

# **Das Kältemittel Luft**

## **Historie – Gegenwart - Zukunft**

Vortrag von Ingwer Ebinger (HAW-Hamburg) auf der Historikertagung des HKK in Friedrichshafen am 21.6.2013

### **Einführung**

Kältemittel sollen umweltverträglich sein und zu einem energieeffizienten Betrieb der Kältemaschine beitragen. Die Diskussion über die Auswahl des richtigen Kältemittels ist nicht zuletzt wegen der bestehenden und kommenden gesetzlichen Richtlinien in vollem Gang. Unter diesen Gesichtspunkten bietet sich Luft als Kältemittel durchaus als interessante Alternative zu den chemischen Kältemitteln an.

In dem Vortrag wird ausgehend von Veröffentlichungen ab dem Jahr 1850 zusammengefasst, welche lange und wechselvolle Geschichte Luft als Kältemittel hat, welche Arten der Prozessführung diskutiert und welche technischen Lösungen in früheren Zeiten realisiert wurden. Etwa hundert Jahre später analysierten viele Ingenieure bis hin zum Nestor der Kältetechnik Rudolf Plank den Kaltluftprozess und zeigten seine die Vorteile und Grenzen auf. Auch heute gibt es immer wieder neue Veröffentlichungen zu diesem Thema.

Es wird aufgezeigt, welche Bereichen Kaltluft-Kältemaschinen in der Vergangenheit genutzt wurden und wo sie heute gebräuchlich sind. Dabei wird der Bogen von der Tieftemperaturkälteanwendung, der Bergwerksbewetterung über Sonderanlagen in Raumstationen bis zur Klimatisierung von Fahrzeugen und Flugzeugen gespannt. Zum Abschluss wird ein Ausblick darüber gewagt, welche Einsatzmöglichkeiten sich in der Zukunft abzeichnen.

# Luft als Kältemittel

Geschichte der Kaltluftkältemaschine

Ingwer Ebinger



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

*Hamburg University of Applied Sciences*



## Gliederung

1. Einleitung
2. Die Kaltluftkältemaschine gestern
3. Die Kaltluftkältemaschine heute
4. Die Kaltluftkältemaschine morgen
5. Zusammenfassung

## 1. Einleitung

Ursprünglich wurde Kälte durch die Nutzung natürlicher Ressource bereitgestellt. Es wurde Eis aus Gewässern „gewonnen“, gelagert und verteilt.

Zur Absicherung der Kälteversorgung war es notwendig, Kälte (z.B. in Form von Eis) künstlich zu erzeugen.



## Verfahren der Kälteerzeugung

### Verschleißprozesse

#### Schmelzen fester Körper

- Wassereis
- Eis eutektischer Lösungen

#### Sublimieren fester Körper

- Trockeneis (CO<sub>2</sub>)

### ohne Kältemittel

#### Thermoelektrischer Effekt

- Thermoelement
- Peltier-Element

### mit Kältemittel (Kreisprozesse)

#### Verdampfen und Kondensieren

- Kompressionsverfahren
- Sorptionsverfahren

#### Expansion von Gasen

- Gaskältemaschinen
- **Kaltluftkältemaschinen**

## Thermodynamische Grundlagen der Kaltluftkältemaschine

### JOULE-Thomson-Effekt

(Reale) Gase erfahren durch Drosselung (Druckabsenkung) eine Temperaturänderung.

### Linkslaufender Kreisprozess

(JOULE-Prozess, BRYTON-Process)

Zustandsänderungen:

$A_0 - A_1$  isentrope Verdichtung

$A_a - E_1$  isobare Abkühlung

$E_1 - A_2$  isentrope Expansion

$A_2 - A_0$  isobare Wärmezufuhr

### Der ideale Luft-Expansionsprozeß

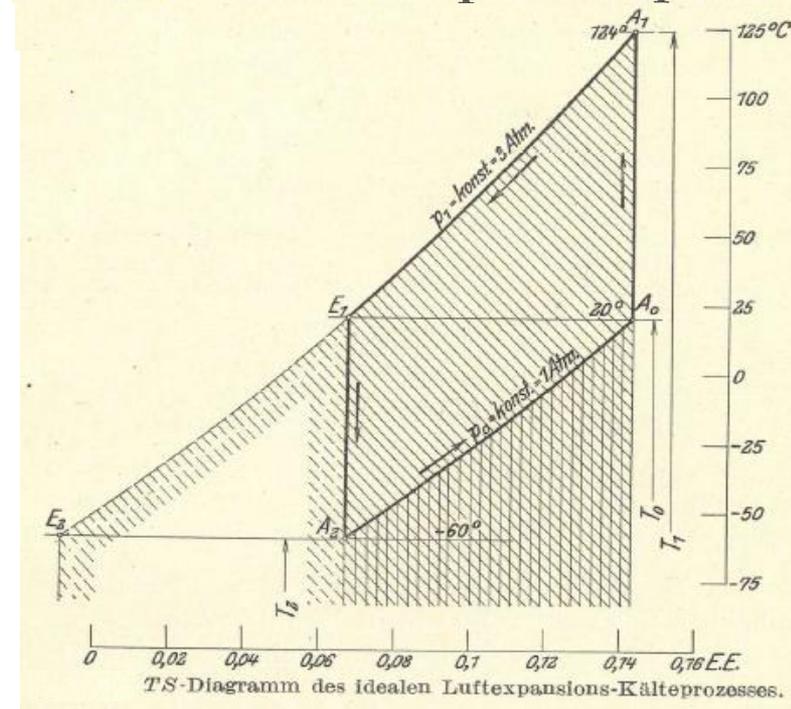


Abbildung: P. Ostertag: Kälteprozesse 1933, Verlag Julius Springer

## 2. Die Kaltluftkältemaschine gestern

Die erste Nutzung einer Kaltluftkältemaschine zur Kühlung von Räumen

1844 John Gorrie

Der Einsatz von Kolbenmaschinen für die Verdichtung und die Expansion der Luft kennzeichnet diese Maschinen

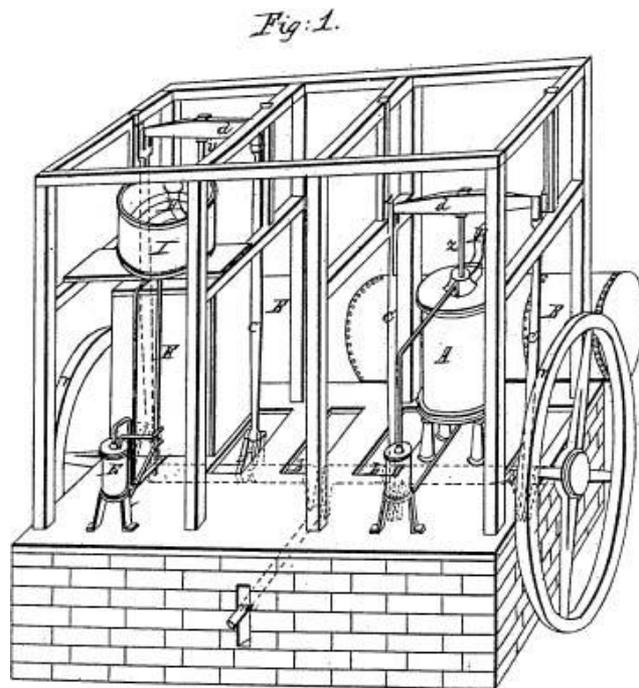


Abbildung aus der Patentschrift 6. Mai 1851.



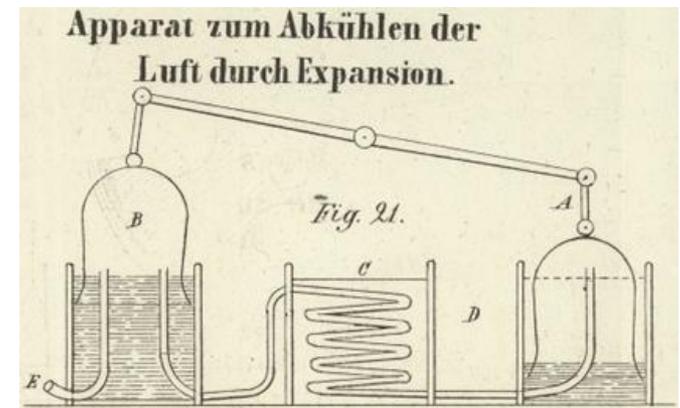
© National Museum of American History, SI

Abbildung: links: [www.britannica.com](http://www.britannica.com) rechts: [www.floridaufsd.org](http://www.floridaufsd.org)

