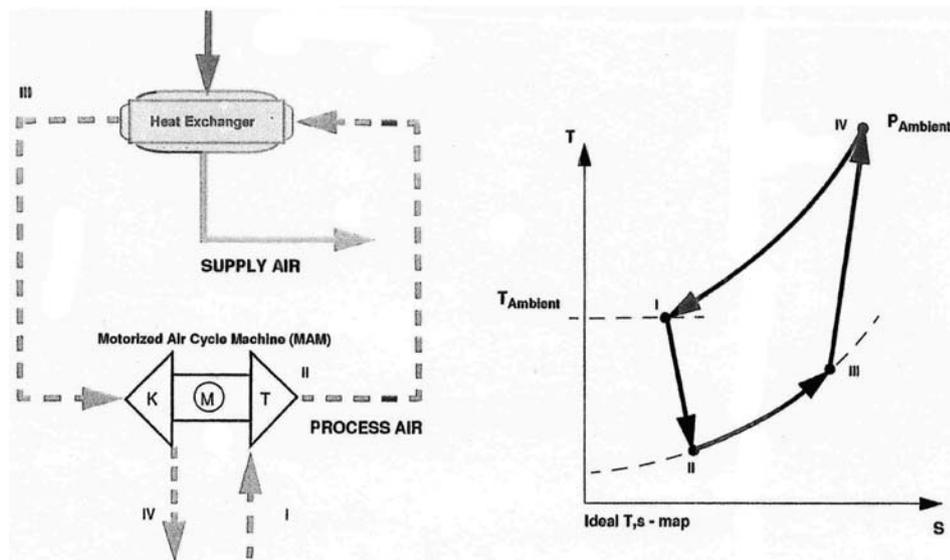


Bild 7: Kreislaufschema und T,s-Diagramm der Kaltgasmaschine im offenen Prozeß

Die Zulufttemperatur von ca +12°C ist abhängig von der Zuluftmenge. Sie wird über die Drehzahl des Verdichters geregelt.

## 2.5 Klimatisierung von Flugzeugen

Die Klimatisierung von Passagierflugzeugen basiert auch auf dem Kaltluftprozeß. Dabei wird Zapfluft aus dem Axialverdichter des Triebwerkes genutzt, die in einem Stauluftkanal durch die Umgebungsluft abgekühlt wird. Die weitere Abkühlung erfolgt durch die Entspannung in einer Turbine. Über die Klimaanlage muß aber nicht nur die gewünschte Kabinentemperatur (+21°C bis +27°C), sondern auch der Kabinendruck für den Flug- und Bodenfall (750 bis 1013 mbar) sowie die Luftfeuchtigkeit realisiert werden und das bei unterschiedlichen Klimazonen.

### 3. Das Wirbelrohr

#### 3.1 Entwicklungsgeschichte

Das Wirbelrohr, auch bekannt als Ranque-Hilsch-Wirbelrohr, ist eine Vorrichtung, mit der ein Luftstrom in einen heißen und einen kalten Strom aufgeteilt werden kann. Es wurde 1933 vom französischen Physiker Georges J. Ranque erfunden. Der deutsche Physiker Rudolf Hilsch verbesserte die Konstruktion. Das Wirbelrohr ist eine spezielle Art einer Kaltgasmaschine.

#### 3.2 Aufbau und Funktion

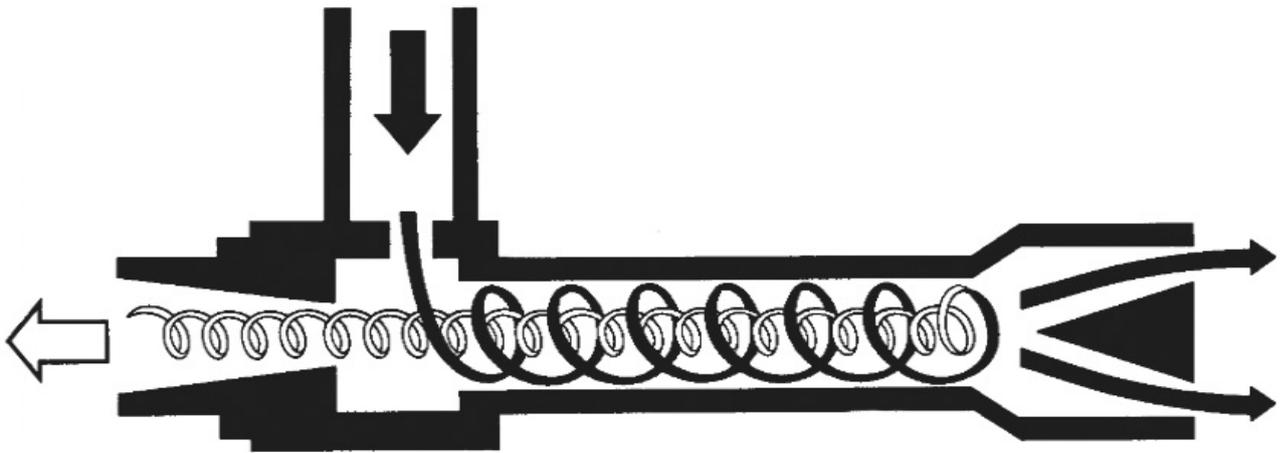


Bild 8: Funktionsprinzip des Wirbelrohres

Gewöhnliche Druckluft (5,5 - 6,9 bar) wird tangential in die Wirbelkammer eingeblasen, mithilfe eines Generators in schnelle Rotation versetzt und strömt entlang der Außenwand zum heißen Ende und tritt hier durch eine große Bohrung zum Teil als heiße Luft aus. Der andere Teil strömt durch das Zentrum zurück, kühlt sich durch Entspannung ab und verläßt durch eine kleine, zentrale Bohrung als kalte Luft das Rohr (siehe Bild 8).

Die Temperatur der kalten Luft kann durch ein Ventil am heißen Ende eingestellt werden. Öffnet man das Ventil verringert sich der Kaltluftstrom und die Temperatur sinkt (Bild 9).

Optimale Kühlleistungen werden bei industriellen Anwendungen bei einem Kaltluftanteil von 60 bis 80% erreicht.

- Temperaturabsenkung  $\Delta t = 40$  bis  $50$  K, Kaltlufttemperatur bis  $-46^\circ\text{C}$
- Sehr niedriger Wirkungsgrad gegenüber anderen Kühlverfahren

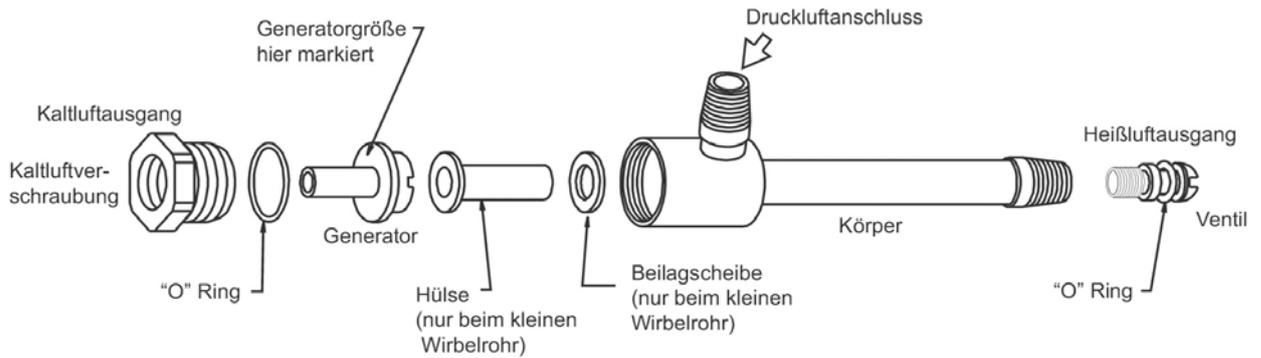


Bild 9: Aufbau eines Frigid-X Wirbelrohres

Tabelle 2 zeigt Temperaturabfälle und Kälteleistungen von Vortec-Wirbelrohren, Temperaturabsenkung um weitere 11 K möglich.

Tabelle 2: Leistungsdaten von Vortec-Wirbelrohren			
Modell	Temperaturabfall	Kälteleistung <sup>1)</sup>	Luftverbrauch
	[°C]	[W]	[L / min]
106 BSP - 2H	34	29	57
106 BSP - 4H	44	74	113
106 BSP - 8H	45	117	227
208 BSP - 11H	47	187	312
208 BSP - 15H	47	264	425
208 BSP - 25H	37	440	708
308 BSP - 35H	42	777	992
328 BSP - 50H	44	879	1416
328 BSP - 75H	47	1319	2125
328 BSP - 100H	43	1758	2833

<sup>1)</sup> Bei Druckluft 6,9bar von 21°C, Taupunkt -40°C

### 3.3 Vorteile von Wirbelrohren

- Keine beweglichen Teile
- Klein, leicht und mobil einsetzbar
- Arbeitet mit Luft als Antrieb
- Niedrige Kosten
- Wartungsfreier Betrieb
- Korrosionsbeständig - Edelstahl

### 3.4 Anwendungsbereiche

Zur Punkt- und Gehäusekühlung im Industriebereich.

- Kühlung elektronischer Steuerungen
- Kühlung von Bearbeitungsvorgängen
- Kühlung von CCTV-Kameras
- Einstellung von Schmelzklebstoffen
- Kühlung von Schweißeinheiten
- Kühlung von Gasproben
- Kühlung elektronischer Bauteile
- Kühlung von Wärmeversiegelungen
- Kühlung von Klimakammern

### 3.5 Hersteller / Lieferanten

Frigid-X Wirbelrohre:

WDK Walter Krupp Dieseltechnik GmbH  
Gödertzgarten 38, D-53340 Meckenheim



+49 2225 92010



+49 2225 17532

info@wkd.de

www.NexFlow.de

Vortex Tubes:

**EXAIR Corporation**

11510 Goldcoast Drive, Cincinnati / Ohio

Vertrieb durch:

**Ziegner + Frick GmbH**

Schillerstraße 50, 74248 Ellhafen

 07134/139920



Bild 10: Frigid-X Wirbelrohre

## 4. Dampfstrahl-Kälteanlagen (DSKM)

### 4.1 Geschichtliche Entwicklung

Die Anwendung von Dampfstrahlverdichtern mit dem Kältemittel Wasser für Kühlzwecke ist seit langem bekannt. Bereits 1884 wurde das Verfahren zum Patent angemeldet. Die erste brauchbare Maschine wurde 1910 von Leblanc gebaut. Erste Anlagen wurden in der chemischen Industrie und auf Kriegsschiffen zur Munitionskühlung eingesetzt.

### 4.2 Funktionsprinzip

Die Dampfstrahlkältemaschine ist ein thermisch angetriebener Verdichter. Er besteht aus der Treibdüse, der Saugdüse, der Mischkammer und dem Diffusor. Als Kältemittel dient Wasser, d.h. die Anlagen arbeiten im Vakuumbereich von etwa 10 bis 50mbar. Als Antrieb dient Treibdampf von 1,5 bis 15,0 bar bei 110°C bis 150°C (Bild 11).

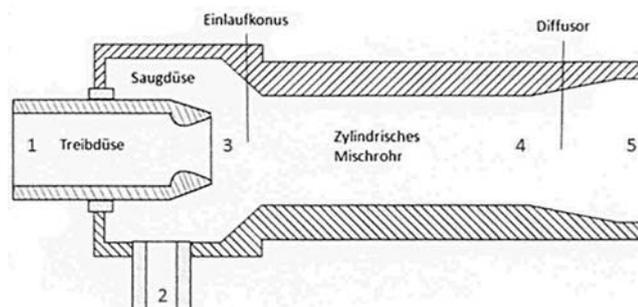


Bild 11: Schema eines Dampfstrahlverdichters

Der vom Dampferzeuger mit hohem Druck kommende Treibdampf wird in der Treibdüse bis auf Schallgeschwindigkeit beschleunigt. Dabei sinkt der statische Druck unter den Verdampferdruck, sodass ständig Kältemitteldampf aus dem Verdampfer über die Saugdüse 2 angesaugt wird. Geschwindigkeit und Druck beider Dampfströme gleichen sich in der Mischkammer 4 an. Im anschließenden Diffusor 5 wird durch die Verzögerung der Strömungsgeschwindigkeit ein so hoher statischer Druck aufgebaut, dass im nachgeschalteten Kondensator der Wasserdampf wieder verflüssigt werden kann.

