

# Entwicklung der Kältemittelverdichter

von der Quecksilberabdichtung zum hermetischen Verdichter

Adalbert Stenzel

Vortrag gehalten auf der gemeinsamen Veranstaltung der Senioren des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins e. V. (DKV), des Bezirksvereins München im DKV und der Mitglieder des Historische Kälte- und Klimatechnik e.V. (HKK) am 12. 5. 2006 in München.

## Inhaltsverzeichnis:

Seite

|   |    |
|---|----|
| Vorgeschichte .....   | 1  |
| Bau des ersten Kältemittelverdichters von Linde. ....                           | 2  |
| Kolbenverdichter mit geschlossenem Kurbelgehäuse und Drehkolbenverdichter. .... | 5  |
| Turboverdichter zur Prozesskühlung und Klimatisierung .....                     | 6  |
| Entwicklung der Kleinkälte- und gewerblichen Verdichter .....                   | 8  |
| Kältemittel und Dichtheit als Schlüsselfragen .....                             | 10 |
| Zusammenfassung .....   | 11 |
| Literaturquellen .....  | 12 |

## Vorgeschichte

Die erste dokumentierte Nutzung thermodynamischer Prozesse zur "Kälteerzeugung", erfolgte 1755 durch William Cullen. Ihm gelang es, durch Evakuierung eines teilweise mit Wasser gefüllten Gefäßes, Eis zu erzeugen; dies wird in der Literatur als Geburtsjahr der Kältetechnik beschrieben. - Alle drei Systeme der Kälteerzeugung, die heute industriell angewandt werden, waren nach Plank <sup>1)</sup> Mitte des 19ten Jahrhunderts schon bekannt.

Jakob Perkins hat 1834 sein britisches Patent 6662 über eine Kaltdampfmaschine mit allen wesentlichen Teilen angemeldet. James Harrison entwickelte diese Bauart weiter. In den Jahren 1856 und 1857 meldete er seine grundlegenden britischen Patente an, wobei er den schon von Perkins verwendeten, sehr feuergefährlichen Äthyläther als Kältemittel beibehielt. Er baute eine solche Maschine und installierte sie auf dem Segler "Norfolk". Auf der ersten Reise 1873 von Sydney nach London, mit Gefrierfleisch beladenen, entstand unterwegs ein Schaden an der Kältemaschine, der den Verlust der gesamten Ladung und damit den Ruin Harrisons zur Folge hatte. - Der dritte bedeutende Förderer des Kaltdampfmaschinenbaues war Charles Tellier in Paris, der 1864 seine ersten Anlagen mit Methyläther als Kältemittel baute. Die Feuergefahr war damit zwar nicht behoben, aber doch einigermaßen gemindert; dafür aber musste Tellier viel höhere Arbeitsdrücke in seinen Maschinen in Kauf nehmen. Diese höheren Drücke bereiteten ihm durch Undichtigkeiten und Kältemittelverluste erhebliche Schwierigkeiten, die er nie ganz zu überwinden vermochte. Seine Konstruktionen wiesen erhebliche Mängel auf und konnten sich auf die Dauer nicht durchsetzen.

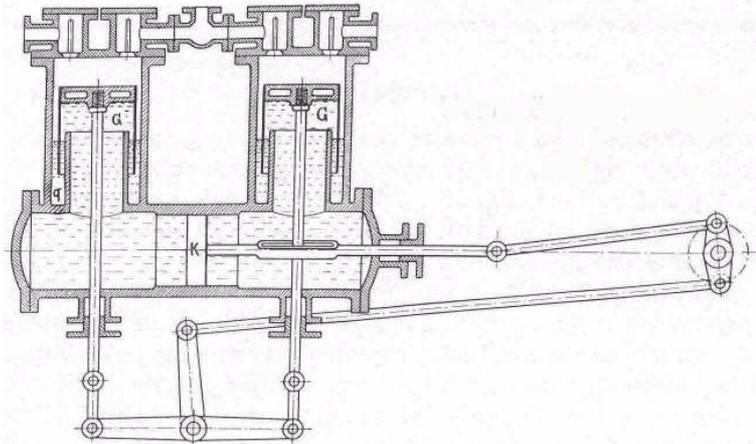
Im Jahre 1859 meldete F. Carré sein grundlegendes Patent für die Ammoniak- Absorptionsmaschine an. Er beschreibt darin sowohl periodisch wirkende Maschinen für kleine Leistungen als auch ununterbrochen wirkende Maschinen bis zu den größten Leistungen; sie wurden zum Vorbild für alle späteren Bauarten. Die Carré'schen Absorptionsmaschinen waren die ersten, die industrielle Bedeutung erlangten.