## 1853 Beginn der ingenieurmäßigen Auseinandersetzung mit Kaltluftmaschinen

**Ueber Abkühlung der Luft durch Expansion.**  
Aus dem Civil Engineer and Architect's Journal, October 1853, S. 364.

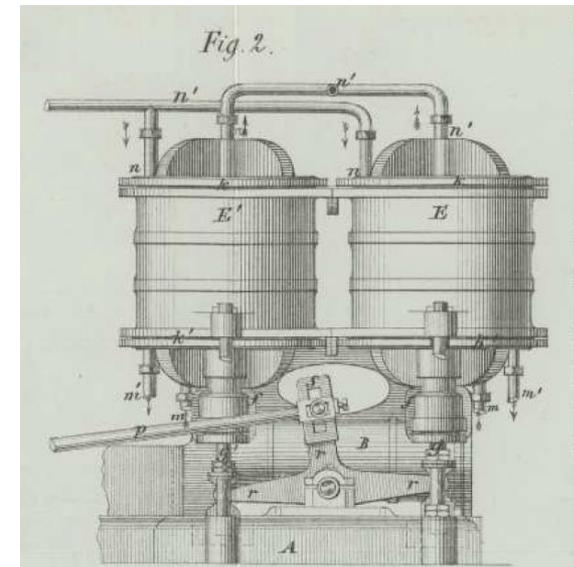
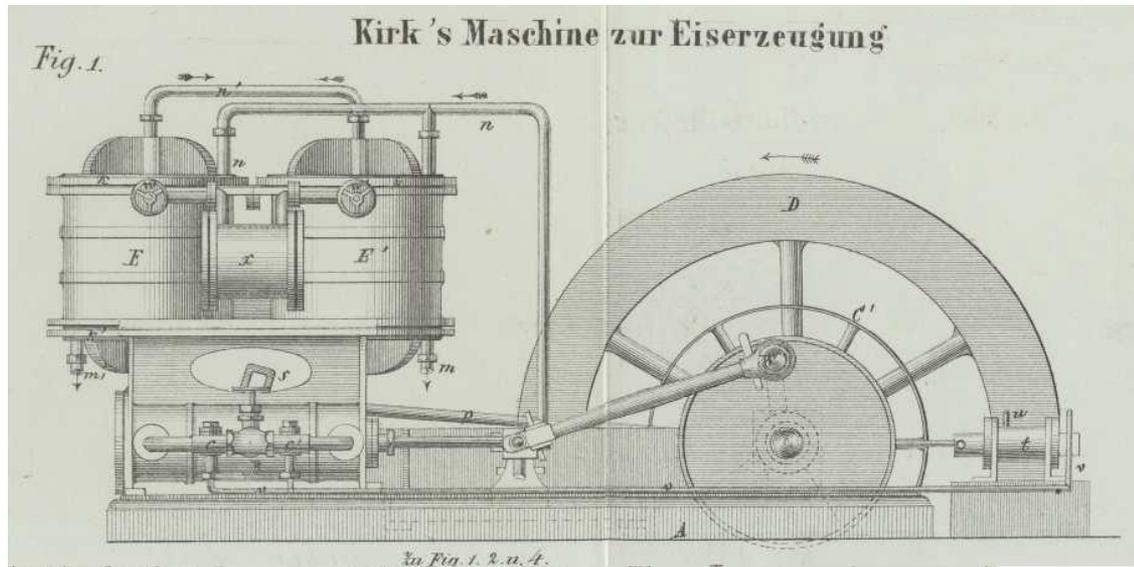
Das Princip der Erfindung besteht in der Abkühlung der Luft durch Expansion. Die Luft von der atmosphärischen Temperatur wird zuvörderst in einen glockenförmigen Behälter zusammengepreßt und die durch diese Compression erzeugte Wärme wird dadurch absorbiert, daß man die Luft durch eine Anzahl von Röhren, welche unter Wasser liegen, strömen läßt, wobei sie also in ihrem comprimierten Zustande die Normal-Temperatur der Atmosphäre erlangt, d. h. 90° F. (32,2° C.). Die Luft geht alsdann in einen andern glockenförmigen Behälter über, wo sie sich zu dem gewöhnlichen atmosphärischen Druck expandirt, und während dieser Expansion absorbiert sie so viel Wärme, daß ihre Temperatur bis auf 60° F. (15,5° C.) sinkt. Man läßt sie hierauf in den zu ventilirenden Raum einströmen.



In der Literatur findet man ausführliche Beschreibung von ausgeführten Anlagen oder Patenten. Es gibt jedoch eine theoretischen Betrachtungen, obwohl die Grundlagen bereits erarbeitet waren: 1824: Said CARNOT: Kreisprozess ; 1842: R. Meyer: 1. HS; 1850: Rudolf Clausius: 2. HS, Entropie

**1862 Alexander Kirk**

## Kaltluftkältemaschine mit geschlossenem Kreislauf



Kirk's Maschine zu Bathgate kann beiläufig 2 Tonnen Eis mit Wasser von atmosphärischer Temperatur in 24 Stunden erzeugen.

Ihre Anschaffungskosten sind viel niedriger als diejenigen einer Aethermaschine von gleicher Leistung.

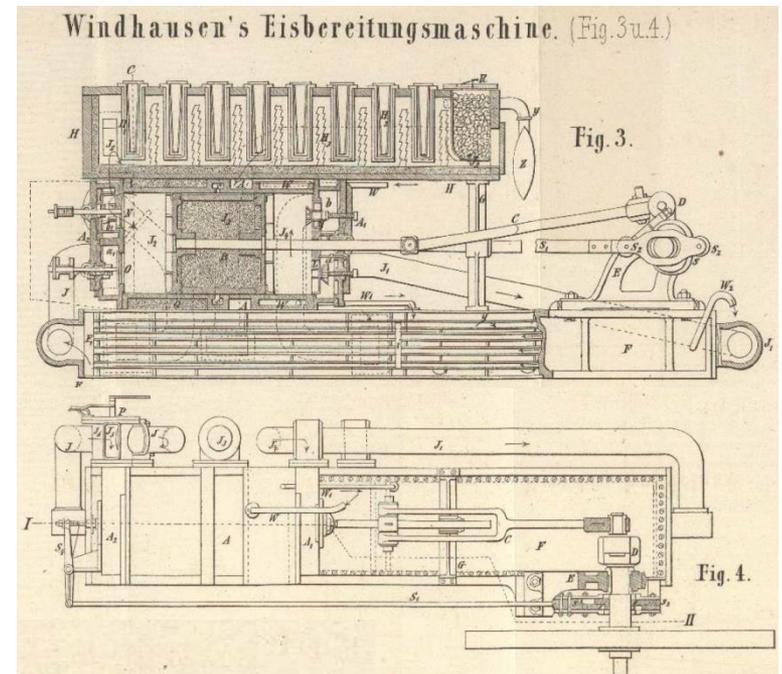
## 1870 Franz Windhausen (Braunschweig)



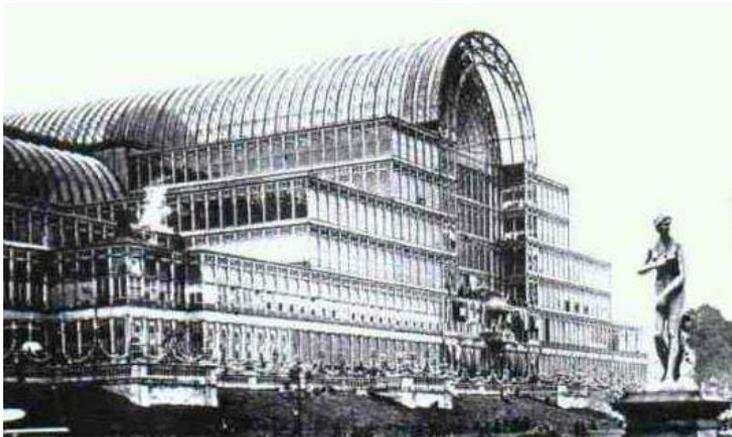
Das Maximum der Kälte ist erreichbar, wenn sämtliche durch die Luftverdichtung, ferner durch die Reibung des Kolbens zc. frei werdende Wärme vom Kühlwasser aufgenommen und abgeleitet wird.

Eine solche Maschine wird jetzt im Krystall-Palast in London aufgestellt.

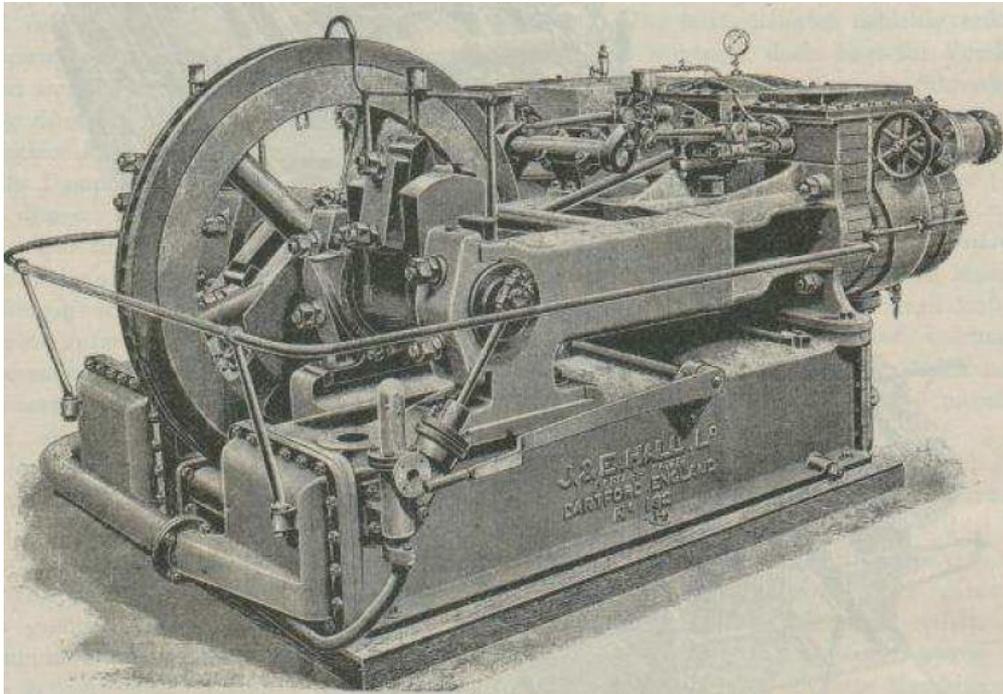
J. J.