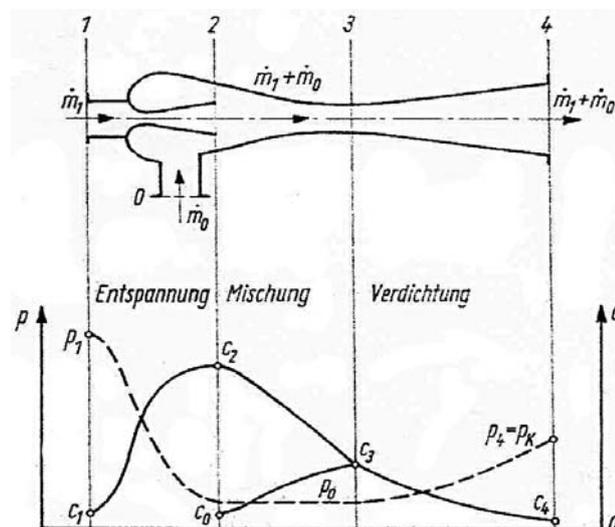


Bild 12: Geschwindigkeits- und Druckverlauf im Dampfstrahlverdichter

Dampfstrahlkälteanlagen werden in der Regel 1 bis 3-stufig in Brückenbauweise (Verdampfer und Kondensator nebeneinander stehend) oder in Turmbauweise (Verdampfer und Kondensator übereinander stehend) ausgeführt. Vorteilhaft ist die barometrische Aufstellung (ca. 11 m hoch), um einen freien Ablauf von Kaltwasser und Kondensat (ohne Pumpe) zu erreichen. Bild 13 zeigt das Kreislaufschema und Bild 14 typische Parameter einer Dampfstrahlkälteanlage.

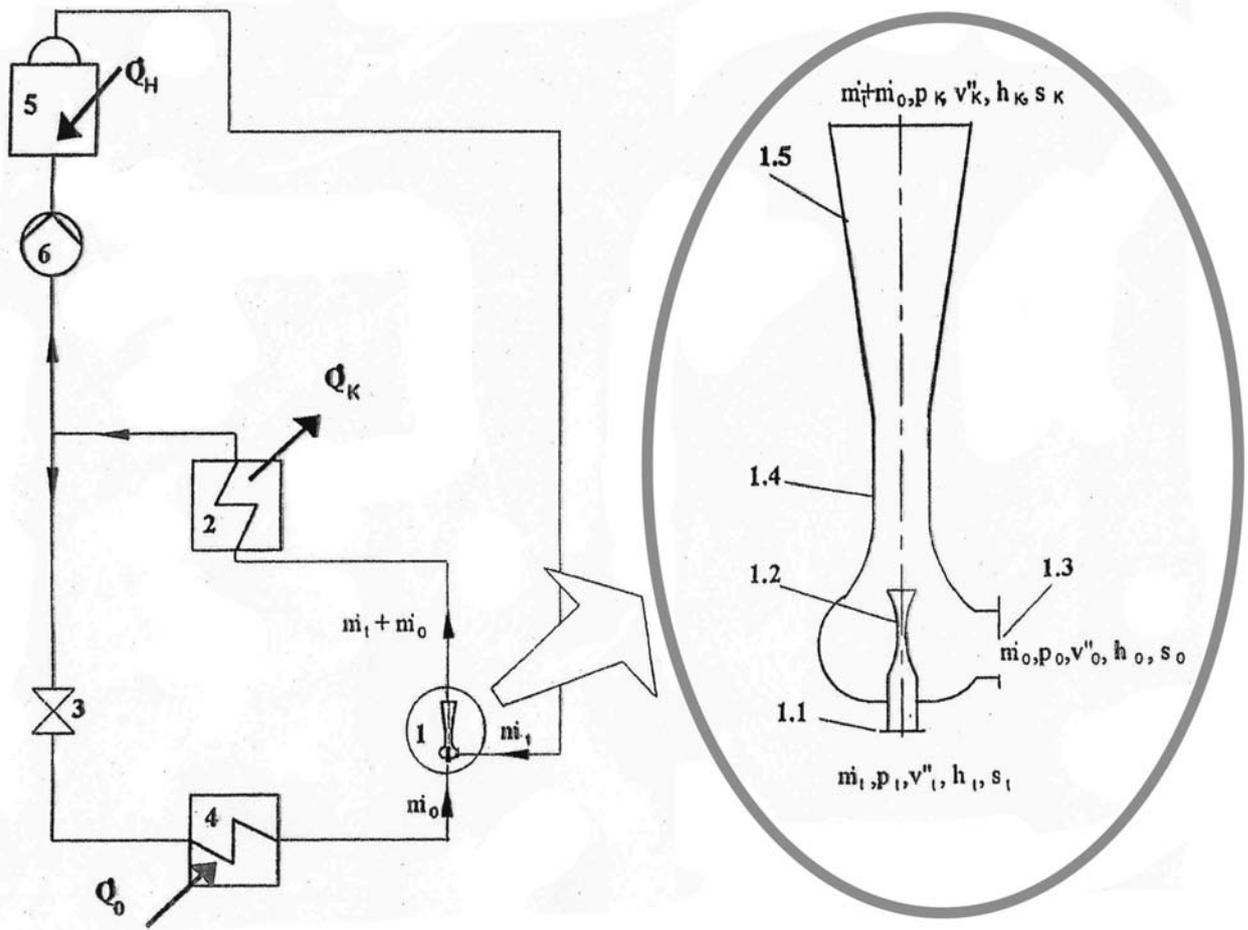


Bild 13: Prinzipschaltung einer Dampfstrahlkälteanlage mit Erläuterung der Einzelheiten eines Dampfstrahlverdichters.

- |     |                       |   |                   |
|-----|-----------------------|---|-------------------|
| 1   | Dampfstrahlverdichter | 2 | Verflüssiger      |
| 1.1 | Treibdampfstutzen     | 3 | Drosselventil     |
| 1.2 | Treibdüse             | 4 | Verdampfer        |
| 1.3 | Saugstutzen           | 5 | Dampfzeuger       |
| 1.4 | Mischaum              | 6 | Speisewasserpumpe |
| 1.5 | Diffusor              |   |                   |

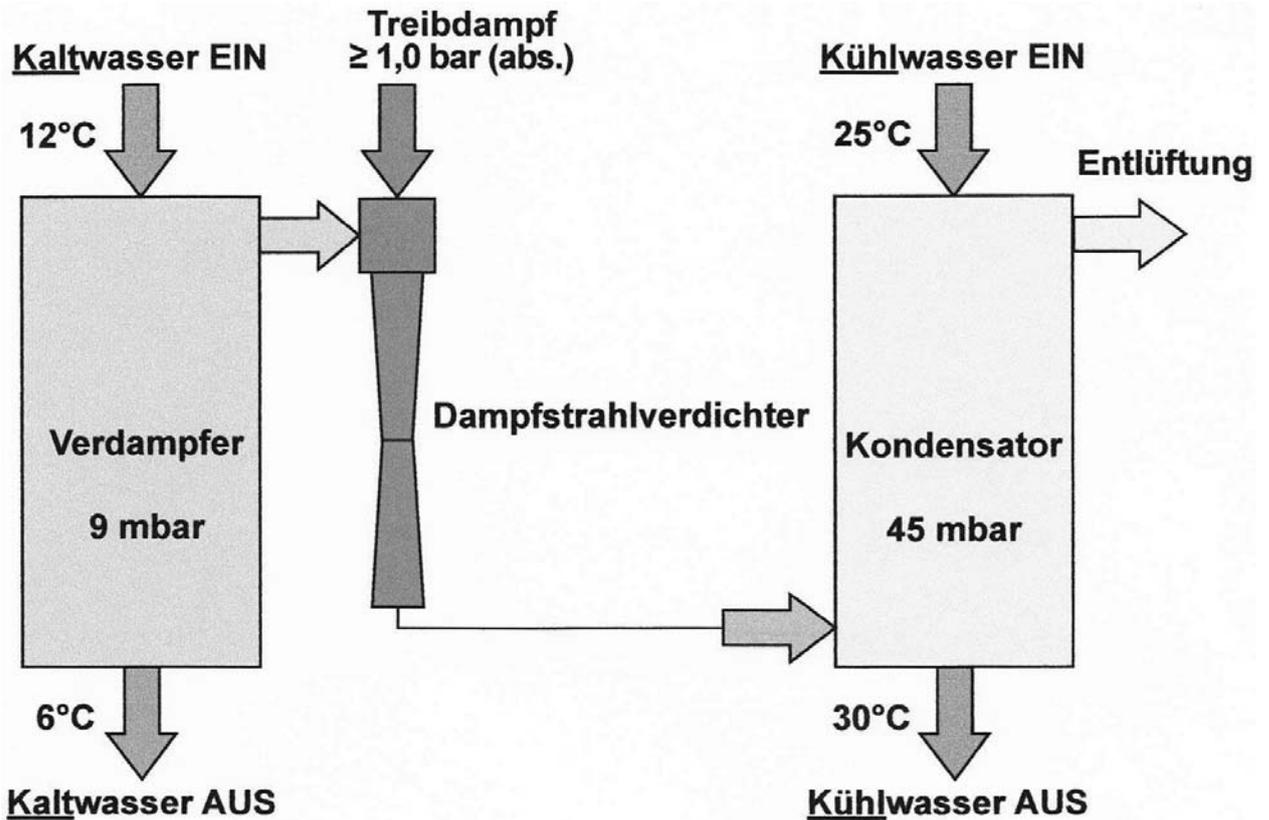


Bild 14: Typische Parameter einer Dampfstrahlkälteanlage

### 4.3 Einsatzbereiche

Wo günstig Prozeßdampf, Abdampf und Abwärme zur Verfügung stehen, z.B. chemische Industrie, BHKW, Dampf aus Fernwärmenetzen, Heizkraftwerke, Parabol-Solarkollektoren.

Tabelle 3 zeigt typische Einsatzgebiete und Kälteleistungen von Dampfstrahlkälteanlagen.

Tabelle 3: Einsatzbereiche von Dampfstrahlkälteanlagen			
Industriezweig	Kälteleistung	Endtemperaturen	Kaltwassermenge
	[kW <sub>th</sub> ]	[°C]	[m <sup>3</sup> / h]
Zellstoffindustrie	407 - 3721	4 - 19,5	13 - 200
Lebensmittelindustrie	262 - 5232	15 - 55	4 - 750
Chemische Industrie	40 - 58140	5 - 98	2,5 - 2800
Stahlindustrie	6 - 1500	5 - 25	1 - 40
Klimatisierung	280 - 18140	6 - 10	40 - 1560
Sonstige Industrie	29 - 21350	0 - 95	1 - 1207

Es werden auch Anlagen mit Temperaturen unter 0°C realisiert, z.B. zur Eiserzeugung im Bergbau. Auch wurden Kältezentralen mit einem Fernkältenetz mit Kaltwasser realisiert.

## 4.4 Leistungsregelung von Dampfstrahlkältemaschinen (DSKM)

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht verschiedener Arten der Leistungsregelung.