Die erste industriell verwertbare Kaltluftmaschine schuf A. C. Kirk im Jahre 1862; er verbesserte sie anschließend stufenweise. - Eine weitere Vervollkommnung erfuhr die Kaltluftmaschine durch die Bemühungen von F. Windhausen, der 1869 mit seinen ersten Konstruktionen herauskam und damit gute Erfolge erzielte.

## Bau des ersten Kältemittelverdichters von Linde.

Als C. Linde<sup>2)</sup> 1868 seine Professur am Polytechnikum in München erhielt, wurden die Aussichten der Kaldampfmaschinen weniger günstig beurteilt, weil sie konstruktiv mangelhaft waren und die verwendeten Kältemittel Gefahren bargen, die man nur ungern in Kauf nahm. Er beschäftigte sich eingehend mit der Theorie der Kältemaschinen und erkannte dabei den besonderen Vorteil der Kaldampfmaschine für die Erzeugung der „künstlichen Kälte“. Er schrieb 1871 die viel beachtete Abhandlung „Verbesserte Eis- und Kühlmaschine“. 1873 trug er seine Gedanken auf dem internationalen Brauerkongress in Wien vor und der Brauereibesitzer Sedlmayer aus München erklärte sich bereit, die Entwicklungskosten einer derartigen Kältemaschine zu übernehmen und die Versuche in der Spaten-Brauerei durchzuführen.

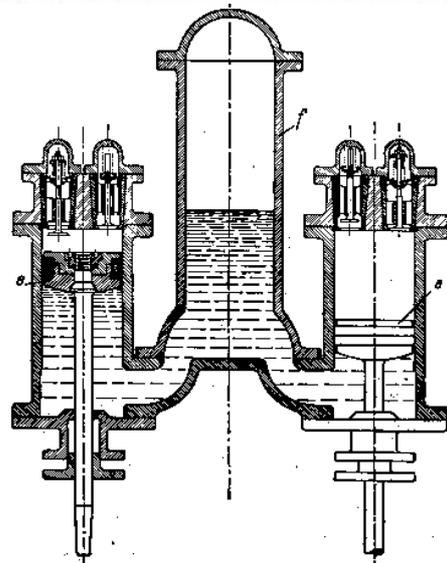
1875 wurde der erste Verdichter für diese Maschine von der Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg AG, nach den Vorgaben von Linde, gebaut. Dieser Verdichter hatte, um Undichtigkeiten sicher zu vermeiden, Quecksilber als Sperrflüssigkeit zur Abdichtung der Kolben und Glycerin zur Schmierung und Abdichtung gegenüber der Atmosphäre. Als Kältemittel wurde Methyläther gewählt. – Linde schreibt dazu<sup>2)</sup>: *Diese Bauart konnte für die Erfordernisse der Praxis nicht als geeignete Lösung gelten. So erschien mir der Bau einer zweiten Maschine dringend wünschenswert.*



### 1. Verdichter von Linde mit Methyläther als Kältemittel und Quecksilber zur Abdichtung der Kolben<sup>2)</sup>

Dienel<sup>6)</sup> schreibt dazu: *Das System war so sensibel, dass der Betrieb einem gewöhnlichen Maschinisten nicht anvertraut werden durfte. Der große apparative Aufwand machte die Maschine trotzdem nicht gasdicht. Der austretende Methyläther verursachte Explosionen im Maschinenraum; nach der schweren Verletzung eines Arbeiters und der ablehnenden Haltung des Maschinenmeisters der Brauerei, musste sich Gabriel Sedlmayr im Frühjahr 1874 sogar zur Einstellung der Versuche entschließen.* - Damit wären auch die Bemühungen Lindes zur Verbreitung der Kaldampfmaschine vermutlich gescheitert.