Erste Weltausstellung in London 1851: **Kristallpallast**



**geschlossener Kreislauf**

**1880 J. und E. Hall**


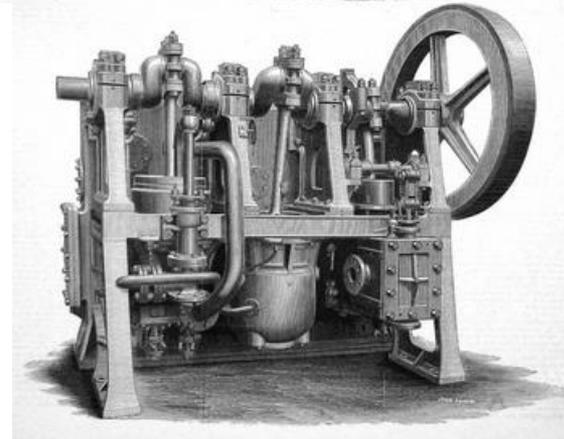
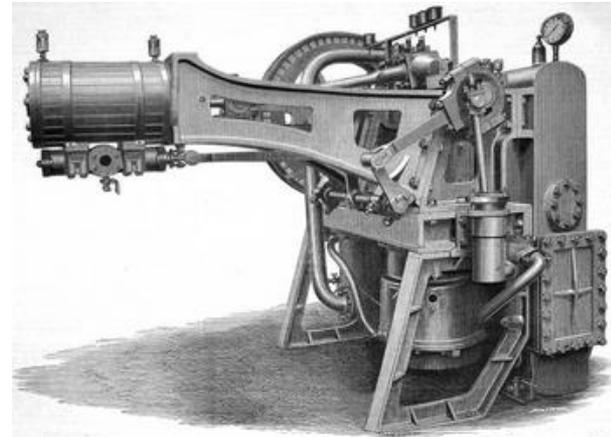
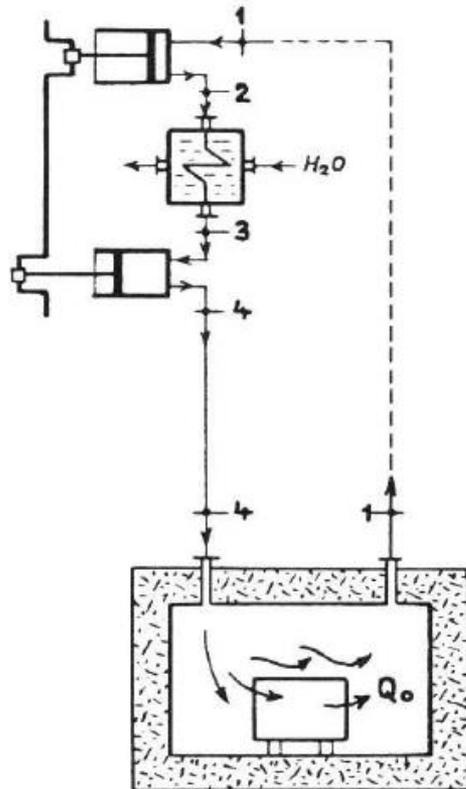
Einsatz der Kaltluftkältemaschinen auf Kühlschiffen zum Transport von Fleisch nach England und in Kühlhäusern.

Arbeitszeit pro Tag zu 24 Stunden	Temperaturen in Grad Celsius		
	Seewasser	Schneebüchse	Schiffsräume
8 Stunden	4,4	— 42,0	— 16,0
8 "	10,0	— 38,0	— 15,0
12 "	20,0	— 31,0	— 15,0
16 "	24,0	— 28,0	— 15,0
18 "	28,0	— 25,5	— 15,5
16 "	25,0	— 25,0	— 15,0
12 "	20,0	— 29,4	— 14,0
12 "	16,6	— 33,3	— 14,0
8 1/2 "	16,6	— 35,0	— 14,0

1883 P. Giffard (Paris)

1. Patent 1873; 2. Patent 1877 (vereinfacht)

Offener Kreislauf



1886 T. B. Lightfoot

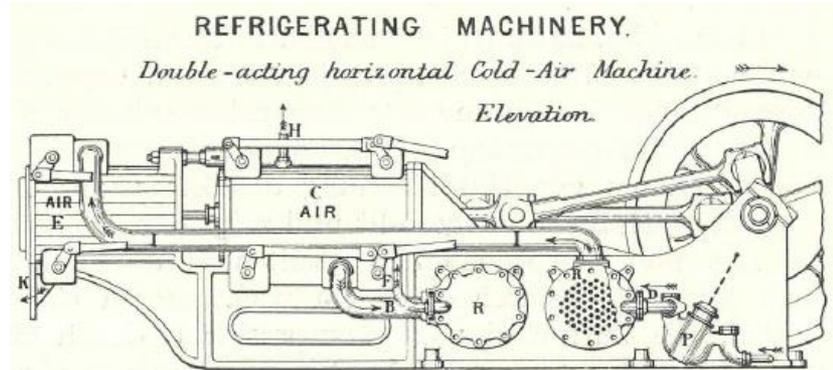
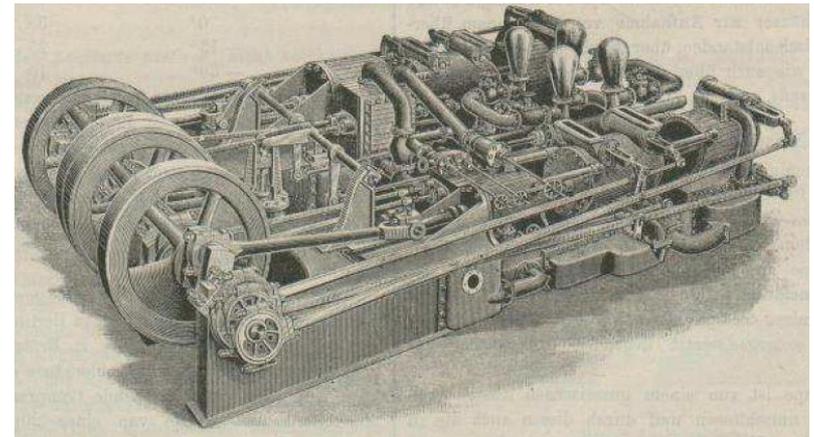
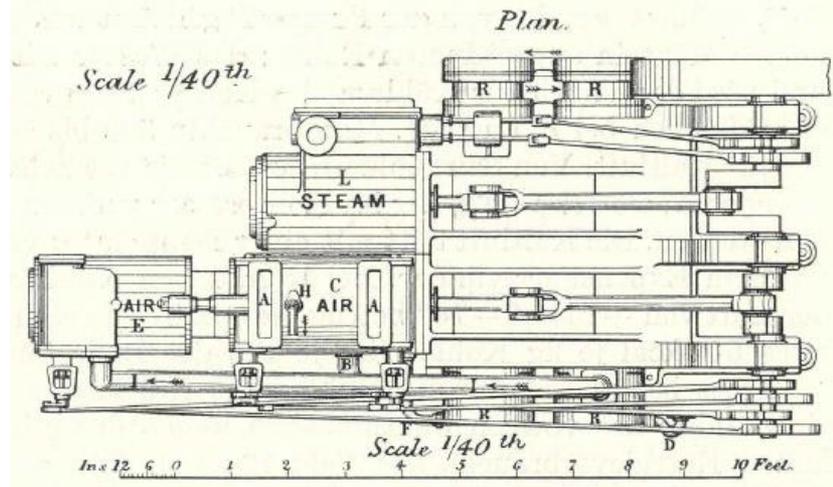
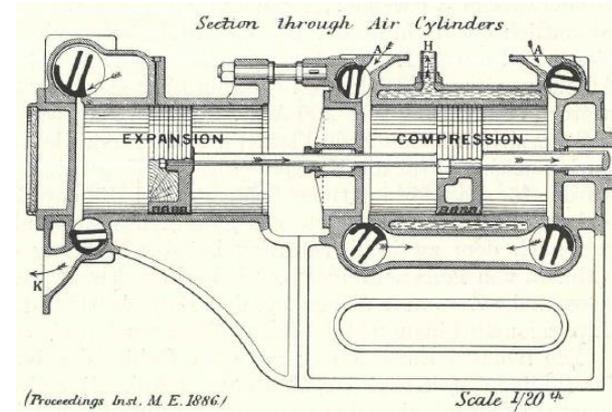
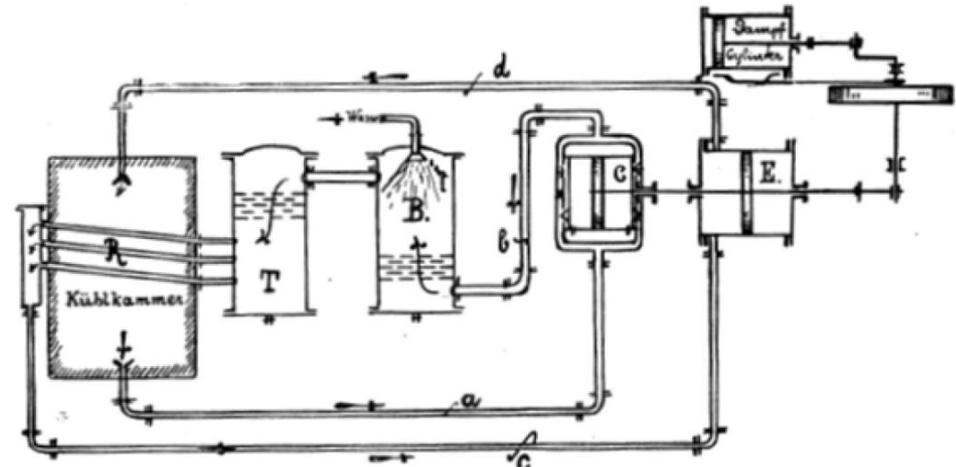
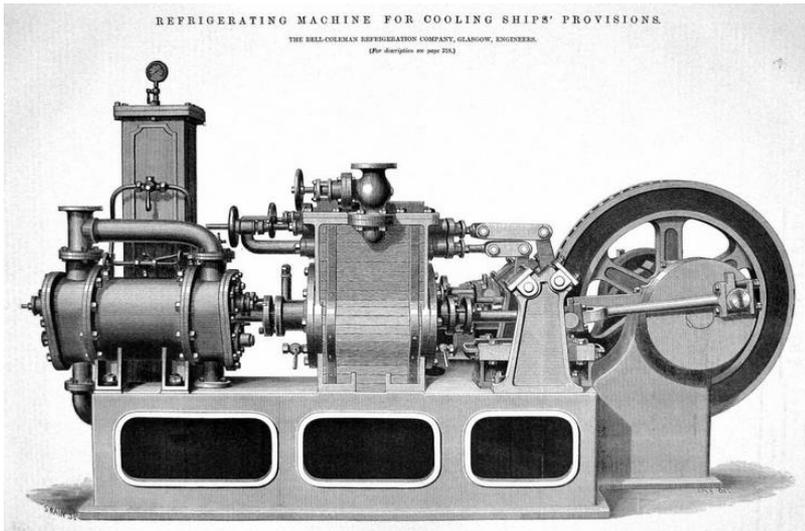