<b>Tabelle 4: Übersicht über die verschiedenen Arten der Leistungsregelung</b>					
Regelbereich	0 - 100 %	0 - 100 %	50 - 100 %	50 - 100 %	85 - 100 %
Effizienz	Bei Teillast zunehmend auf absinkender Kondensator-drücke	Bei Teillast unterproportional abnehmend	Bei Teillast unterproportional abnehmend	Abnehmend	Abnehmend
Eigen-schaften	Nicht stetig regelbar Dampfbedarf ist proportional der Strahleranzahl	Stetige Regel-möglichkeit Dampfbedarf leicht über Drosselregelung abnehmend	Stetige Regel-möglichkeit Dampfbedarf leicht über Drosselregelung abnehmend	Selbst-regulierung Dampf-verbrauch nahezu konstant	Nur einge-schränkte Regelungs-möglichkeit

## 4.5 Vorteile der DSKM

- Kältemittel / Antriebsmedium: Wasserdampf
- 100% umweltfreundliche Technologie
- Hohe Betriebssicherheit - DSKM ohne bewegliche Teile
- Einfache Bedienung, gutes dynamisches Betriebsverhalten
- Problemlos größere Kälteleistungen realisierbar
- Geringer Wartungsaufwand
- Günstige Investitionskosten
- Niedrige Betriebskosten bei kostengünstig zu beziehender Energie

## 4.6 Nachteile von DSKM

- Hoher Treibdampfverbrauch
- Hoher Kühlwasserverbrauch, da nur geringe Kühlwassererwärmung möglich
- Schmalere Temperaturbereich für den Einsatz

## 4.7 Lieferanten von DSKM

- Integral Energietechnik GmbH, Flensburg
- Körting Hannover AG, Hannover
- GEA Jet Pumps GmbH, Ettlingen
- G.U.N.T. Gerätebau GmbH, Barsbüttel

## 5. Absorptionskälteanlagen

### 5.1 Geschichtliche Entwicklung

- 1777 - Das Prinzip der Absorption wurde entdeckt
- 1810 - John Leslie entwickelt eine Absorptionskälteanlage mit dem Stoffpaar Wasser / Schwefelsäure
- 1850 - Edmond Carre baut industriell eine Eismaschine mit Wasser / Schwefelsäure
- 1859 - Edmond Carre meldet das Grundpatent zum Arbeitsstoffpaar  $\text{NH}_3$  / Wasser an
- 1869 - Firma Vaaß + Littmann in Halle liefert erste Absorptionskältemaschinen
- 1927 - Das erste Absorptions-Kühlschrank kommt in Deutschland auf den Markt
- 1945 - Carrier baut die erste große LiBr/Wasser - Absorptionskälteanlage

### 5.2 Funktionsprinzip

Wie bei einer Kompressionskälteanlage verfügt die Absorptionskälteanlage über einen Verflüssiger, einen Verdampfer und ein Drosselventil. Der mechanische Verdichter wird durch einen sogenannten thermischen Verdichter ersetzt. Dieser besteht aus einem Absorber, einem Austreiber (Kocher) sowie einer Lösungspumpe und einem Lösungsventil zur Überwindung der Druckunterschiede im Lösungsmittelkreislauf.

Verwendete Arbeitsstoffpaare:

- Ammoniak / Wasser
- Wasser / Lithiumbromid

Bild 15 zeigt das Schema einer Absorptionskältemaschine.

Der im Verdampfer entstehende Kältemitteldampf ( $\text{NH}_3$  oder  $\text{H}_2\text{O}$ ) gelangt in den Absorber und wird dort bei niedrigem Druck von der armen Lösung ( $\text{H}_2\text{O}$  oder LiBr) absorbiert (aufgesaugt). Die reiche Lösung wird in den Austreiber gepumpt. Dort wird durch Zufuhr von Wärme das Kältemittel bei hohem Druck ausgetrieben. Die arme Lösung strömt über ein Drosselventil zurück in den Absorber. Der entstehende Kältemitteldampf wird im Verflüssiger verflüssigt. Das flüssige Kältemittel entspannt im Drosselventil und kann dann im Verdampfer verdampfen und Wärme aufnehmen. Zur Verbesserung der Leistungsziffer werden im Lösungsmittel- und Kältemittelkreislauf Wärmetauscher eingesetzt.

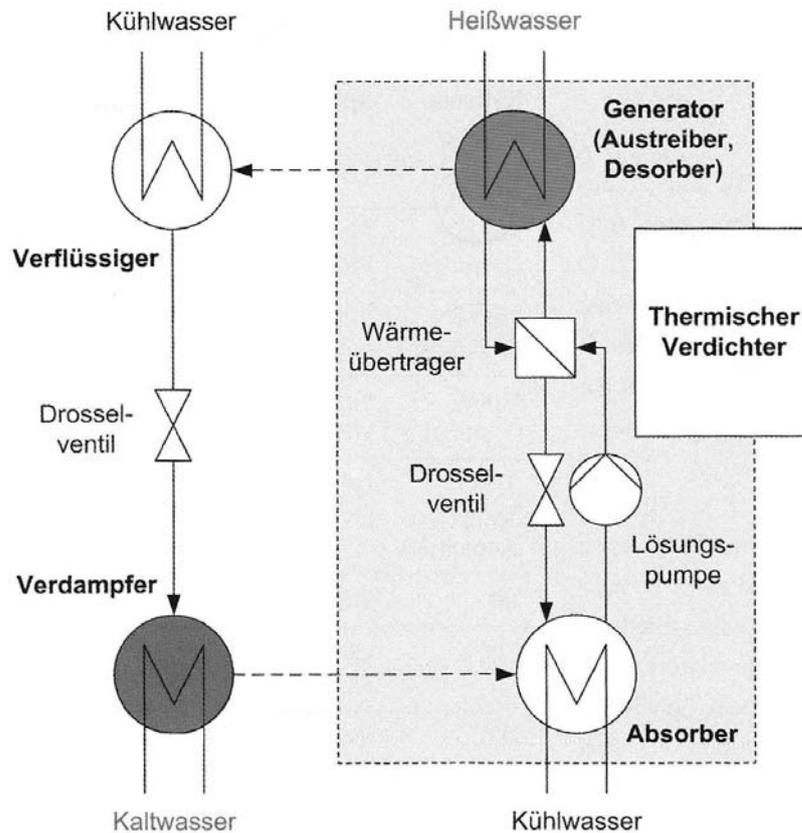


Bild 15: Schema einer Absorptionskältemaschine

### 5.3 Antriebsenergien / Heizmedien

Die Leistungsziffer der Absorptionskälteanlage ist etwa 30% schlechter als die einer Kompressionskälteanlage und liegt 1-stufig bei einem COP von 0,6 bis 0,75.

Der Einsatz ist deshalb nur sinnvoll, wenn preisgünstig Antriebsenergie zur Verfügung steht:

- Elektroenergie (nur im Leistungsbereich bis etwa 500 Watt für Kühlgeräte im Campingbereich und Minibars)
- Abwärme: Von Diesel- und Gasmotoren in BHKW's, Gasturbinen, Industrieprozessen (Brennofen-, Trockungs-, Schmelzprozesse), Druckereien, Müllverbrennungsanlagen
- Abgasnutzung in der chemischen und petrochemischen Industrie
- Abdampfnutzung von Dampfturbinen und Feinwärmenetzen
- Direktbefuerung mit Gas, Öl oder Hackschnitzeln
- Solarkollektoren (
 

Röhrenkollektor	2,7 bis 3,4m <sup>2</sup> /kW Kälteleistung)
Flachkollektor	3,8 bis 5,0m <sup>2</sup> /kW Kälteleistung)

Die üblichen Arbeitstemperaturen liegen bei 85 bis 130°C (max. 160°C).

## 5.4 Einsatzbereiche

### 5.4.1 NH<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O - Absorptionskälteanlagen

Die Anlagen und Geräte arbeiten im Nutztemperaturbereich von +10 bis -20°C bei Kaskaden bis -30°C, Leistungsbereich 100W bis 1000kW.

- Kühlboxen bis 45l im Campingbereich und Minibars
- Kühlschränke für Normal- und Tiefkühlung waren bis in die 70er Jahre im Gebrauch
- Kleinabsorptionskälteanlagen mit Kälteleistungen von 10 bis 50kW für die Klimatisierung von Büros, Hotels und Privathäusern, die Lebensmittel- und Milchkühlung, Eisherzeugung, Prozeßkälte
- Große Absorptionskälteanlagen im Bereich 150 bis 1000kW für die industrielle Kälteherzeugung

Bild 16 zeigt das Funktionsschema einer NH<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O - Absorptionsaggregate für einen Haushaltskühlschrank.

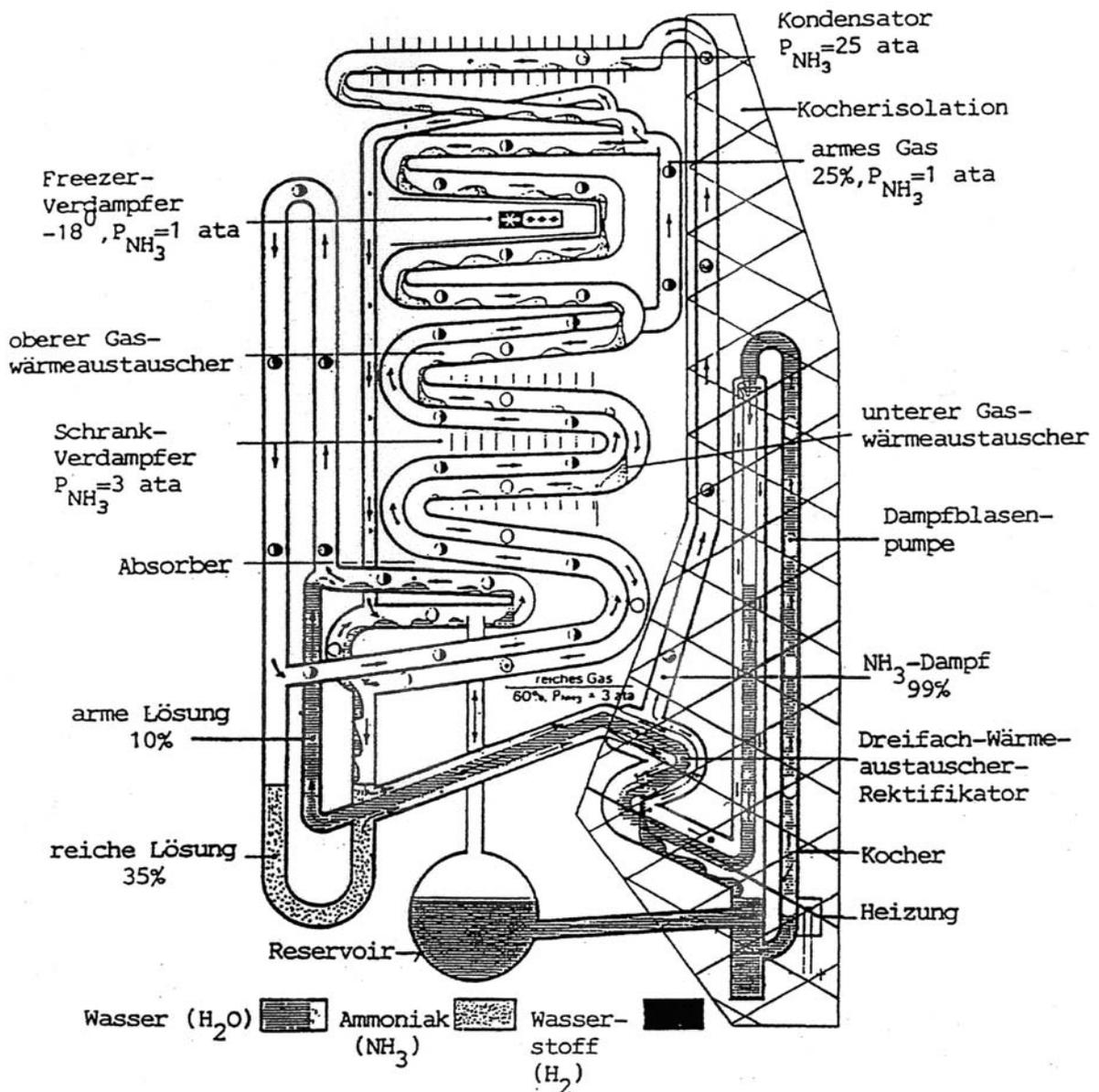


Bild 16: Funktionsschema des kontinuierlich arbeitenden Absorptions-Aggregates, System NH<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O / He für Haushalts-Kühlautomaten 270l mit \*\*\*\*-Gefrierfach 50l, mit Dreifach-Flüssigkeitswärmewechsler (Fa. DAWP-Creatherm, CH Schlieren)

## 5.4.2 H<sub>2</sub>O / LiBr - Absorptionskälteanlagen

Die Anlagen mit Wasser als Kältemittel werden nur im Klimabereich eingesetzt. Der absolute Druck im Verdampfer und Absorber beträgt 2 bis 8mbar und im Austreiber und Verflüssiger 80 bis 100mbar. Die Kälteleistungen liegen im Bereich von 10 bis 5300kW (Sonderanfertigungen bis 23MW), Kaltwassertemperaturen 6 / 12°C.

- Kaltwassererzeugung für die Klimatisierung
- Kaltwassererzeugung für die Prozeßkühlung

Bild 17 zeigt das Kreislaufschema einer H<sub>2</sub>O / LiBr - Absorptionskälteanlage, Bauart Carrier und Bild 18 eine Absorptions-Wärmepumpe.