Erst durch den Rat von Kraus, Anteile von Patentrechten des 1873 angemeldeten Patent auf eine verbesserte Kälteerzeugungsmaschine an ein Konsortium (Kraus, Sedlmayer und von Buz) zu verkaufen, erhielt Linde ausreichende Geldmittel für weitere Entwicklungen. Dies führte dann zu der verbesserten 2. Ausführung mit Glycerin als Sperrflüssigkeit

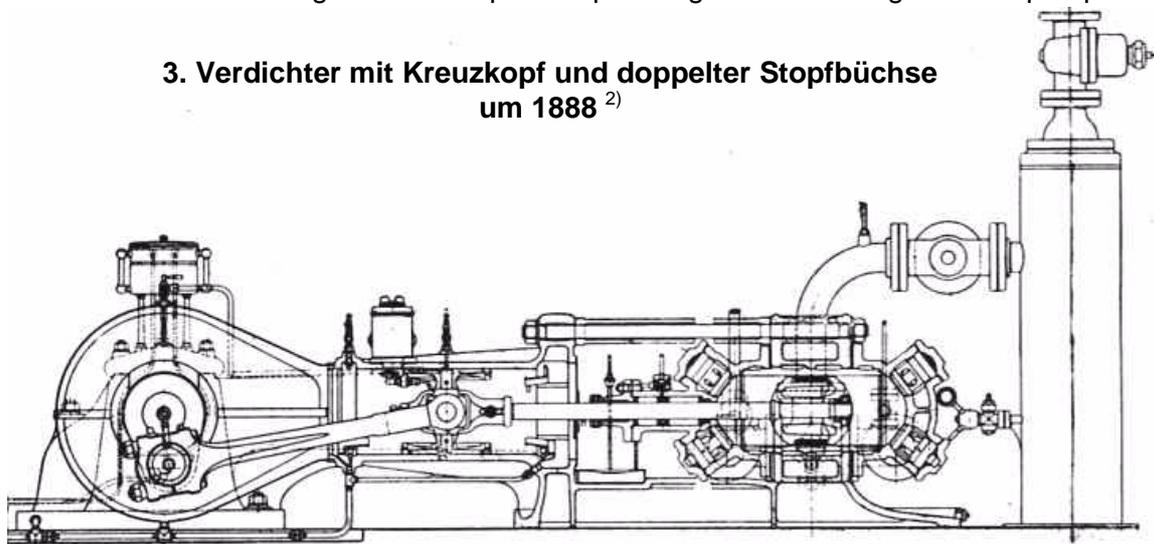


### 2. Verdichter mit NH<sub>3</sub> als Kältemittel, Ledermanschetten und Glykol zur Abdichtung und

und einem Ausgleichsdom. Als Kältemittel wurde jetzt  $\text{NH}_3$  gewählt - Diese Ausführung erfüllte alle Erwartungen. 1877 erfolgte die erste Lieferung einer 2. Ausführung nach Triest in die Dreherische Brauerei, die dort zur vollsten Zufriedenheit bis 1909 in Betrieb war. Heute befindet sich diese Maschine im Technischen Museum in Wien als Erstling der Lindeschen Kältemaschine.

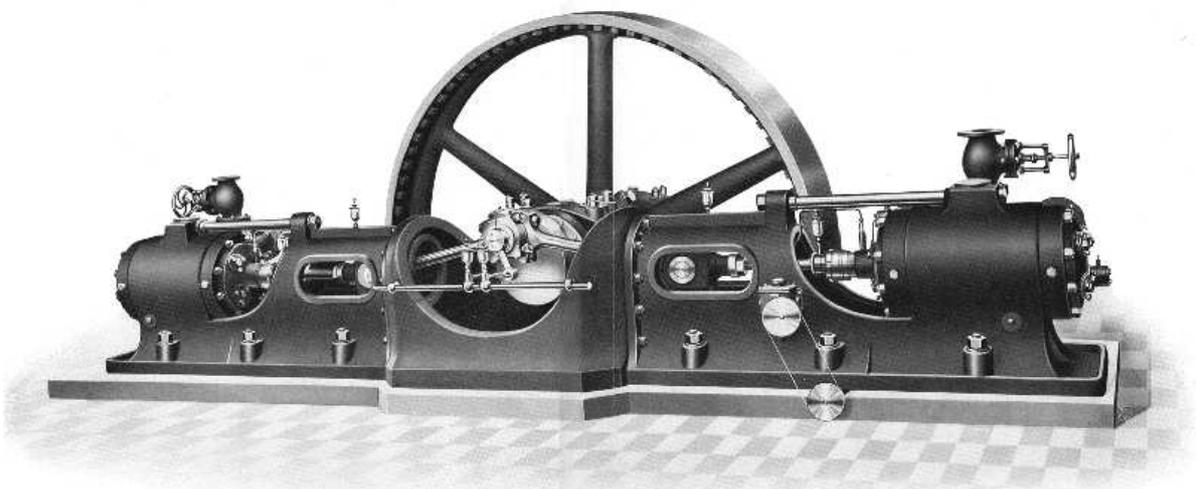
Danach erfolgte der Bau der 3. Ausführung als liegender doppelwirkenden Wechselstromverdichter mit Kolbenringen und Stopfbuchspackung in Anlehnung an Gaspumpen. Als