Abb. 29.



Zeichnung: R. Plank: Handbuch der Kältetechnik; Bd. 1, Springer-Verlag 1954; S.: 49; Bild: Dingers Journal: Ueber Kälteerzeugungsmaschinen; Fr. Freytag in Chemnitz, Jahrgang 1893, Band 287, Miszelle (S. 73)

1877 Bell-Coleman



Figur 35. Bell-Colemann'sche Kaltluftmaschine.

Im J. 1885 löste sich die *Bell-Coleman Mechanical Refrigerating Company* in die *Haslam Foundry and Engineering Company* auf und in den Besitz dieser Firma gelangte nunmehr das Ausführungsrecht für die von *Bell-Coleman* und *Haslam* erworbenen Patente. Während der nur wenigen Jahre des Bestehens der *Bell-Coleman Company* hat dieselbe im Ganzen 106 Kältemaschinen für Leistungen von 3000 bis 130.000 Cubikfuss engl. Luft in der Stunde nach ihrem Patent erbaut und unter anderem auch für das Dampfschiff *City of Rome*,

Schema: Goettsche: Kältemaschinen; 1907; S.87

Text: Dinglers-Journal: Fr. Freytag, Chemnitz: Ueber Kälteerzeugungsmaschinen., Jahrgang 1893, Band 287, Miscelle (S. 73)

## 1881 Dunedin – „Erstes Kühlschiff der Welt“



**Dunedin Chronicle**  
AND  
PATEA-RANGITIKEI ADVERTISER.  
"NULLA DIES SINE LINEA."  
TUESDAY, OCTOBER 24, 1882.

Up to the end of 1881, eight vessels from the Australasian colonies had been fitted up; the most powerful machines being those in the "Cuzco" and the "Dunedin." They are adapted for cooling 24,000 cubic feet in the tropics, a space which by careful packing will hold dead meat to the amount of 250 or 300 tons. The above are the most important facts in the history of marine meat refrigeration up to the present date.

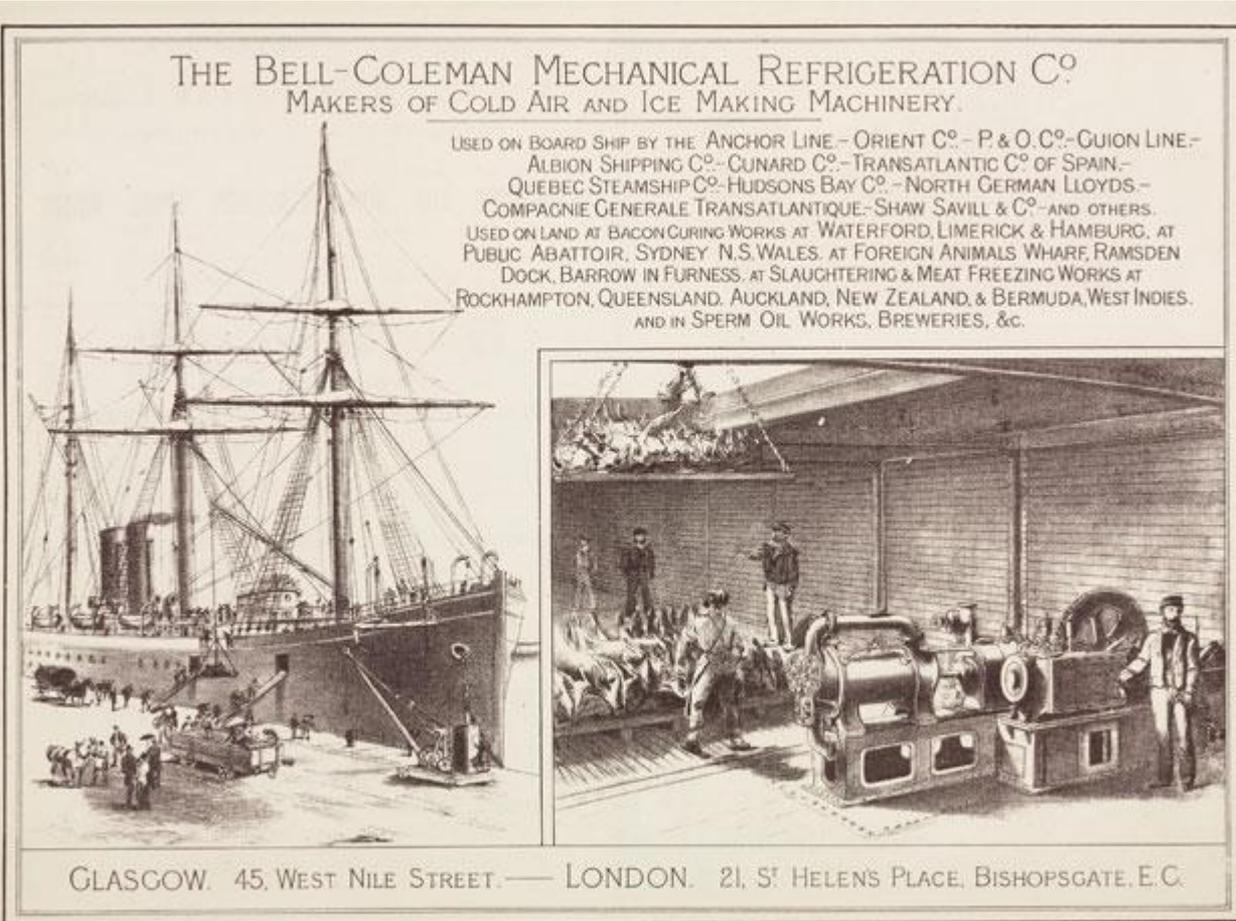
The 1320 ton 73 metre **Dunedin** was built by Robert Duncan and Co at Port Glasgow in 1874 at a cost of £23,750. In 1881 was refitted with a **Bell Coleman refrigeration machine** with which she took the first frozen load of meat from New Zealand to the United Kingdom. Although experimental voyages with refrigerated shipping had been made the previous year by Australian and American vessels, the Dunedins trip was the **first fully successful refrigerated shipment**. The Dunedin continued in the frozen meat trade until she was lost without trace in 1890, en route from new Zealand to the UK - it is presumed she hit an iceberg of Cape Horn.

1885

Bell-Coleman

**THE BELL-COLEMAN MECHANICAL REFRIGERATION CO<sup>o</sup>**  
**MAKERS OF COLD AIR AND ICE MAKING MACHINERY.**

USED ON BOARD SHIP BY THE ANCHOR LINE – ORIENT CO<sup>o</sup> – P & O CO<sup>o</sup> – GUION LINE –  
 ALBION SHIPPING CO<sup>o</sup> – CUNARD CO<sup>o</sup> – TRANSATLANTIC CO<sup>o</sup> OF SPAIN –  
 QUEBEC STEAMSHIP CO<sup>o</sup> – HUDSONS BAY CO<sup>o</sup> – NORTH GERMAN LLOYDS –  
 COMPAGNIE GENERALE TRANSATLANTIQUE – SHAW SAVILL & CO<sup>o</sup> – AND OTHERS.  
 USED ON LAND AT BACON CURING WORKS AT WATERFORD, LIMERICK & HAMBURG. AT  
 PUBLIC ABATTOIR, SYDNEY N.S. WALES. AT FOREIGN ANIMALS WHARF, RAMSDEN  
 DOCK, BARROW IN FURNESS. AT SLAUGHTERING & MEAT FREEZING WORKS AT  
 ROCKHAMPTON, QUEENSLAND. AUCKLAND, NEW ZEALAND. & BERMUDA, WEST INDIES.  
 AND IN SPERM OIL WORKS, BREWERIES, &c.