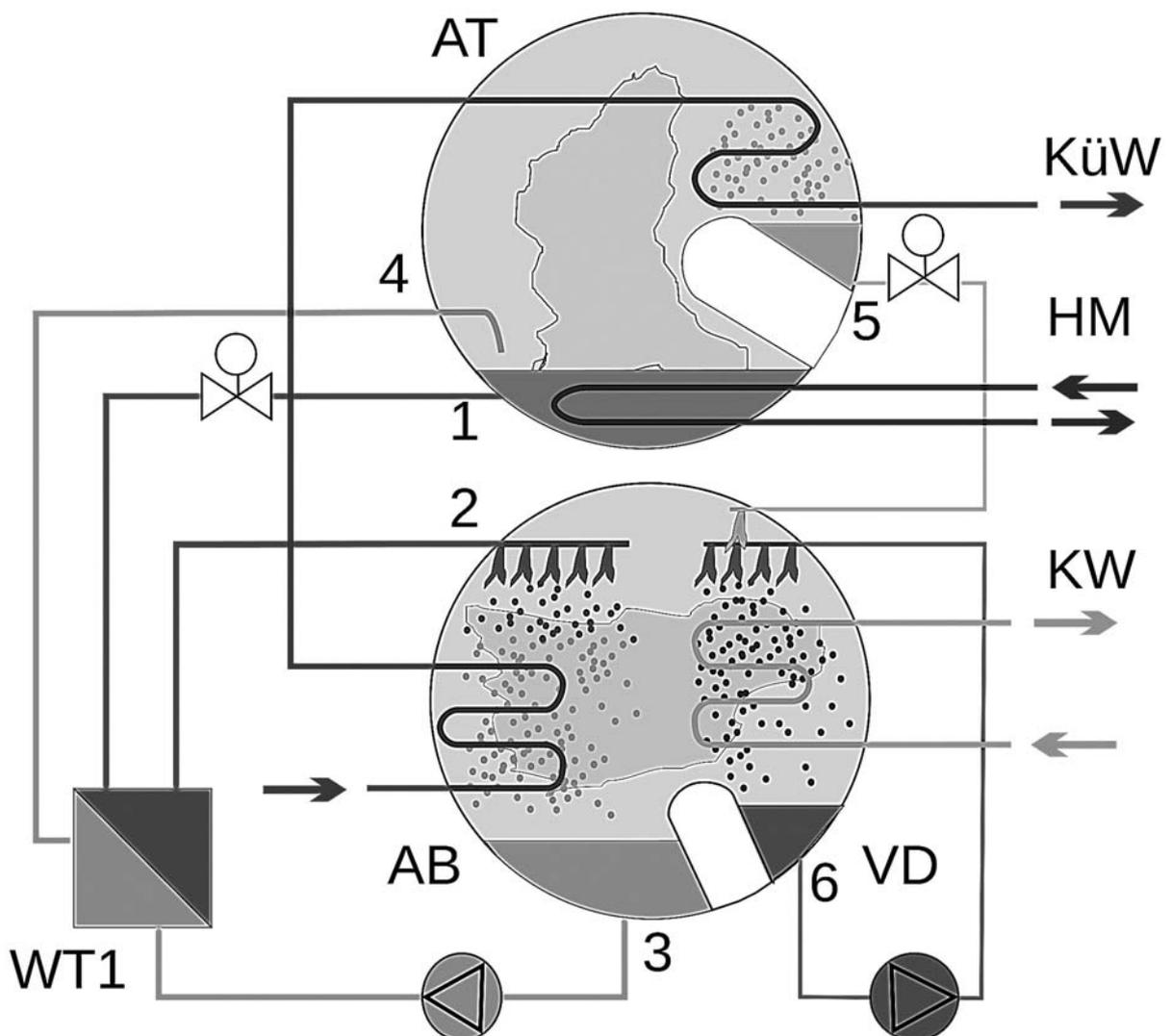


Bild 17: Wasser-Lithiumbromid-Absorptionskälteanlage, Bauart Carrier



Bild 18: Lithiumbromid-Absorptionswärmepumpe mit einer Kälteleistung von 14000kW

## 5.5. Hersteller und Lieferanten

### 5.5.1 NH<sub>3</sub> / H<sub>2</sub>O - Absorptionskälteanlagen

Hersteller	Kälteleistung in kW
ARO KG, Kulmbach	30 - 1000
Fa. Colibri, Niederlande	ab 150
Robur GmbH, Friedrichshafen	20 - 80
Ra. Pink, Langenwang, Österreich	12
SolarNext AG, Deutschland	19 - 50
Yazaki Europe Limited	100 - 700

### 5.5.2 H<sub>2</sub>O / LiBr - Absorptionskälteanlagen

Hersteller	Kälteleistung in kW
Carrier GmbH, Unterschleißheim	300 - 2100
Broad Air Conditioning, USA	150 - 1000
Trane Deutschland GmbH	150 - 1000
Yazaki Europe Limited	7,5 - 175
EAW Energieanlagenbau GmbH	15 - 200
SK Solarklima GmbH, Berlin	10
SolarNext AG	17,5 - 105

} Standard

## 6. Adsorptionskältemaschinen

### 6.1 Funktionsprinzip

Im Gegensatz zu Absorptionskältemaschinen werden bei Adsorptionskältemaschinen feste Stoffe (Adsorbentien) eingesetzt. Das sind poröse Stoffe, die das Kältemittel Wasser aufsaugen (adsorbieren).

Verwendet werden:

H<sub>2</sub>O / Zeolith (Molekularsieb)

H<sub>2</sub>O / Silikagel

Damit das Wasser bei +9 bis +15°C verdampfen kann, muß die Anlage auf etwa 2 - 10mbar evakuiert werden. Das Adsorptionsmittel saugt gierig Wasserdampf von der Wasseroberfläche des Verdampferbehälters auf. Die für die Verdampfung nötige Verdampfungswärme wird dem zu kühlenden Medium entnommen. Ist das Adsorptionsmittel mit Wasser gesättigt muß es durch Wärmezufuhr regeneriert werden. Für einen kontinuierlichen Kühlprozeß werden deshalb zwei Kammern benötigt, die wechselweise betrieben werden.

Leistungsbereich: Kälteleistung von 8kW bis 1200kW

Antriebstemperatur: +50 bis +95°C

Kaltwassertemperatur: +2 bis +15°C

COP: 0,5 bis 0,6

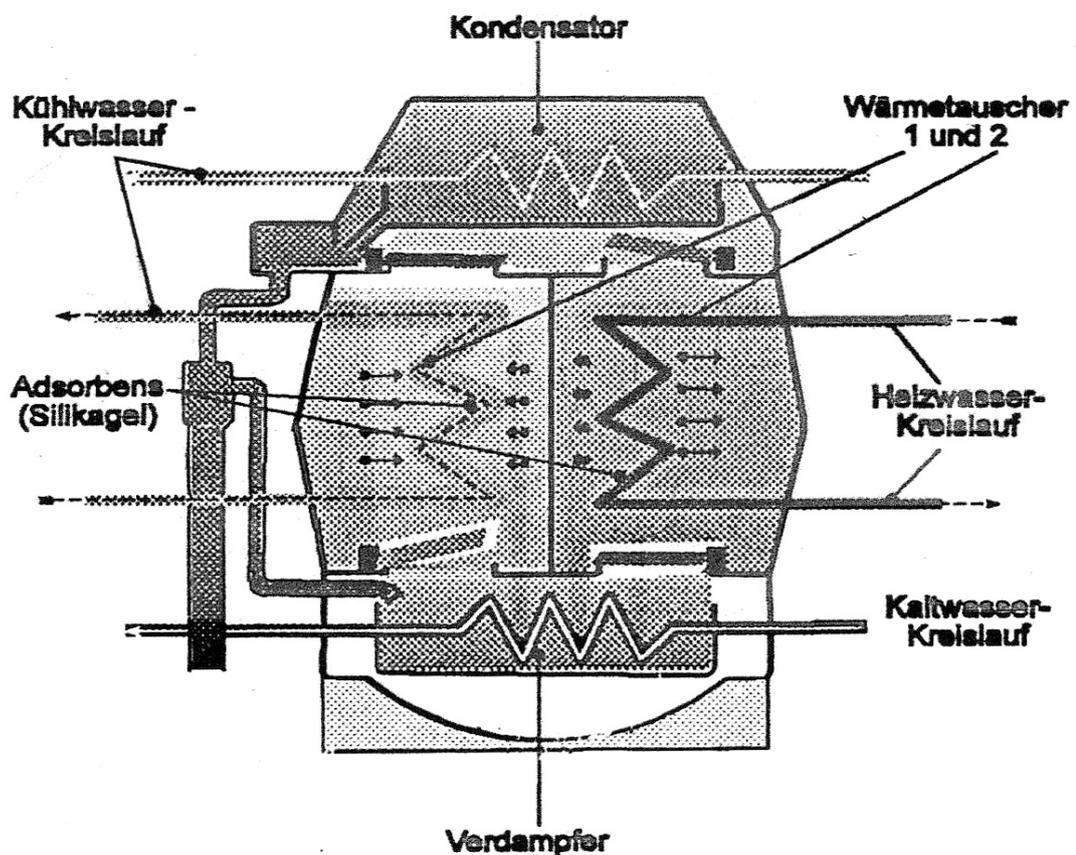
### 6.2 Aufbau und Betriebsweise

Bild 19 zeigt den Aufbau einer NAK-Adsorptionskältemaschine. Das geschweißte Stahlgehäuse besteht aus vier Kammern. In der unteren Verdampferkammer befindet sich der aus beidseitig berippten CU-Rohr bestehende Verdampferwärmetauscher, durch den das zu kühlende Kaltwasser strömt. Der Boden bildet gleichzeitig den Sammler für das Kältemittel Wasser. In den beiden mittleren Kammern befindet sich je ein Adsorberwärmetauscher (Rippenrohr mit einer 10mm starken Silikagel-Schicht), durch den Kühl- oder Heißwasser strömt. In der oberen Kondensatorkammer wird das Wasser an einem von Kühlwasser durchströmten Wärmetauscher kondensiert.

Die vier Kammern sind durch Klappenventile miteinander verbunden, die durch eine SPS gesteuert werden. Der Kälteprozeß verläuft in einem Zyklus von 6 bis 7 Minuten mit einer Regenerationsphase von 30 Sekunden.

Die Phasen eines Zyklus sind:

1. **Austreiben**  
des in den Silicagel-Packungen im Wärmetauscher 2 (oder 1) adsorbierten Wassers.
2. **Verflüssigen**  
des Wasserdampfes im Kondensator
3. **Verdampfung**  
des Wassers im Verdampfer unter Vakuum und dabei Abkühlung des Kaltwassers
4. **Adsorption**  
des Wasserdampfes im Wärmetauscher 1 (oder 2)



*Bild 19: Aufbau einer Adsorptionskältemaschine*

In Tabelle 5 sind die technischen Daten der NAK-Baureihe zusammengefaßt.