### 3. Verdichter mit Kreuzkopf und doppelter Stopfbüchse um 1888 <sup>2)</sup>



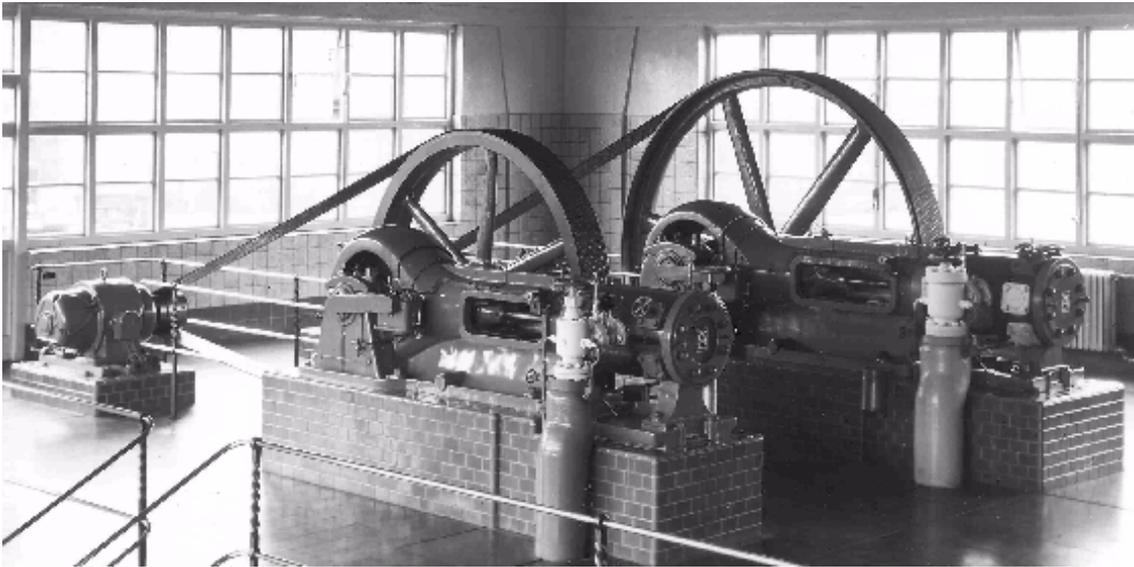
Kältemittel wurde wiederum das jetzt schon bewährte  $\text{NH}_3$  eingesetzt. Die Abdichtung der Kolbenstange erfolgte durch eine zweigeteilte Stopfbüchse, die im Mittelteil unter Saugdruck stand. Die Schmierung von Lagern, Kreuzkopf und Stopfbüchse wurde durch Tropfschmierung mit Laterne sichergestellt. Die Kältemitteleinspritzung erfolgte mittels Drosselventil nach der Druckgastemperatur. Diese sollte nach Anweisung Lindes nicht höher als handwarm sein, um Schmierstoffzersetzungen zu vermeiden – später erkannte er, dass eine höhere Verdichtungsendtemperatur (ca.  $100\text{ }^\circ\text{C}$ ) die Effektivität des Prozesses steigerte.