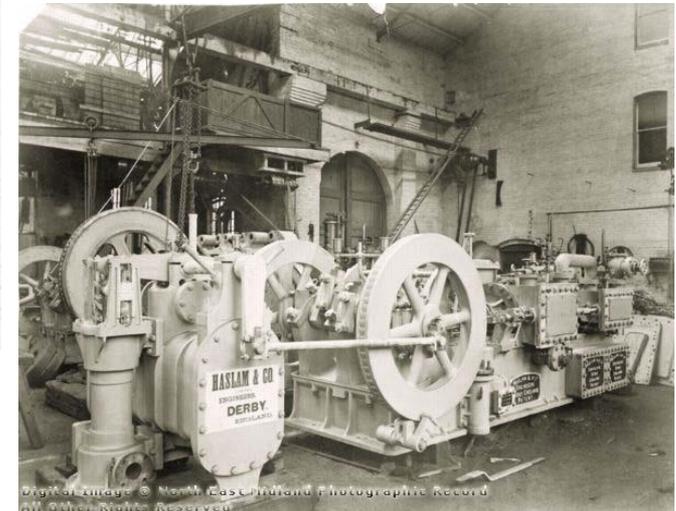
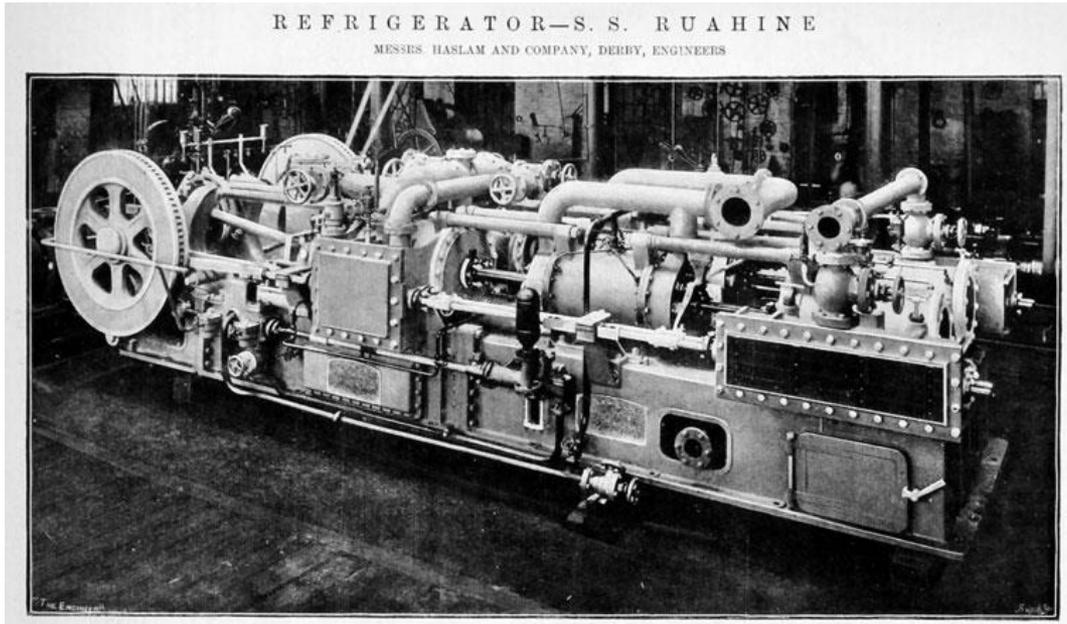


GLASGOW. 45, WEST NILE STREET. — LONDON. 21, ST. HELENS PLACE, BISHOPSGATE, E.C.

PRINTED & PUBLISHED BY J. & J. B. JONES, LONDON & GLASGOW.

 Quelle: The Conquest of Cold: <http://www.pbs.org/wgbh/nova/tech/conquest-of-cold.html>

1885 A. S. Haslam



**HASLAM'S DRY-AIR FREEZING MACHINES,**

*Made under the Haslam & Bell-Coleman Patents.*

USED FOR THE PRESERVATION OF FOOD ON BOARD SHIP AND ON SHORE.  
ADOPTED BY THE LEADING SHIP OWNERS AND MEAT COMPANIES IN ALL PARTS OF THE WORLD.

HASLAM'S Cane Mills and Sugar Machinery.

HASLAM'S Hydraulic Presses for all Purposes.

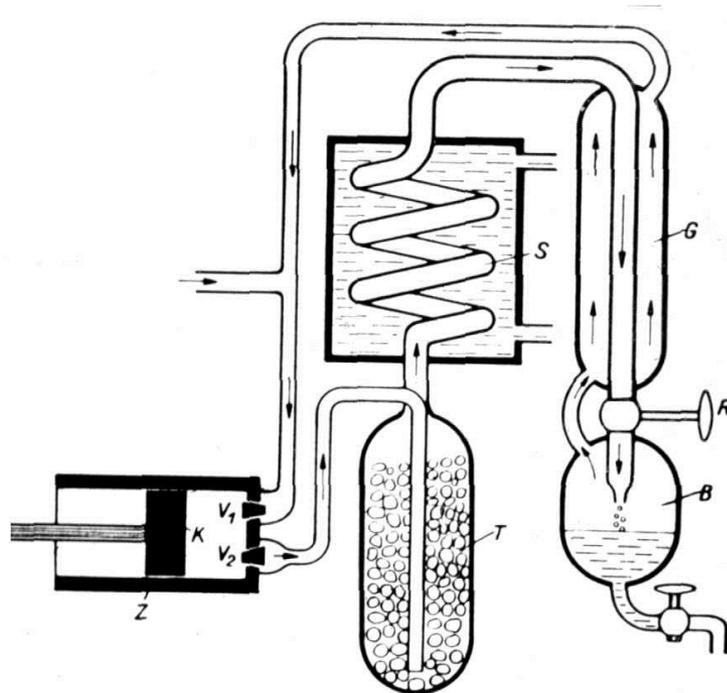
SPECIAL MEDAL and AWARD, Sydney Exhibition, N.S.W. | GOLD MEDAL, Fisheries Exhibition, London, 1883  
GOLD MEDAL, Liverpool Exhibition, 1886. | Calcutta " Calcutta, 1884.  
GOLD MEDAL, Havre Exhibition, 1887.

*The HASLAM FOUNDRY & ENGINEERING Co. Lim. Derby.*

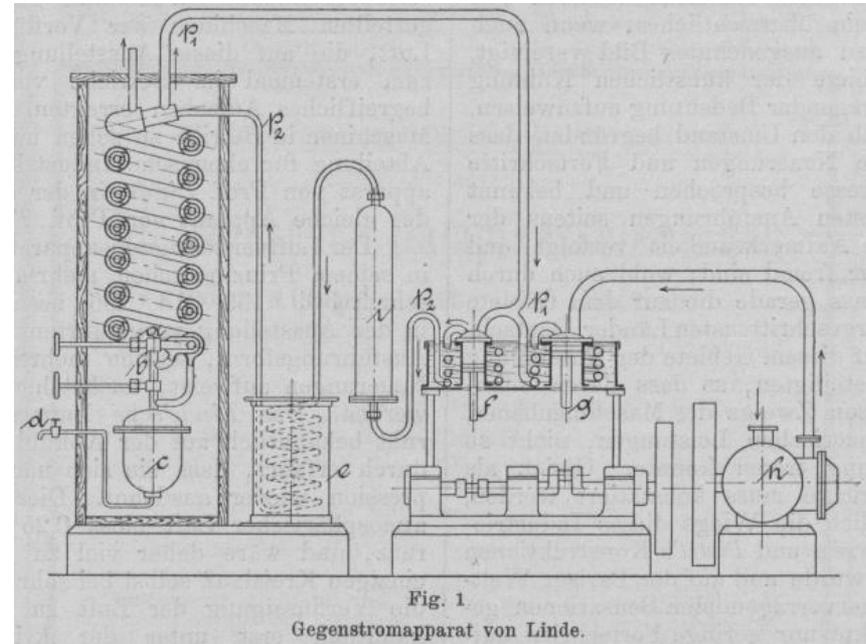
Telegraphic Address: 'ZERO, DERBY.'