<b>Tabelle 5: Technische Daten der NAK-Adsorptionsmaschinen:</b>				
Adsorptionskältemaschine NAK	NAK 20/70	NAK 50/170	NAK 100/350	Einheit
<b>HEIZWASSERKREIS</b>				
Eintrittstemperatur	85,0	85,0	85,0	°C
Austrittstemperatur	79,4	79,4	79,4	°C
Volumenstrom	18,1	44,9	89,8	m <sup>3</sup> /h
Druckverlust	44,1	54,9	29,4	kPa
HEIZWASSERWÄRMELEISTUNG (Q <sub>zu</sub> )	118	293	587	kW
C.O.P. (KÄLTEZAHL Q <sub>o</sub> : Q <sub>zu</sub> )	0,6	0,6	0,6	-
KÄLTELEISTUNG (Q <sub>o</sub> )	71	176	352	kW
<b>KALTWASSERKREIS</b>				
Eintrittstemperatur	14,0	14,0	14,0	°C
Austrittstemperatur	9,0	9,0	9,0	°C
Volumenstrom	12,2	30,2	60,3	m <sup>3</sup> /h
Druckverlust	54,0	111,8	75,5	kPa
ERFORDERLICHE RÜCKKÜHLEISTUNG	189	469	939	kW
<b>KÜHLWASSERKREIS</b>				
Eintrittstemperatur	31,0	31,0	31,0	°C
Austrittstemperatur	34,8	34,8	34,8	°C
Volumenstrom	42,8	105,9	211,7	m <sup>3</sup> /h
Druckverlust (Wärmetauscher)	78,5	84,4	44,1	kPa
Druckverlust (Kondensator)	58,9	73,6	57,9	kPa
<b>ANSCHLUSSWERTE</b>				
elektr. Anschluß	0,4	0,4	0,4	kVA
Kältemittelpumpe	0,4	0,4	0,4	kVA
<b>ABMESSUNGEN UND GEWICHTE</b>				
Länge	3700	3700	3700	mm
Breite	1600	1900	2120	mm
Höhe	2400	3000	3270	mm
Betriebsgewicht	5000	8000	14000	kg

### 6.3 Vorteile von Adsorptionskältemaschinen

- Umweltfreundliche, saubere Technologie (giffreie Stoffe wie Silikagel, Zeolith, Wasser)
- Reduktion des Strombedarfes um 90% gegenüber Kompressionskälteanlagen und damit des Treibhauseffektes
- Benötigen relativ niedrige Arbeitstemperaturen
- Herausragende thermische und elektrische Leistungsdaten
- Leise, keine Vibrationen
- Geringer Wartungsaufwand bei langer Lebensdauer
- Zur Unterstützung der Heizung auch als Wärmepumpe nutzbar

### 6.4 Antriebsenergien / Wirtschaftlichkeit

Der wirtschaftliche Einsatz ist immer gegeben, wenn Abwärme oder Solarwärme zur Verfügung steht, z.B.:

- Industrielle Abwärme
- Kombination mit BHKW's
- Nah- und Fernwärmenetze
- Solarthermieanlagen
- Geothermieanlagen

und ein ganzjähriger Bedarf an Kälteleistung im Klimabereich gegeben ist, z.B. Rechenzentren, Biogasanlagen u. a.

Tabelle 6 zeigt eine Nutzensberechnung für drei Adsorptionskältemaschinen der Invensor GmbH aufgestellt in der Keks und Nahrungsmittel GmbH, Wittenberg.

<b>Tabelle 6: Wirtschaftlichkeitsvergleich Kompressionskältemaschine zu Adsorptionskältemaschine (AdKM)</b>		
	KKM Kühlung	AdKM
Strombezug Kühlung p.a.	78797kWh	14008kWh
Stromkostenpa	-13264 €	-2358 €
Wartungskosten p.a.	-400 €	-200 €
Gesamtkosten p.a.	-13644 €	2558 €
<b>Energiekostenansparung p.a.</b>	-	<b>11106 €</b>
Investition	25000 €	70000 €
Energiepreissteigerung		7%
Inflationsrate		3%
<i>Quelle: KKA 3 / 2013</i>		

## 6.5 Einsatzgebiete

Das Einsatzgebiet reicht vom selbstkühlenden Bierfaß bis zu großen Anlagen zur Kühlung und Klimatisierung im Industriebereich. Relativ neu sind kompakte Kaltwassersätze mit kompletter Hydraulikeinheit im Leistungsbereich 10 bis 20kW vor allem auch mit solarthermischen Antrieb.

Typische Anwendungen sind:

- Klimatisierung von Ein- und Mehrfamilienhäusern, Büros, Hotels, Tankstellen, Schalt- und Serverräume, Metzgereien, Bäckereien
- Kühllager, Produktionshallen
- Industrielle Prozesse  
(Bearbeitungsmaschinen, Produktionsanlagen, medizinische Geräte)

## 6.6 Lieferanten und Hersteller

- GBUMbH, 64673 Zwingenberg
- Climatech AG, 04347 Leipzig
- CCP clim cool project GmbH, 71272 Renningen
- mecoTec GmbH, 75179 Pforzheim
- SorTech AG, 06126 Halle
- Invensor GmbH, 13355 Berlin

Tabelle 7 zeigt die technischen Daten der Adsorptionskältemaschinen der SorTech AG, Typ ACS 08 / 15 im Nennarbeitspunkt.

In Tabelle 8 sind die technischen Daten der Invensor-Geräte LTC 10 Plus und HTC 18 Plus zusammengefasst.



**Tabelle 7: Technische Daten im Nennarbeitspunkt:**

			<b>ASC 08</b>	<b>ASC 15</b>
	Kälteleistung, nominal	kW	8	15
	COP <sub>therm</sub> , nominal		0,60	0,60
Kaltwasserkreislauf	Temperatur ein/aus	°C	18/15	18/15
	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	2,0	4,0
	Druckverlust	mbar	300	500
	Betriebsdruck, max.	bar	4	4
	Anschluss Außengewinde		1"	5/4"
Rückkühlkreislauf	Temperatur ein/aus	°C	27/32	27/32
	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	3,7	7,0
	Druckverlust	mbar	350	440
	Betriebsdruck, max.	bar	4	4
	Anschluss Außengewinde		1"	5/4"
Heißwasserkreislauf	Temperatur ein/aus	°C	72/65	72/65
	Volumenstrom	m <sup>3</sup> /h	1,6	3,2
	Druckverlust	mbar	230	260
	Betriebsdruck, max.	bar	4	4
	Anschluss Außengewinde		3/4"	5/4"
Elektrische Spannungsversorgung	Spannung	V	230 ~	230 ~
	Frequenz	Hz	50	50
	Stromverbrauch Ø	W	7	14
Abmessungen	Breite	mm	790	790
	Tiefe	mm	1060	1340
	Höhe	mm	940	1390
	Leergewicht	kg	265	530
	Betriebsgewicht	kg	295	590

**Tabelle 8: Technische Daten der InvenSor-Geräte:**

<b>InvenSor LTC 10 Plus</b>			
<b>Allgemeine technische Daten</b>			
Leistungsbereich Kälte	4 - 12kW		
COP maximal	0,65		
Maximaler Überdruck	4bar		
Elektrischer Anschluss	230V, 50/60Hz		
Elektrische Leistungsaufnahme (inkl. Pumpen)	395W		
<b>Daten bei Nennbedingungen</b>	Kältekreis	Rückkühlkreis	Antriebskreis
COP bei Nennbedingungen	0,6		
Leistungswerte	10kW	26,7kW	16,7kW
Temperaturen Kälteanlage Eintritt (IN)	18°C	27°C	72°C
Temperaturen Kälteanlage Austritt (OUT)	15°C	31,5°C	66°C
Temperaturen Einsatzmöglichkeiten	10 - 25°C	20 - 37°C	45 - 100°C
Volumenströme	2900l/h	5100l/h	2500l/h
Verfügbare extreme Förderhöhe	400mbar	400mbar	300mbar
<b>Maße der Maschine</b>			
Länge	1100mm		
Höhe	1370mm		
Breite	750mm		
Gewicht LCT 10 plus	390kg		
Gewicht LCT 10 plus-FC	395kg		
<b>InvenSor HTC 18 Plus</b>			
<b>Allgemeine technische Daten</b>			
Leistungsbereich Kälte	6 - 22kW		
COP maximal	0,55		
Maximaler Überdruck	4bar		
Elektrischer Anschluss	230V, 50/60Hz		
Elektrische Leistungsaufnahme (inkl. Pumpen)	495W		
<b>Daten bei Nennbedingungen</b>	Kältekreis	Rückkühlkreis	Antriebskreis
COP bei Nennbedingungen	0,52		
Leistungswerte	18kW	52,6kW	34,6kW
Temperaturen Kälteanlage Eintritt (IN)	18°C	27°C	85°C
Temperaturen Kälteanlage Austritt (OUT)	14°C	34,5°C	76,5°C
Temperaturen Einsatzmöglichkeiten	9 - 25°C	20 - 47°C	75 - 100°C
Volumenströme	3900l/h	6000l/h	3600l/h
Verfügbare extreme Förderhöhe	400mbar	400mbar	300mbar
<b>Maße der Maschine</b>			
Länge	1100mm		
Höhe	1370mm		
Breite	750mm		
Gewicht HCT 18 plus	420kg		
Gewicht HCT 18 plus-FC	425kg		

## **7. Adiabate Kühlung (Verdunstungskühlung)**

### **7.1 Funktionsprinzip**

Wasser verdunstet oder verdampft in der Luft oder an Oberflächen adiabatisch, d.h. ohne Energie zu- bzw. -abfuhr. Die für die Verdunstung notwendige Wärme wird der Luft, dem Wasser oder dem Kühlgut entnommen, die sich dabei abkühlen.

### **7.2 Anwendungsgebiete**

- Bereits die Inder und Ägypter verwendeten präse Tongefäße, um durch Verdunstung von Wasser an der Oberfläche den Inhalt zu kühlen.
- Bei hohen Umgebungstemperaturen verdunstet der Mensch an der Hautoberfläche Wasser, um Wärme abzugeben (er schwitzt).
- Die Rückkühlung von Wasser in Kühltürmen (offener Kreislauf) oder in Berieselungskühlern (geschlossener Kreislauf).
- Die Verflüssigung von Kältemitteln in Verdunstungsverflüssigern oder Hybridkühlern.
- Die Kühlung der Zuluft oder Umluft in Klimaanlage.
- Die Vakuunkühlung von Gemüse, Blumen oder Backwaren in Vakuunkammern.

### **7.3 Adiabate Kühlung der Luft in Klimaanlage**

Man versteht darunter die Befeuchtung der Luft mittels Kontakt-, Sprüh- oder Dampf-befeuchtern. Die für Verdunstung notwendige Wärme wird der Luft entnommen, die dadurch abkühlt. Die Zustandsänderung verläuft in Richtung der Nebelisotheorie (näherungsweise bei konstanter Enthalpie). Die minimal mögliche Temperatur ist die Kühlgrenze auf der Sättigungs-Linie  $\varphi = 100\%$  (Bild 20).

Im wesentlichen werden 2 Verfahren angewendet:

- Adiabate Kühlung der Zuluft (Bild 21):  
Die Abluft wird befeuchtet, kühlt sich dabei ab und nimmt in einem Wärmetauscher (Rekuperator oder Regenerator) die Wärme aus der Zuluft auf.
- Adiabate Kühlung der Umluft (Bild 22):  
Außenluft wird als Kühlluft verwendet, befeuchtet und wieder ins Freie geblasen. Vorher kühlt sie in einem Wärmetauscher die Umluft, die wieder dem Raum zugeführt wird.  
Solche Umluftgeräte werden z.B. von der Fa. Hoval GmbH geliefert. Tabelle 9 zeigt die Leistungsdaten eines Umluftkühlgerätes.