Mit dieser Ausführung gelang Linde der Durchbruch und damit begann der Siegeszug der Kaldampfmaschine. Zur industriellen Verwertung wurde 1879 die „Gesellschaft für Linde's Eismaschinen“ in Wiesbaden als Aktiengesellschaft gegründet, womit der Aufstieg der Fa. Linde begann. - Die liegend-doppelwirkende Ausführung des Verdichters dominierte den Markt im Bereich der Industriekühlung über Jahrzehnte.



**Ammoniakverdichter, gekoppelt mit Dampfmaschine von Witt um 1900 <sup>4)</sup>**

Diese Ausführungen mit gekoppelter Dampfmaschine wurden damals favorisiert, weil es noch keine entsprechend leistungsfähige Stromversorgung gab. Häufig wurde dazu noch ein Stromgenerator zur Lichtstrom-Versorgung des Unternehmens mit angetrieben.



Anlage der Bergedorfer Eisenwerke aus den 20er Jahren <sup>4)</sup>

Lange Zeit dominierte bei Industrieverdichtern die liegende Bauart mit Kreuzkopf, Kolbenstange und Stopfbüchse. Dann baute man aus Platzgründen vertikale Verdichter, die jedoch immer noch mit Kreuzkopf, Kolbenstange und Stopfbüchse ausgerüstet waren und entsprechender Wartung bedurften.

| Type     | Drehzahl<br>U/min | Leistung<br>kcal/h | Leistungsbedarf<br>kW | Arbeitstemperatur<br>°C | Abmessungen in mm |      |      |
|----------|-------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------|------|------|
|          |                   |                    |                       |                         | A                 | B    |      |
| KNZ 1118 | einstufig         | 520                | 400 000               | 100                     | -10 / + 25        | 2400 | 2250 |
| KNZ 1120 | einstufig         | 450                | 800 000               | 200                     | -10 / + 25        | 2600 | 2675 |
| KNZ 1125 | einstufig         | 370                | 1 400 000             | 360                     | -10 / + 25        | 3150 | 3000 |
| KNZ 1216 | zweistufig        | 520                | 150 000               | 72                      | -30 / + 30        | 2400 | 2250 |
| KNZ 1220 | zweistufig        | 450                | 290 000               | 135                     | -30 / + 30        | 2600 | 2675 |
| KNZ 1225 | zweistufig        | 370                | 530 000               | 248                     | -30 / + 30        | 3150 | 3000 |

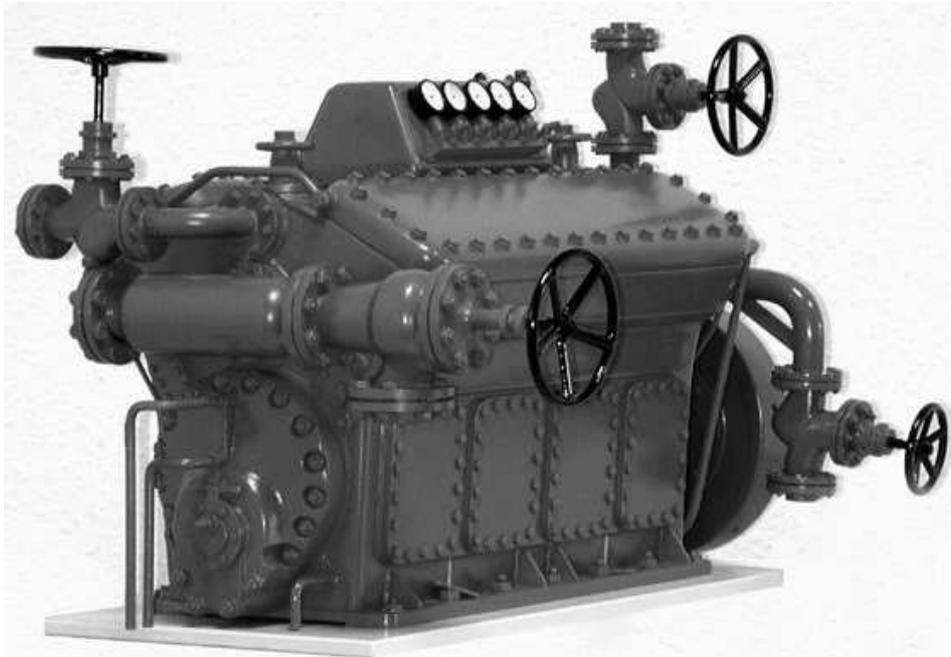
**Stehende Wechselstrom-Kältekompressoren mit stufenloser Leistungsregelung und automatisch entlastetem Anlauf**