[4]

1895 C. v. Linde

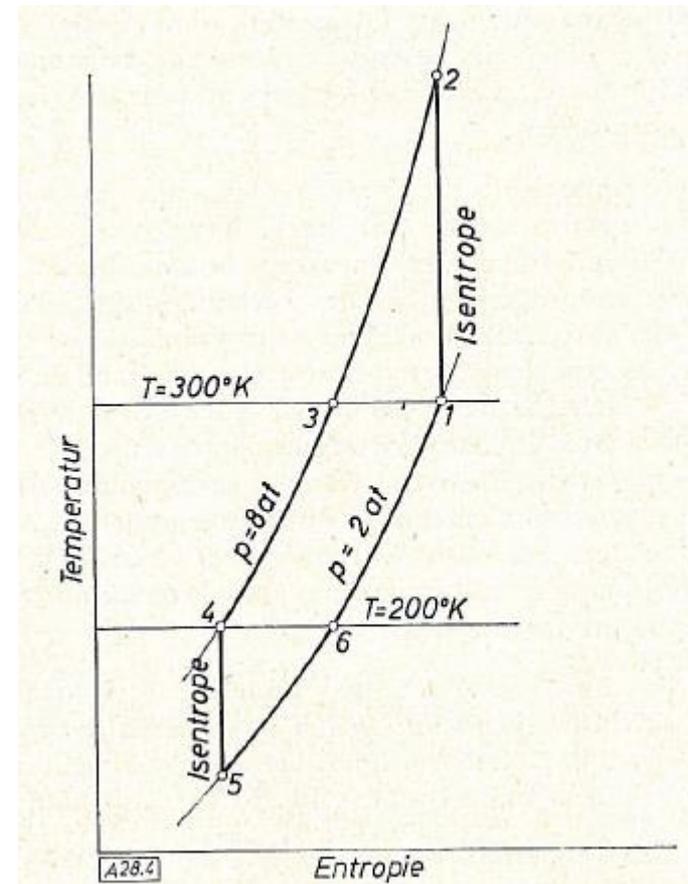
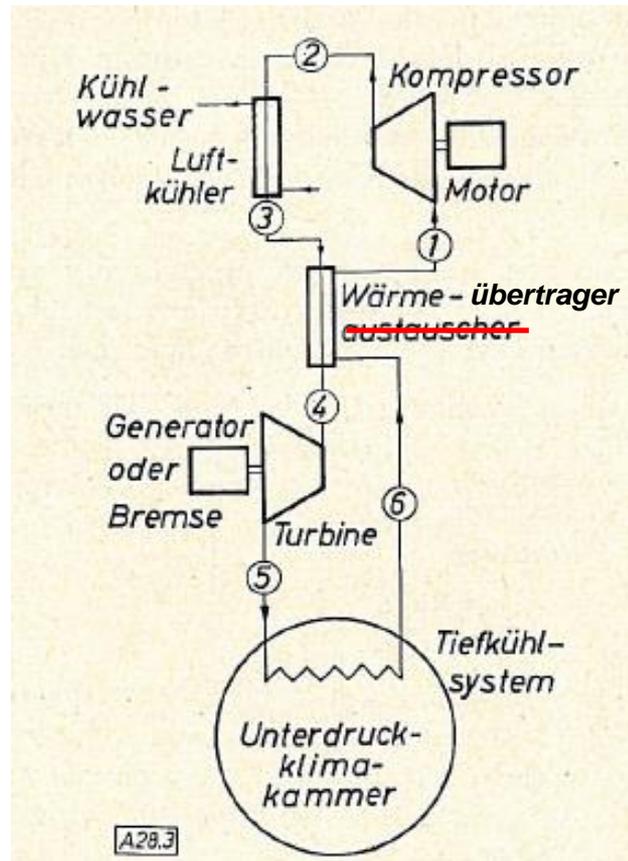
 Verfahren zur Luftverflüssigung (ca.  $-170^{\circ}\text{C}$ )


Luftverflüssigungsanlage nach Linde



Dieser Prozess verläuft als Kreisprozess kontinuierlich, und werden mit dem aus-  
 gestellten und in Betrieb gesetzten Apparate, dessen Preis mit 15000 Frcs. angegeben ist, pro Stunde 5 l flüssige  
 Luft erzeugt, welche in den bekannten Flaschen mit dop-  
 pelter Wandung, deren Zwischenraum evakuiert und innen  
 versilbert ist, längere Zeit, auch mehrere Tage aufbewahrt  
 werden kann.

## Die KLKM in der Tieftemperaturkältetechnik



### 3. Die Kaltluftkältemaschine heute

#### Anwendung in Flugzeugklimaanlagen

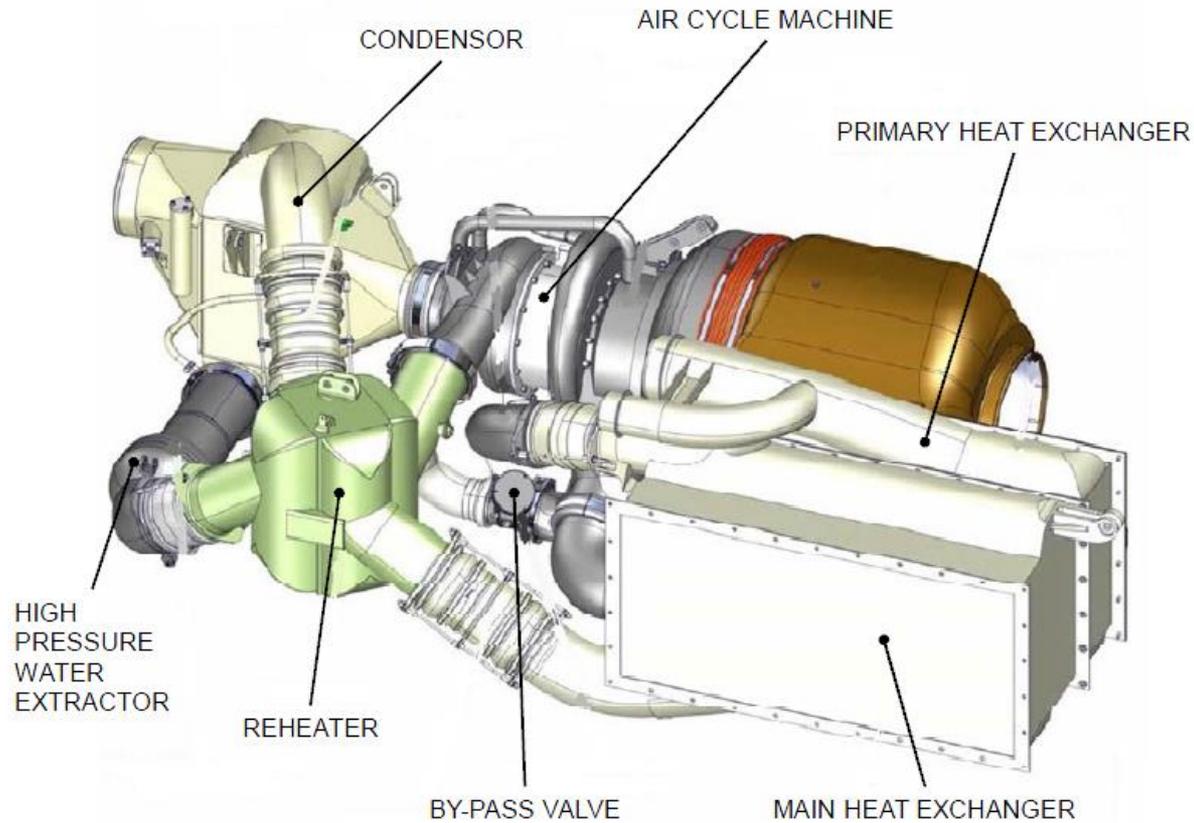
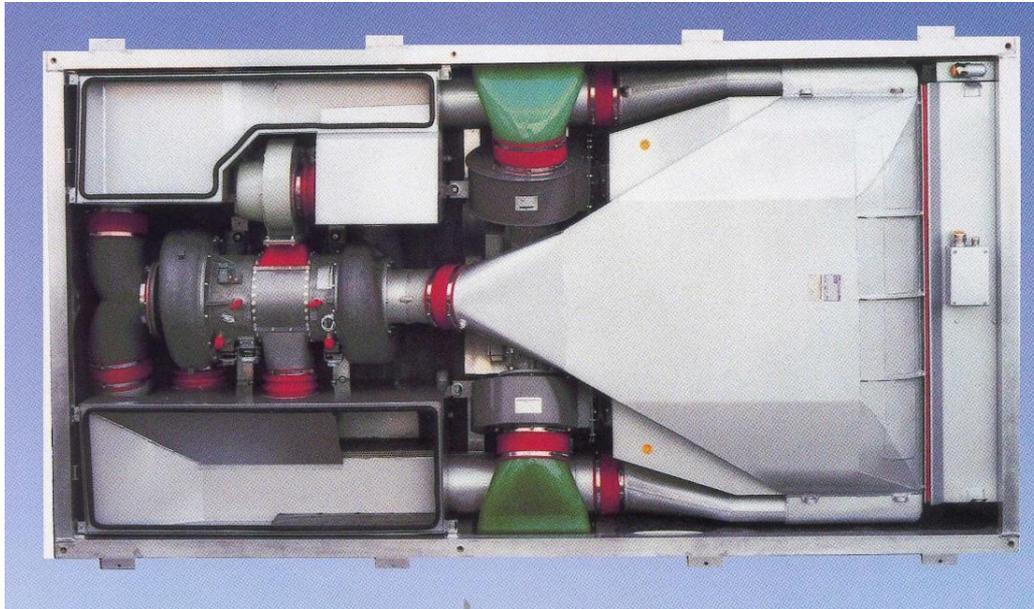


Abbildung: Liebherr-Aerospace Toulouse SAS. 2010. Airbus single aisle packs introduction of standard; practices manual LSF1958-14. 2010

## Anwendung in Schienenfahrzeugen



**Kaltluftkältemaschine mit Motor-Turbine im ICE-3**

**Kälteleistung. 35 kW;  $t_i = 22^\circ\text{C}$ ;  $t_a = 35^\circ\text{C}$ ,  $\phi_a = 50\%$**

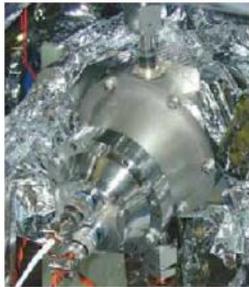
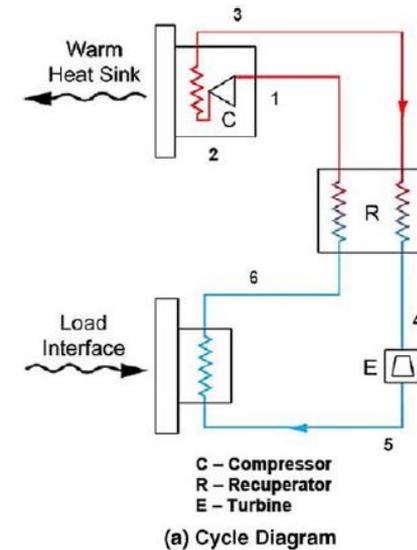
Abbildungen: R. Andrä: „Luftgestützte Klimatisierung von Reisezugwagen“, ZEV + DET Glas. Ann. 124 (2000) 11 Nov.