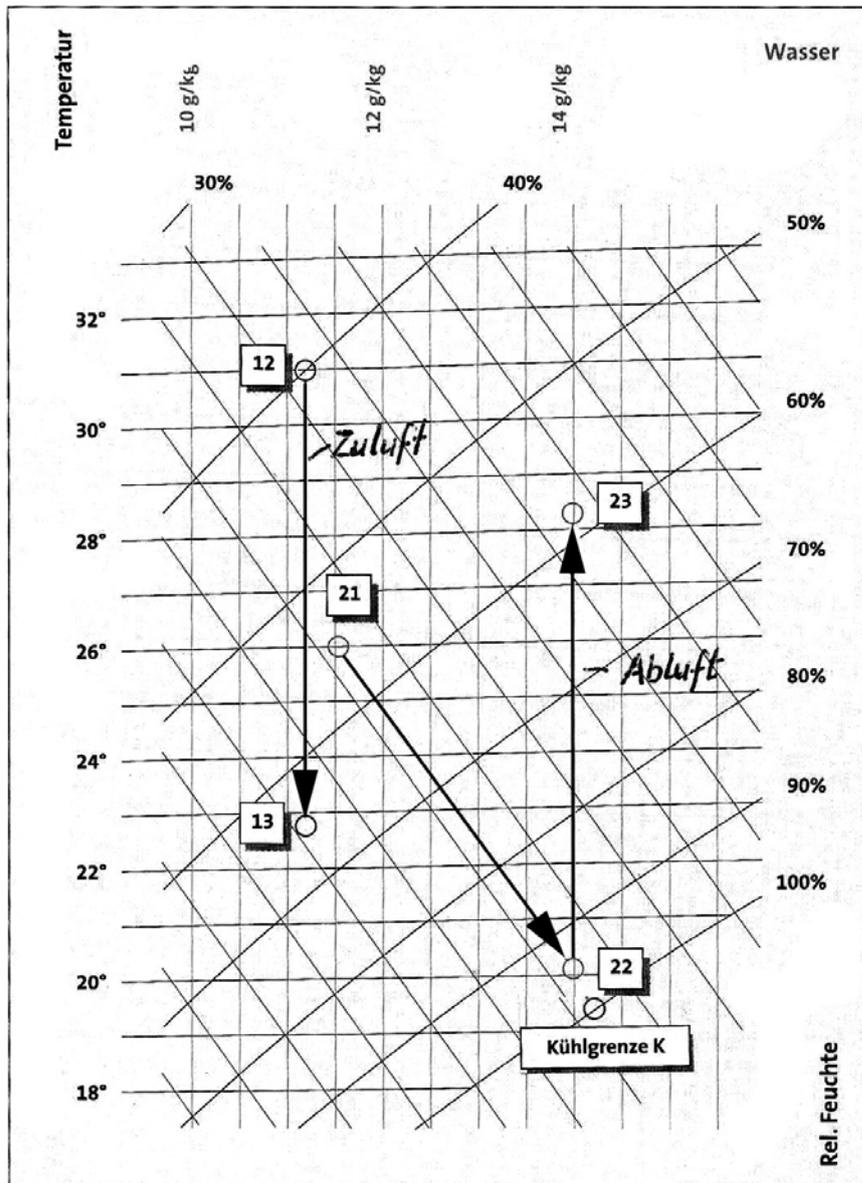


Bild 20: Zustandsänderungen von Zu- und Abluft im  $h,x$ -Diagramm

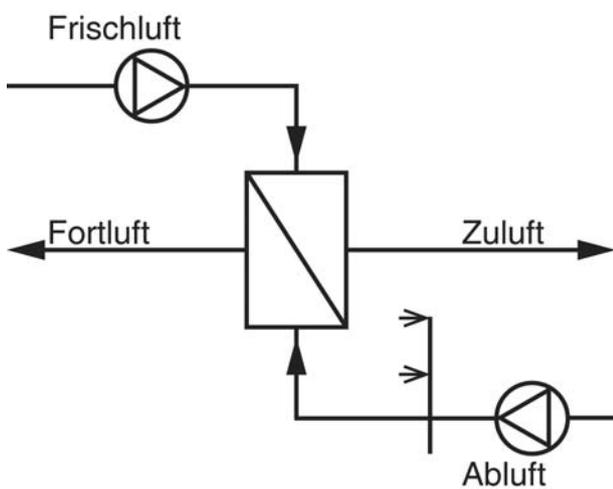


Bild 21: Adiabate Kühlung der Zuluft

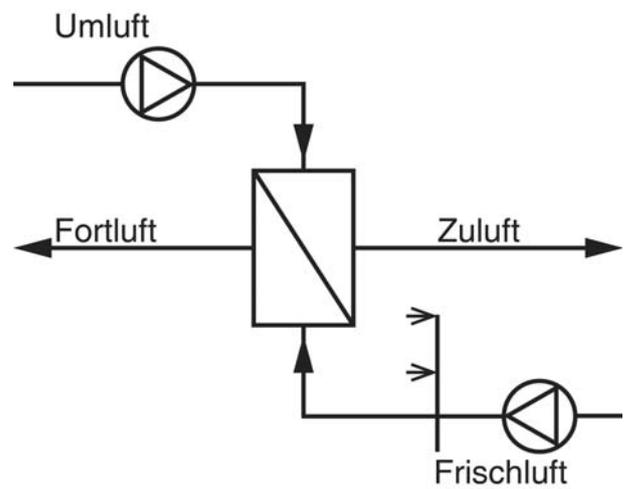


Bild 22: Adiabate Kühlung der Umluft

**Tabelle 9: Kühlleistungen und Zulufttemperaturen eines Umluftkühlgerätes**

		Temperatur und relative Feuchte der Außenluft												
		26			28			30			32			[°C]
		30	40	50	30	40	50	30	40	50	30	40	50	[%]
Temperatur der Abluft	24	16,8	14,0	11,0	14,7	11,3	7,8	12,3	8,6	4,5	9,9	5,4	0,7	[kW]
		15,8	17,1	18,6	16,8	18,4	20,2	17,9	19,8	21,8	19,2	21,4	23,7	[°C]
	26	19,2	16,9	14,3	17,6	14,6	11,5	15,5	12,2	8,6	13,3	9,3	5,1	[kW]
		16,6	17,7	19,0	17,4	18,8	20,4	18,4	20,0	21,8	19,5	21,4	23,5	[°C]
	28	21,3	19,4	17,2	19,9	17,4	14,7	18,2	15,3	12,2	16,3	12,8	9,1	[kW]
		17,6	18,5	19,6	18,2	19,5	20,8	19,1	20,5	22,0	20,0	21,7	23,5	[°C]
[°C]	Kühlleistung und Zulufttemperatur													

## 7.4 Vakuunkühlung

### 7.4.1 Funktionsprinzip

- Die zu kühlende Ware in eine Vakuumkammer bringen
- Mittels Vakuumpumpen den Druck auf 2 bis 10mbar absenken
- Wasser verdampft bei +2 bis +7°C
- Verdampfungswärme wird dem Kühlgut entnommen, das dabei schnell abkühlt

### 7.4.2 Anwendungsbereiche

#### \* Kühlung von Gemüse, Früchten, Blumen

Schwerpunkt der Anwendung sind Blattsalat, Eisbergsalat, Spinat aber auch Chinakohl, Brokkoli, Karotten, Erdbeeren, Pilze und frisch geschnittene Blumen. Die Produkte werden teilweise auch in perforierten Folien verpackt gekühlt.

Die Abkühlung erfolgt auf +1 bis +2°C innerhalb von 20 - 30min (Bild 23)

Vorteile des Verfahrens:

- Schnellere, gleichmäßige Kühlung bis zum Kern des Produktes
- Bessere Produktqualität, größere Frische
- Längere Haltbarkeit
- Einsparung von Energiekosten gegenüber traditionellen Kühlverfahren

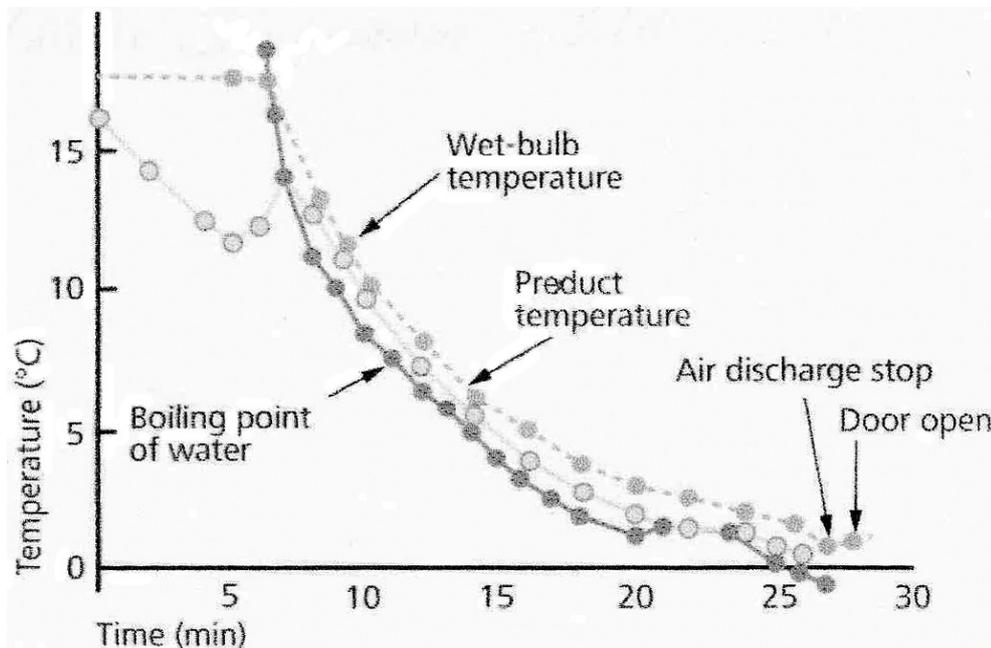


Bild 23: Abkühlkurven

Lieferanten:

Fa. Coldmax Europe, Barendrecht / Niederlande, Lübecker Str. 7b

Geliefert werden Standardmodelle von Vakuulkammern für 1 bis 20 Paletten und einem Gewicht von 250 bis 8000kg sowie spezielle Ausführungen, z.B. für Flugzeug-Container.

\* **Kühlung von Backwaren**

Mit der Vakuunkühltechnologie werden Brote, Brötchen, Klein- und Feingebäck, auch Fruchtekuchen produziert und halbgebacken ausgeliefert. Ofenheiße Stikkenwagen mit teilgebackenen Produkten werden in die Vakuunkammer gefahren, in der dann der Druck auf 10mbar abgesenkt wird. Die Produkte werden in 2 bis 6min auf +5°C abgekühlt.

Vorteile des Verfahrens:

- Kein Abplatzen der Kruste, keine Feuchtewanderung
- Keine Phasentrennung im Brötchen durch Eisbildung
- Glatte Oberflächen
- Gute Krustenstruktur mit lang anhaltender Rösche
- Produkte bleiben länger frisch, länger haltbar
- Backgut gewinnt an Volumen
- Bis zu 50% niedrigere Energie- und Wartungskosten gegenüber Gefrierprodukten

Lieferanten:

• Aston Foods AG, 6343 Rotkreuz / Schweiz, Industriestraße 13

(Kammern für einzelne Stikkenwagen, Doppelkammern, kontinuierliche Kühlanlagen)

• König Maschinen GmbH, 8045 Graz, Stattegger Str. 80

## 8. DEC-Anlagen (Desiccative Evaporative Cooling)

### 8.1 Funktionsprinzip

Die Kälte wird durch sorptive Lufttrocknung und anschließende Verdunstungskühlung erzeugt. Das Kältemedium bei diesem offenen Adsorptionsprozeß ist die zu klimatisierende Luft. Bild 24 zeigt das Anlagenschema und den Prozeß im h,x-Diagramm.

#### Zuluft:

- Die gefilterte Außenluft wird zunächst im mit Silikagel oder Zellulose / LiCl bestückten Sorptionsrad getrocknet.
- Die Luft erwärmt sich dabei durch Freisetzung der Kondensationswärme.
- Im Wärmerückgewinnungsrad wird die Wärme an die Abluft abgegeben.
- Die Kühlung auf Zulufttemperatur erfolgt durch einen Befeuchter (Adiabate Kühlung oder Verdunstungskühlung).

#### Abluft:

- Die Abluft wird befeuchtet und kühlt dabei ab.
- Im Wärmerückgewinnungsrad nimmt sie die Wärme aus der Zuluft auf.
- Der nachfolgende Erhitzer erwärmt die Abluft auf das Temperaturniveau zur Regeneration des Sorptionsrades (Desorption).