545 40 N

Borsig- Industrieverdichter 1955 – Firmenanzeige <sup>4)</sup>

### **Kolbenverdichter mit geschlossenem Kurbelgehäuse und Drehkolbenverdichter**

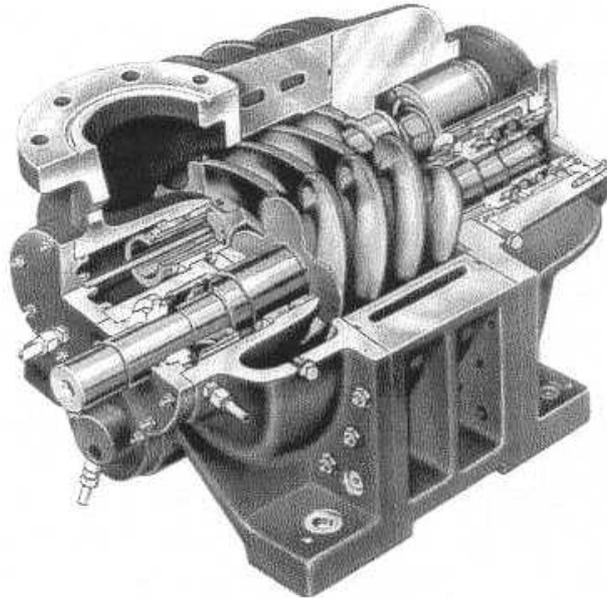
Erst viel später kam es bei den Industrieverdichtern, wie im Fahrzeugmotorenbau und bei Kleinverdichtern seit langem üblich, zu Konstruktionen mit geschlossenem Kurbelgehäuse und direkter Pleuelverbindung zum Kolben.