3. Die KLKM heute

Anwendung in der Raumfahrt

Kryokühler

Kälteleistung: (6...40) W; Raumtemperatur: 46 K



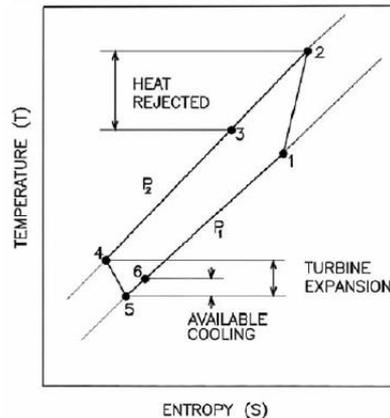
Compressors



Recuperators



Turbines



(b) Temperature-Entropy Diagram

Abbildungen: Zagarola, M.; McCormick, J.: High-capacity turbo-Brayton cryocoolers for space applications; Cryogenics 46 (2006) 169–175

## 4. Die Kaltluftkältemaschine morgen

„gehäuselose“ Kaltluftkältemaschine (Liebherr)

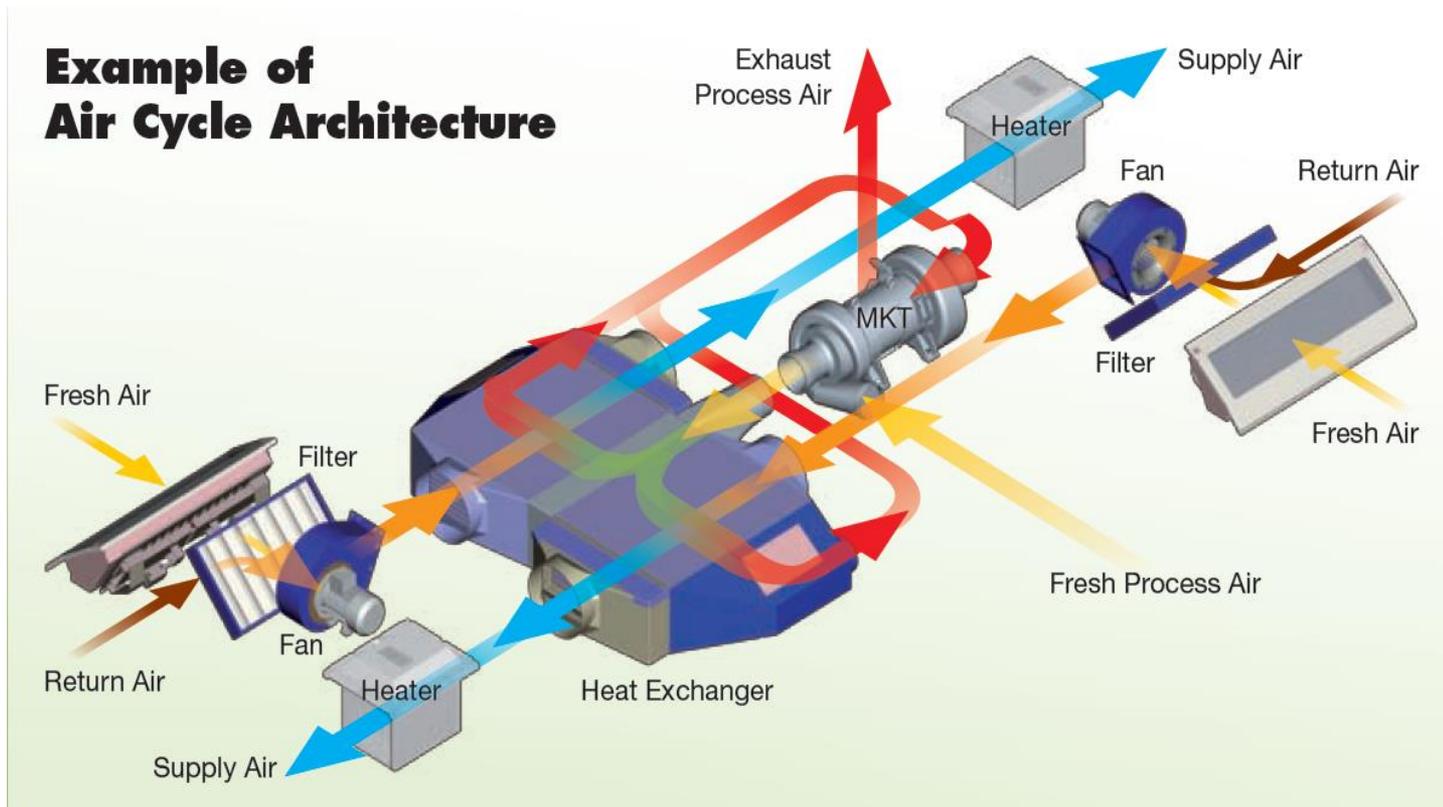
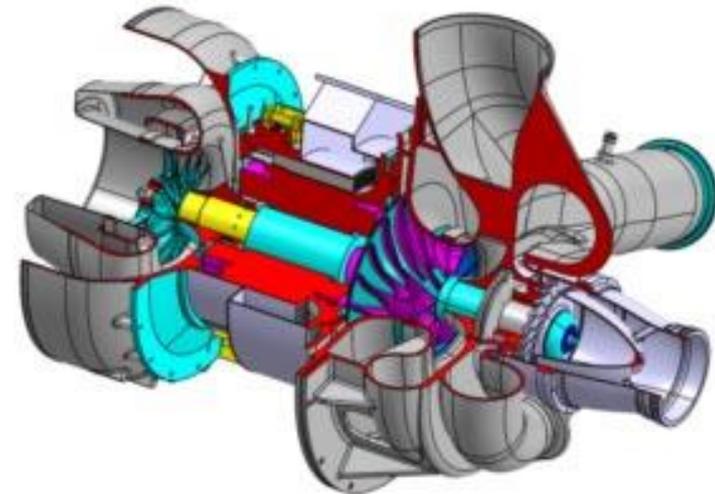