#### Wärmequellen:

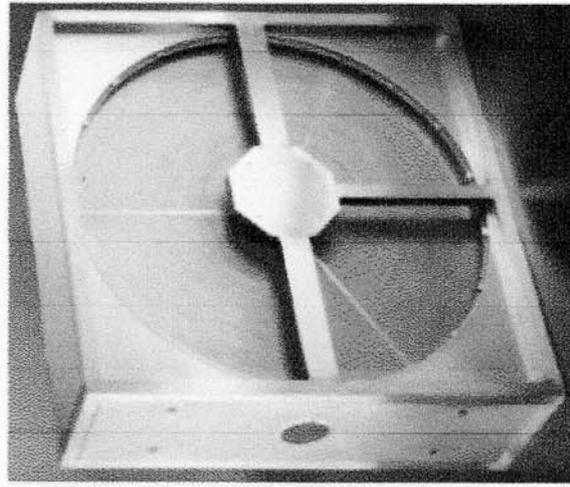
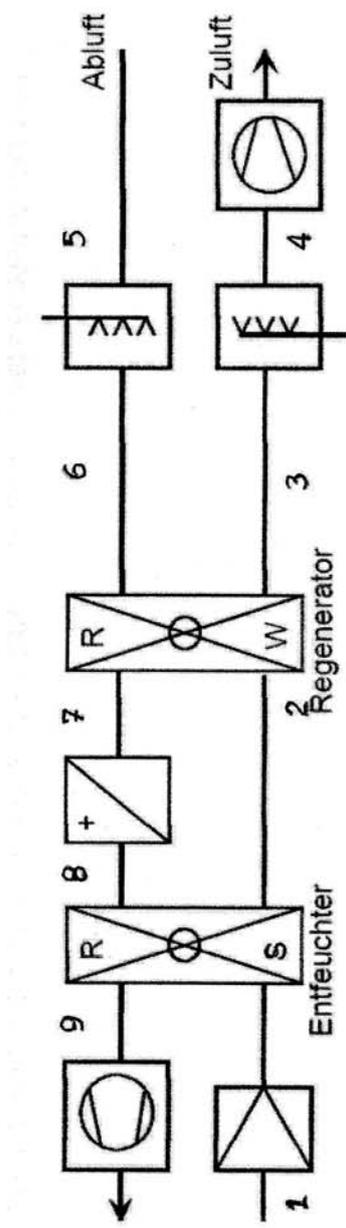
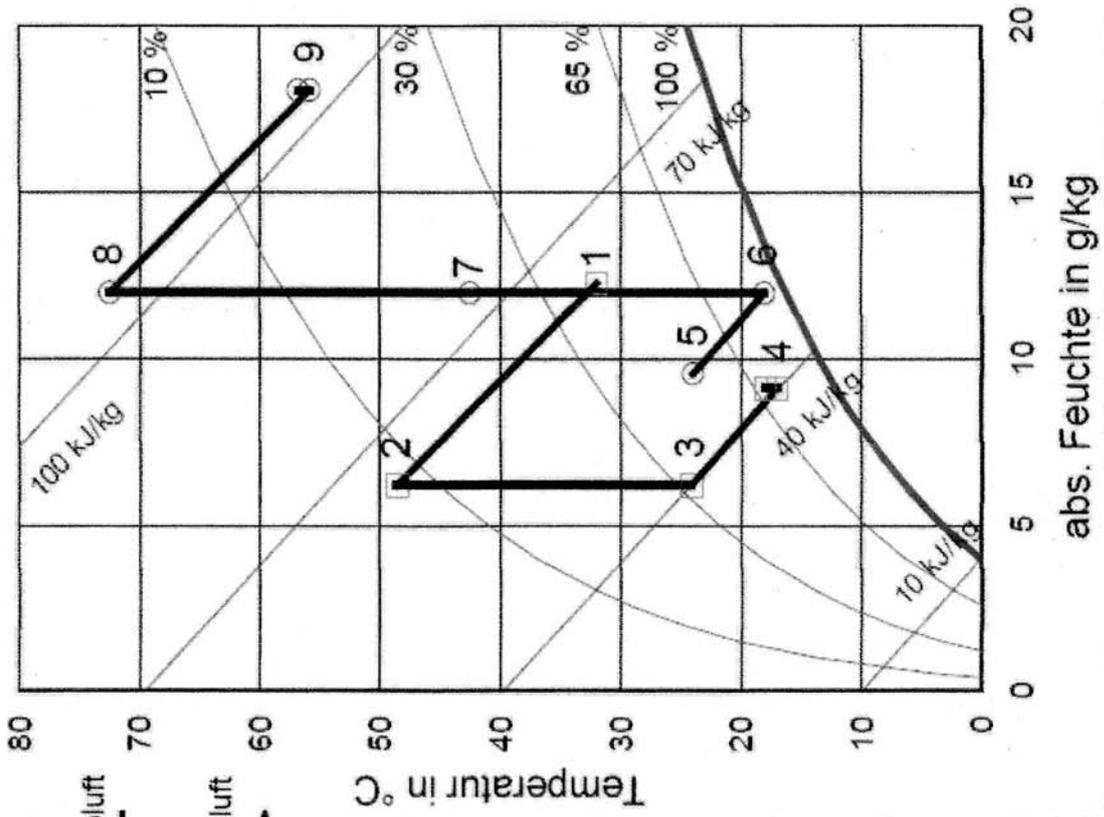
Solkollektoren, Geothermie (WP), Abwärme oder Fernwärme

### 8.2 Beispielanlage

Bild 25 zeigt eine solarbetriebene DEC-Anlage zur Klimatisierung, die in der Giefinggasse, 1210 Wien durch das Austrian Institut of Technology (AIT) in Zusammenarbeit mit der Fa. Wolf, Geisenfeld realisiert wurde.

#### Anlagendaten:

- 7500m<sup>2</sup> Büro- und Laborfläche
- Energiebedarf: 219679kWh/a
- 285m Flachkollektoren
- 15000l Pufferspeicher
- 70839kWh/a Solarenergie im Sommer für Klimatisierung,  
im Winter für 15% Heizungsunterstützung
- 148840kWh/a durch Wasser-Wasser-Wärmepumpe für Heizung im Winter



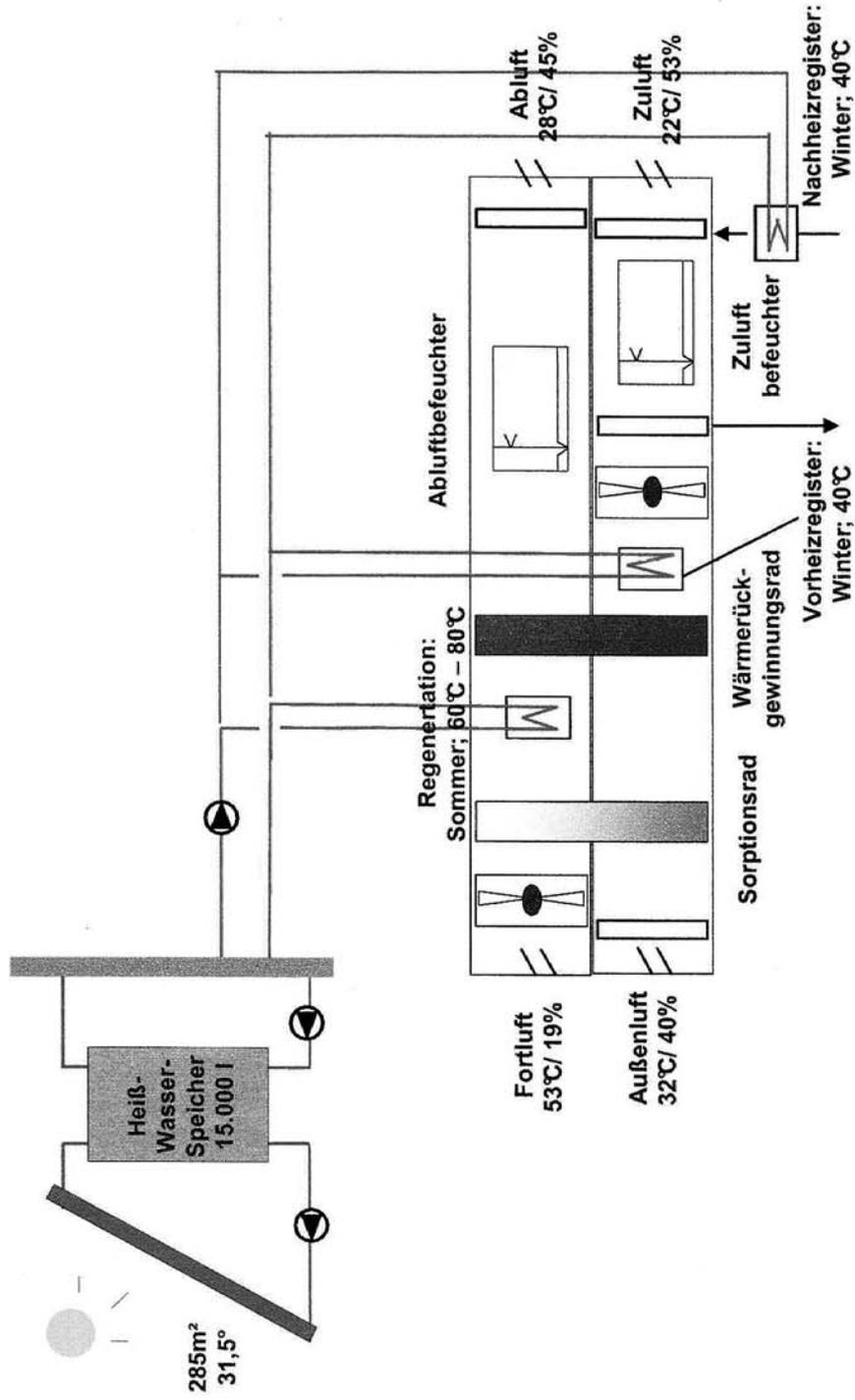
Produktunterlagen der Fa. Klingenburg, Gladbeck

Bild 24: Anlagenschema und h,x-Diagramm einer DEC-Anlage

# DEC-Anlage (Desiccant Evaporative Cooling)

## Anlagenkonzept:

- ☞ Frischluftversorgung im Bürobereich
- ☞ 100 % solarthermische Klimatisierung mittels 285 m<sup>2</sup> Flachkollektoren
- ☞ Nutzung der gleichen Anlage im Winter zur Wärme- und Feuchterückgewinnung der Frischluftversorgung



Ersteller: AIT

Bild 25: Solarbetriebene DEC-Anlage

## 9. Thermoelektrische Kühlung

### 9.1 Funktionsprinzip

1823 entdeckte Seebeck, dass in einem geschlossenem Stromkreis aus zwei verschiedenen Leitern ein Strom fließt, wenn die Kontaktstellen unterschiedliche Temperaturen besitzen.

Dieser Seebeck-Effekt wird zur Temperaturmessung genutzt (Bild 26).

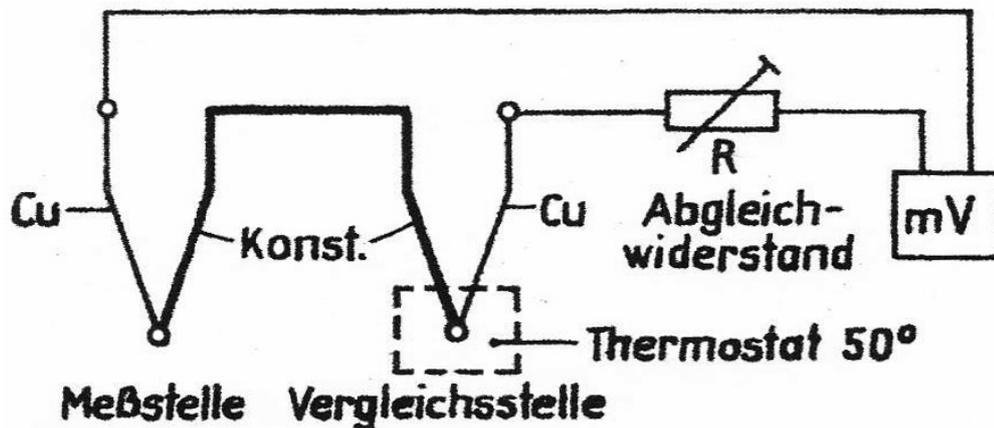


Bild 26: Temperaturmessung mit Thermoelementen

Der Effekt kann mit der Elektrotheorie der Elemente erklärt werden. Es gibt Leiter, die ausschließlich negative Ladungsträger (Elektronen, n-Typ) und Leiter die scheinbar positive Ladungsträger (Defektelektronen oder Löcher, p-Typ) enthalten.

Der Peltier Effekt - die Umkehrung des Seebeck-Effektes - wurde 1834 von dem Uhrmacher Peltier beobachtet. Fließt in einem Stromkreis zweier Leiter (n- und p-Typ) ein Gleichstrom, wird sich eine Kontaktstelle abkühlen und die andere erwärmen. Das ist die Grundlage der Thermoelektrischen oder Peltierkühlung.

Die Kälte- bzw. Heizleistung  $\dot{Q}$  ist eine Funktion der Stromstärke  $I$ , der Temperatur  $T$  und der Thermokraft  $e$  des Materials:

$$\dot{Q} = e \cdot I \cdot T$$

## 9.2 Aufbau von thermoelektrischen Batterien

Zur Erreichung der erforderlichen Kälte- bzw. Heizleistung muß eine Vielzahl von Thermo-  
paaren zu einer thermoelektrischen Batterie zusammengeschalten und als kompakter Block  
mit Epoxydharz vergossen werden (Bild 27).