**Ammoniak-Wechselstromverdichter der MAFA Halle aus den 50er Jahren <sup>4)</sup>**



**halbhermetischer Schraubenverdichter von Bitzer <sup>4)</sup>**

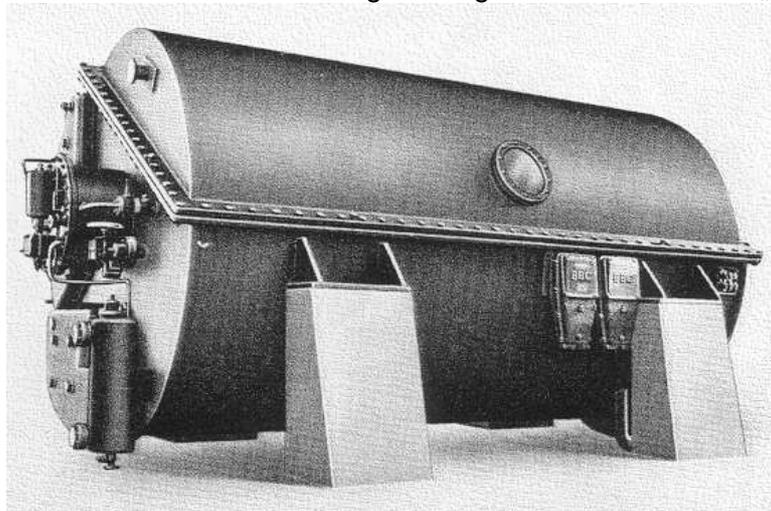


### **offener Schraubenverdichter der GEA, Refrigeration Division Grasso <sup>4)</sup>**

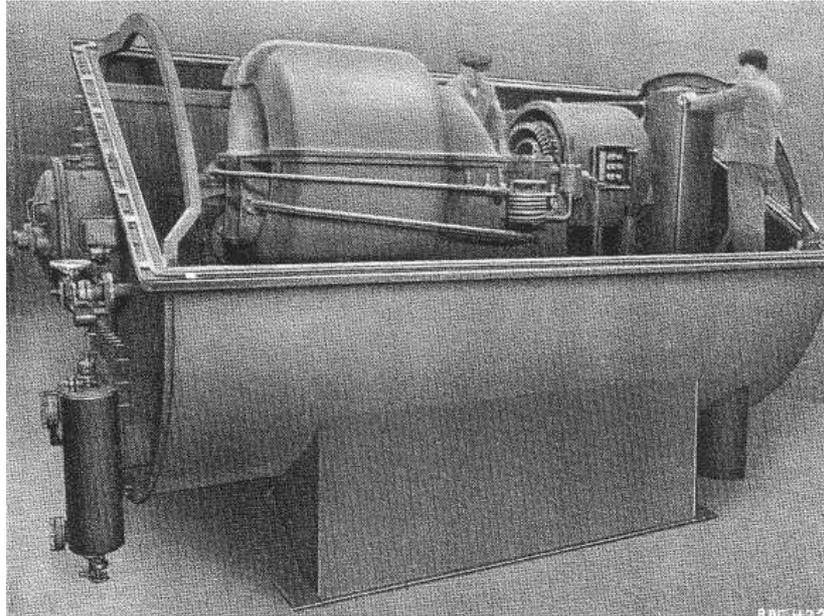
1964 kamen die ersten Schraubenverdichter für Kälteanlagen auf den Markt. Bei diesen entfällt die für Kolbenverdichter notwendige Umwandlung der drehenden in eine hin- und hergehende Bewegung. Der Antrieb erfolgt zumeist durch zweipolige Asynchronmotoren, die Verdichtung drehend, wodurch sich baulicher Aufwand und Platzbedarf ganz wesentlich reduzieren. - Heute spielen Kolbenverdichter im Industriekältebereich praktisch keine Rolle mehr. Bis zu Antriebsleistungen von ca. 250 KW stehen jetzt für die chlorfreien zeotropen und azeotropen Kältemittelgemische halbhermetische Verdichter zur Verfügung und offene Verdichter für größere Leistungen mit dem Kältemittel NH<sub>3</sub>.

### **Turboverdichter zur Prozesskühlung und Klimatisierung**

Schon in den 20er Jahren versuchte man, offene Turboverdichter für große Leistungen einzusetzen, scheiterte aber anfänglich daran, dass hochmolekulare Kältemittel eingesetzt werden mussten, die auf der Saugseite im Unterdruckbereich betrieben werden mussten. Ein Kuriosum, um ausreichende Dichtheit zu erreichen – in dem Fall die Vakuumdichtheit gegen eindringende Luft - stellt der von BBC Anfang der 30er Jahre entwickelte „Frigoblock“ dar.