Abbildung: LVF-10.038-02.10-1enGB

## Motorisierter Verdichter mit „variabler“ Turbine



125 kW ACM für Flugzeugklimaanlagen

### Kaltluftkältemaschine mit Wärmepumpenfunktion (UPEC)

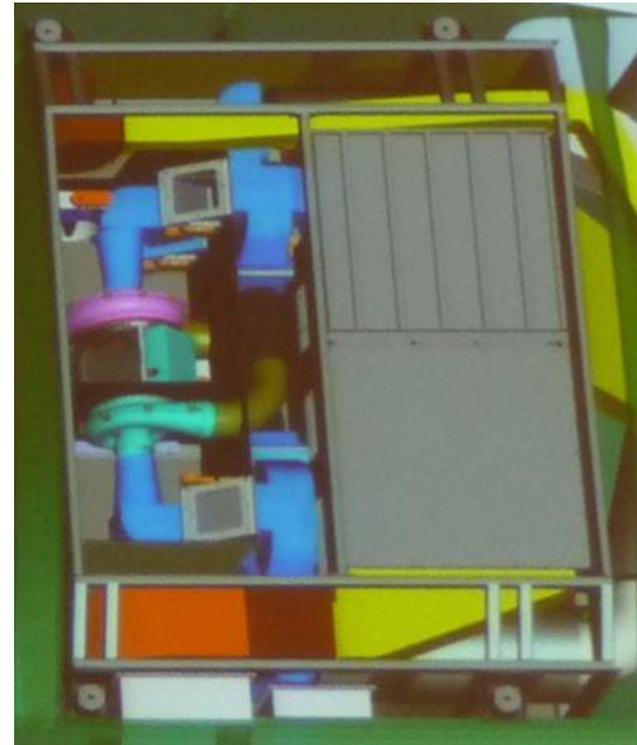
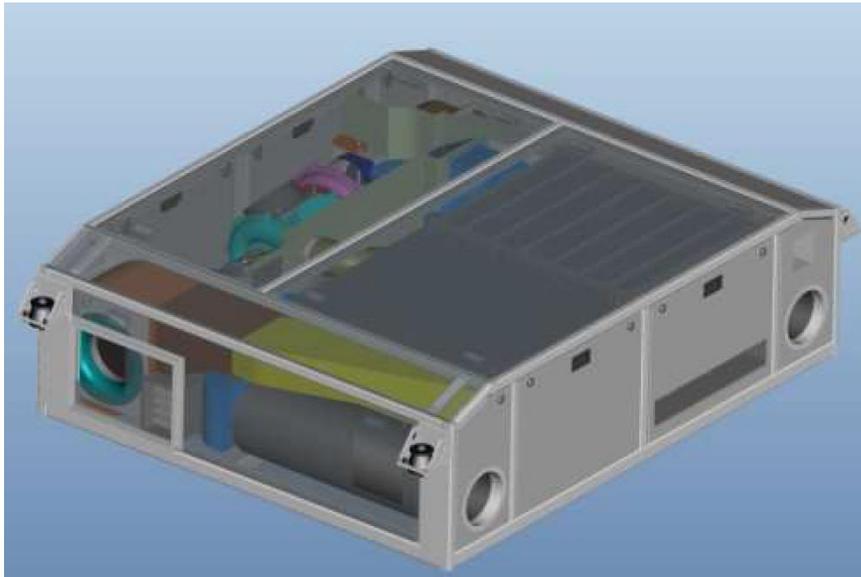
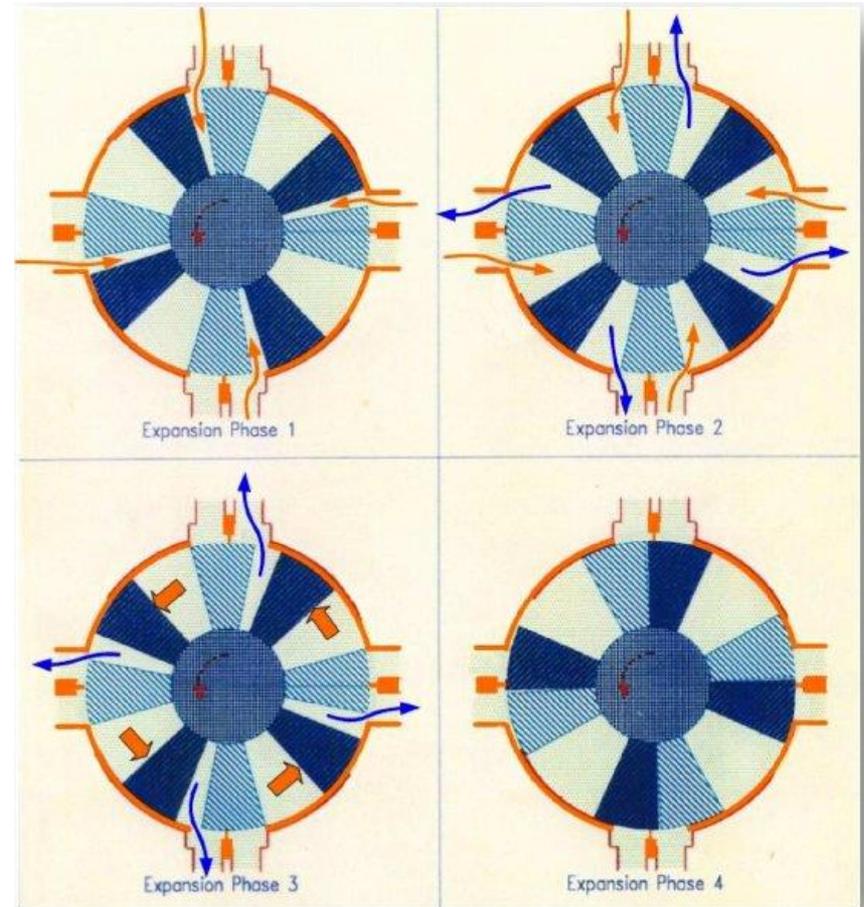


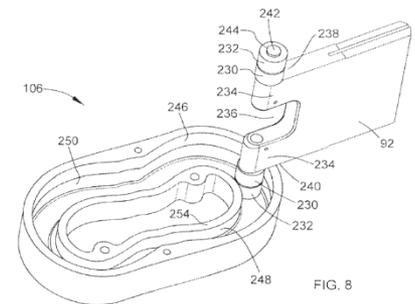
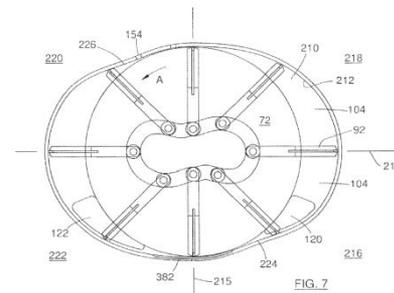
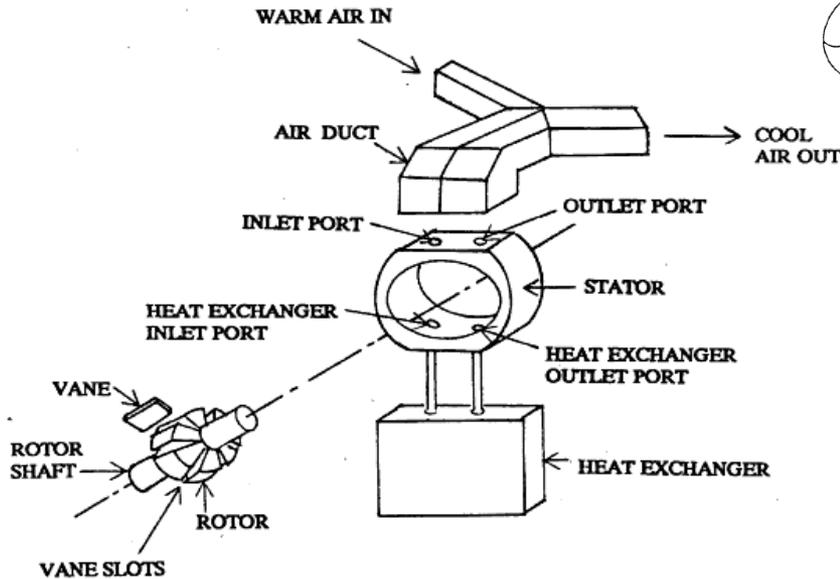
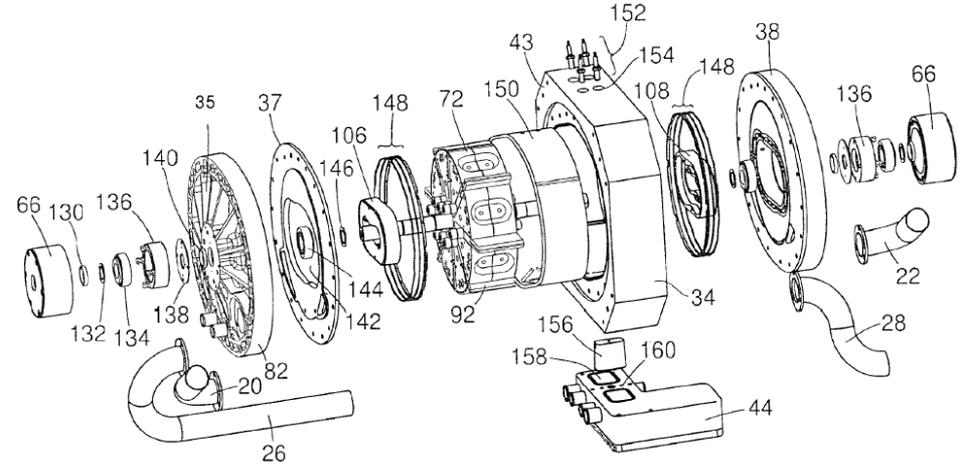
Abbildung: UPEC:Air Cooling Machine

Verdichter und Expander in einer Maschine

Beispiel: Thermodyna (J. Schuckey)



**Verdichter und Expander in einer Maschine Beispiel: ROVAC-System  
Flügelzellenmaschine zur Verdichtung und Expansion**



Schema: Mei; Chen; Kyle: ALTERNATE NON-CFC MOBILE AIR CONDITIONING

Abbildung: US-Patent 8 336 518 B2

## 4. Zusammenfassung

- Kaltluftkältemaschinen waren die ersten kommerziell genutzten Kältemaschinen (ab 1844)
- Kennzeichnend war der Einsatz von Hubkolbenmaschinen zur Verdichtung und Expansion
- Offene und geschlossene Prozessführungen wurden umgesetzt
- Den ersten Konstruktionen ging keine tiefgreifende theoretische Analyse voraus
- Das Problem der Schnee- und Eisbildung bei Entspannung der Luft unter den Gefrierpunkt wurde schnell erkannt und durch unterschiedliche Vorrichtungen und Verfahren gelöst
- Einsatzbereiche für KLKM waren die Klimatisierung, die Eisherzeugung und der Kühlguttransport
- Die Bewertung der Betriebskosten zeigte anfänglich Vorteile der KLKM gegenüber Äthermaschinen, mit dem Aufkommen anderer Kältemittel, insbesondere des Ammoniaks, war die KLKM nicht mehr konkurrenzfähig, es begann der Niedergang der Kaltluft-Technologie
- Aufgrund der ökologischen Neubewertung von Kältemittel und Kälteprozesses zeichnet sich eine Renaissance der natürlichen Kältemittel, also auch der Kaltluftkältemaschine (?) ab
- Der Einsatz von KLKM neben den angestammten Gebieten (Luftfahrt, Tieftemperatur) scheint z.B. in der Bahnklimatisierung möglich zu sein



[Ingwer.ebinger@haw-hamburg.de](mailto:Ingwer.ebinger@haw-hamburg.de)  
[www.haw-hamburg.de](http://www.haw-hamburg.de)

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

Foto: Ebinger, 16.02.12