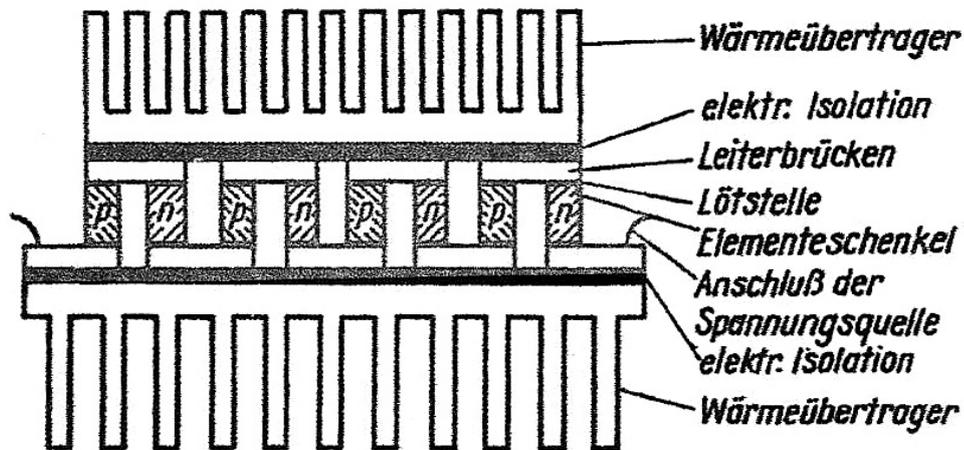


Bild 27: Schematischer Aufbau eines thermoelektrischen Kühlblockes

Geeignete Halbleitermaterialien sind:

- Wismut-Tellurit ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ )
- Antimon-Tellurit ( $\text{Sb}_2\text{Te}_3$ )
- Wismut-Selen ( $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ )

## 9.3 Hauptanwendungsgebiete

- Kältetechnik:  
Kühlboxen für Campingzwecke, Wärmepumpen zum kühlen oder heizen von Autositzen, Schaltschrankkühler
- Labortechnik:  
Thermostate, Prüfgeräte, Mikrokühlgeräte
- Elektronik:  
Temperaturregelung von Bauelementen (sehr präzise)  
z.B.: Laser, LED's, CPU's, Transistoren
- Medizintechnik und Biotechnologie:  
Operationsgeräte für grauen Star, Mikrotom-Kühler, Virenerkennung, Vervielfältigung von DNA-Abschnitten

Die Anwendungen liegen im kleinen Leistungsbereich  $\dot{Q}_o = 20$  bis  $1000\text{W}$ , bedingt durch die schlechte Leistungsziffer. Temperaturdifferenzen zwischen warmer und kalter Seite bis zu  $60\text{K}$ .

## 9.4 Vor- und Nachteile

### Vorteile:

- Kleine, kompakte Bauweise
- Keine Geräusche, keine Vibrationen
- Exakte, präzise Arbeitsweise
- Kurze Ansprechzeiten
- Kein Kältemittel
- Kein Treibhauseffekt

### Nachteile:

- Sehr schlechte Leistungsziffer  
(nur ca 10% einer Kompressionskälteanlage)

## 9.5 Lieferanten

- Peltierelemente:  
Quick-Ohm Küpper & Co. GmbH, Wuppertal
- Schaltschrank- und Serverkühler:  
 $\dot{Q}_o = 100 \text{ bis } 300\text{W}$   
24/48VDC  
Dr. Neumann Peltier-Technik GmbH, Neuried bei München  
Fuhrmeister + Co GmbH, 42499 Hückeswagen
- Thermoelektrische Kühlboxen:  
26 bis 40l  
12/230V-Anschluß  
Fa. Outwell, Ezetil, Waeco

## 10. Die magnetokalorische Kühlung

### 10.1 Funktionsprinzip

Der magnetokalorische Effekt wurde 1881 vom deutschen Physiker Emil G. Warburg entdeckt (Eisen erwärmt sich in einem starken Magnetfeld).

1949 fand William F. Giange, dass sich magnetokalorisch Temperaturen unter  $-270^{\circ}\text{C}$  erzeugen lassen und erhielt dafür den Nobelpreis.

Wird an einen magnetokalorisch aktiven Werkstoff ein Magnetfeld angelegt, so richten sich die magnetischen Dipole der Atome parallel zum Magnetfeld aus. Da die Gesamtentropie des Systems konstant bleiben muß, erhöht sich die Bewegung der Atome und das Material erwärmt sich. Kühlt man das Material im Magnetfeld auf die Ausgangstemperatur ab und schaltet das Magnetfeld aus, erreicht das Material eine tiefere Temperatur und kann Wärme aufnehmen.

### 10.2 Bisherige Entwicklungen

- 1997 wurde in den USA eine Gadolinium-Legierung (Gd-Si-Ge) mit magnetokalorischem Effekt bereits bei Raumtemperatur gefunden
- Feng-Xia Hu in China und Asaya Fujita in Japan entwickeln eine Legierung aus Lanthan, Eisen und Silizium
- Der Niederländer Ekkes Brück entwickelt eine Legierung aus Mangan, Eisen, Phosphor und Arsen
- Entwicklung von Mn, Fe-Legierungen mit zusätzlichem Phasenübergang zur Steigerung des Effektes auf  $75\text{J/kg}\cdot\text{K}$
- Weiterentwicklung von Permanentmagneten auf Basis von Neodym-Eisen-Bor-Legierungen
- Die deutschen Unternehmen Vacuumschmelze Hanau und BASF arbeiten an neuen effektiveren Materialien auf Basis Lanthan bzw. Mangan
- Technische Universitäten in Dresden, Essen, Darmstadt, die Ingenieur-Hochschule Yverdon-Les-Bains in der Schweiz, die Fa. Cooltech in Straßburg, Liebherr, Whirlpool und Toshiba, das Imperial College in London u.a. arbeiten an der industriellen Nutzung des Effektes für Haushaltsgeräte und PKW- Klimaanlage
- 2006 wurde der "Magnetische Kühlschrank" aus der Schweiz mit dem Swiss Technology Award ausgezeichnet
- 2007 baut Okamura in Japan ein Kühlgerät mit  $\dot{Q}_o = 540\text{W}$  (4kg-Rotor)

### 10.3 Aufbau von Kühlgeräten

Die Ausgangslegierungen werden zu feinem Pulver vermahlen, gepreßt und anschließend gesintert. Für einen guten Wärmeübergang werden aus dem Material dünne Platten hergestellt, die zu einem Rotor zusammengesetzt werden.

Der Rotor taucht mit einer Hälfte in das Loch eines Permanentmagneten, die andere Hälfte ragt heraus. Der Rotor dreht sich ein- bis zwei Mal pro Sekunde. Sobald der Rotor aus dem Magnetfeld kommt kühlt er ab. Vereinfacht gesagt, dreht sich ein Rad, auf der einen Seite strömt warme Luft hinaus (bei der Magnetisierung) und auf der anderen Seite kalte Luft (bei der Demagnetisierung). Durch den rotierenden Wärmetauscher wird ein kontinuierlicher Zyklus mit hohen Leistungszahlen (+50% gegenüber Kompressionskälteanlagen) erzielt.

### 10.4 Ausblick

Die magnetokalorische Kühlung ist ein umweltfreundliches, sicheres und energieeffizientes Verfahren. Einer breiten Anwendung in der Industrie standen bisher die hohen Kosten entgegen. Der "magnetische Kühlschrank" und die Autoklimaanlage auf Basis der magnetokalorischen Kühlung werden erst kommen, wenn noch preiswertere und effektivere Materialien zur Verfügung stehen und noch größere Temperaturdifferenzen bei der Demagnetisierung erreicht werden können.

In der Kryotechnik ist diese Technologie bereits sehr erfolgreich.

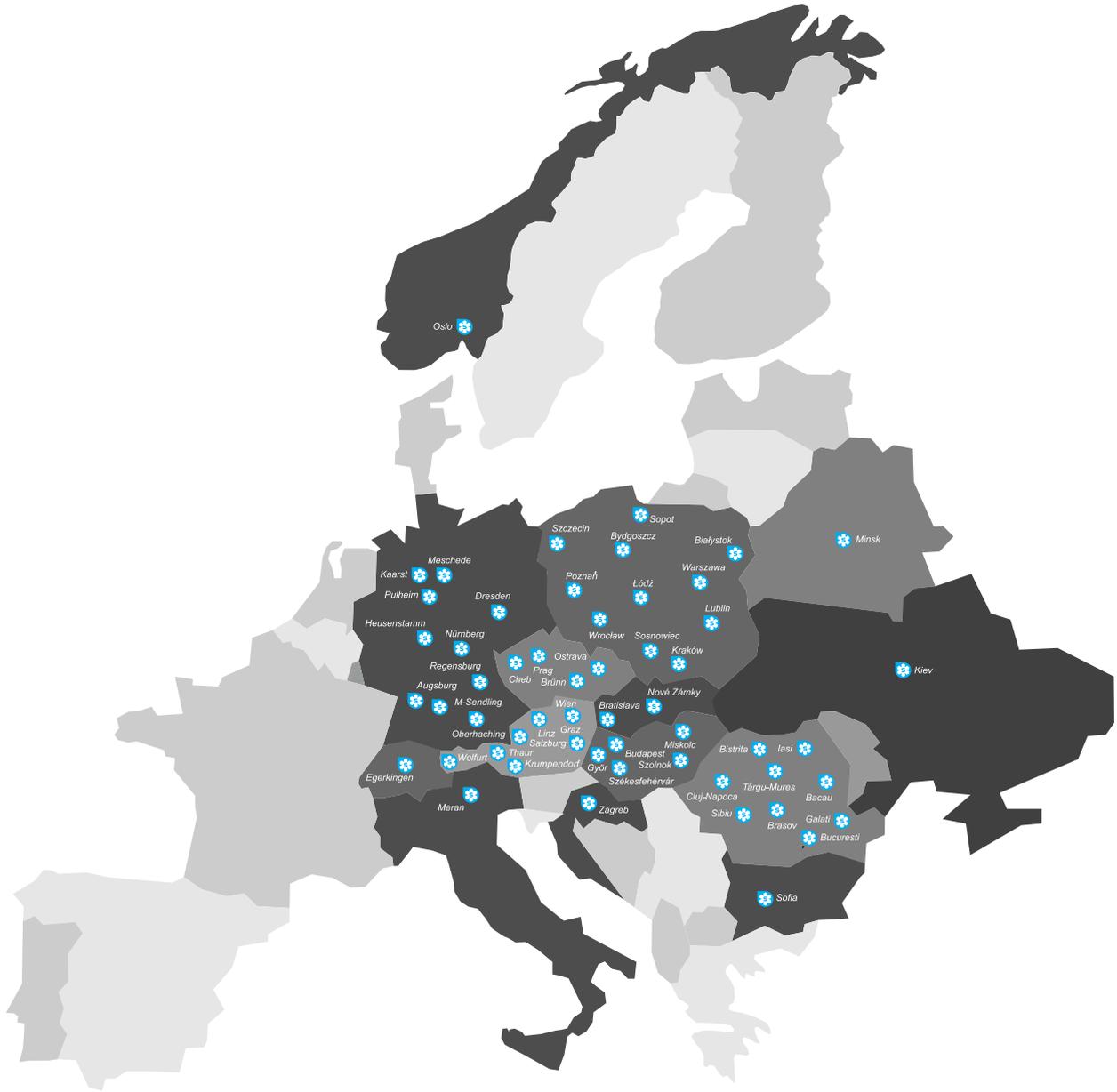
## 11. Der elastokalorische Kühlprozeß

Das Kühlverfahren basiert auf Phasenübergängen im Kristallgitter bestimmter Festkörper, sogenannter **Formgedächtnis-Legierungen**.

Diese erwärmen sich bei mechanischer Belastung und kühlen sich bei Entlastung ab. Dieser Effekt kann für Kühlzwecke ausgenutzt werden. Das bekannteste Material ist eine **Nickel-Titan-Legierung**, die sich durch eine besonders große latente Wärme (~25kJ/kg) auszeichnet.

Die erreichbaren Leistungsziffern bei diesem Prozeß sind wesentlich höher als bei Kompressionskälteverfahren.

Untersuchungen zu diesem Verfahren laufen z.Z. an der Universität des Saarlandes.



**SCHIESSL**

[www.schiessl-kaelte.com](http://www.schiessl-kaelte.com)