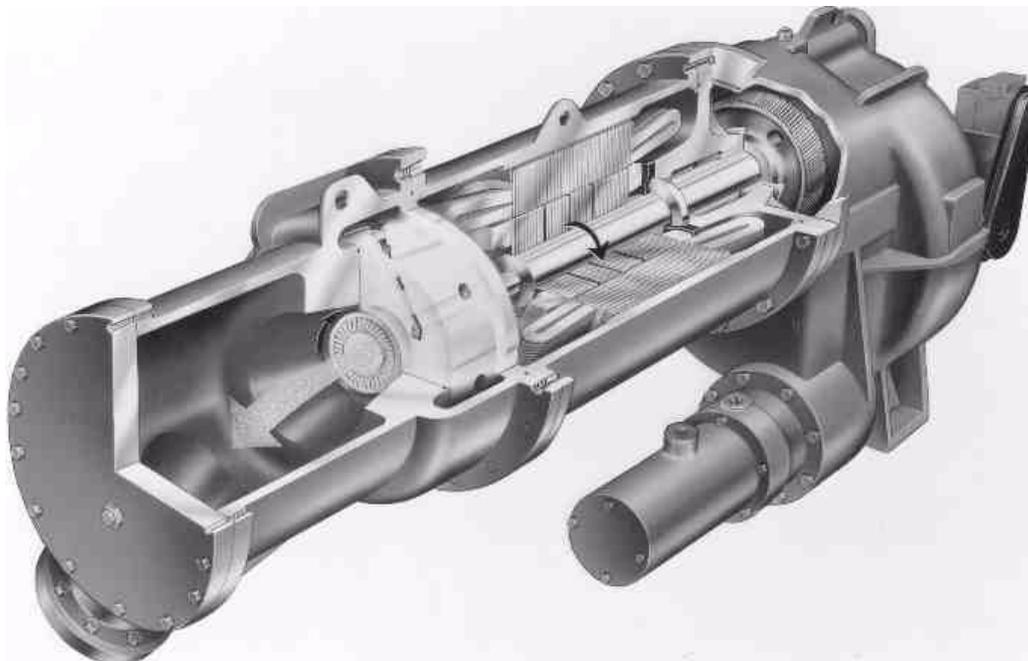


**Turboverdichter-Kaltwassersatz BBC Frigoblock <sup>4)</sup>**



Der Frigoblock war ein in einem zylindrischen Gehäuse gekapselter kompletter Turbo-Kaltwassersatz für Klima- und Verfahrenstechnische-Anlagen mit R11, mit Leistungen von 80.000 bis 2.000.000 kcal/h

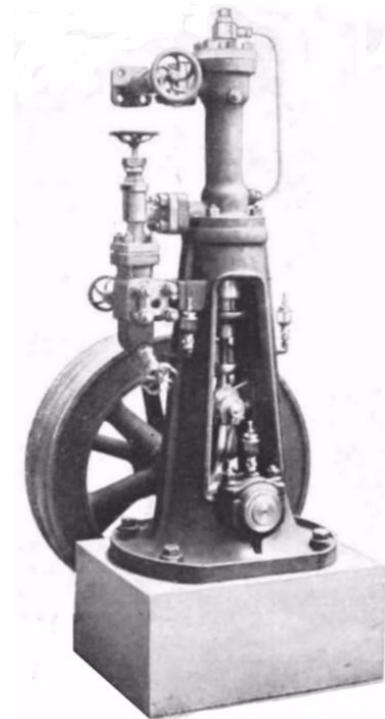
Heute stehen auch für Großklimaanlagen halbhermetische Turboverdichter mit dem Kältemittel R134a für Kälteleistungsbereiche bis zu 4,5 MW zur Verfügung. Die Frage der Dichtheit ist bei allen Kälte- und Klimaanlagen heute von entscheidender Bedeutung.



**Carrier Turboverdichter mit Entspannungsturbine für 2 – 4 MW, mit R134a <sup>4)</sup>**

## Entwicklung der Kleinkälte- und gewerblichen Verdichter

Wesentlich dynamischer verlief die Entwicklung der Kleinkälteverdichter für den gewerblichen Bereich. Anfänglich wurde die liegende Ausführung der Industrieverdichter mit Kreuzkopf einfach kopiert, die Verdichter aus Platzmangel jedoch senkrecht gestellt. Diese Ausführung war jedoch, wie die Industrieverdichter, sehr wartungsbedürftig, bedingt durch Stopfbüchse und Kreuzkopfschmierung. Jeder Metzger musste für seine Kältemaschine extra einen Kältemeister beschäftigen.



Linde, gewerblicher Verdichter um 1895 <sup>2)</sup>

Um all diese Probleme zu vermeiden, verfolgte der französische Zisterziensermönch und Professor für Physik Marcel Audiffren einen völlig neuen Ansatz, er meldete 1894 eine „Verdichter-Kältemaschine mit Pumpe in einem gasdichten Gehäuse“ - eine hermetische Kältemaschine die völlig wartungsfrei und dicht war, zum Patent an. Diese wurde dann ab 1905 in der Maschinenfabrik Singrün in Epinal serienmäßig hergestellt. Sie bestand aus 2 miteinander verbundenen Kugeln, wobei sich in der einen der Verdichter und der Verflüssiger, in der anderen der Verdampfer befanden. Als Kältemittel wurde SO<sub>2</sub> verwendet.

- Sie wurde **AS-Rotor** oder nach der Farbe der Kugeln, **Rot-Silber-Automat** genannt und hat, in Lizenz von BBC gefertigt, über viele Jahre den Bedarf für Gewerbekühlanlagen in ganz Europa weitgehend abgedeckt. Für den nordamerikanischen Markt hat General Motors 1912 eine Lizenz erworben und bediente mit Erfolg diesen Markt. – Abb. M. Hirsch<sup>3)</sup>

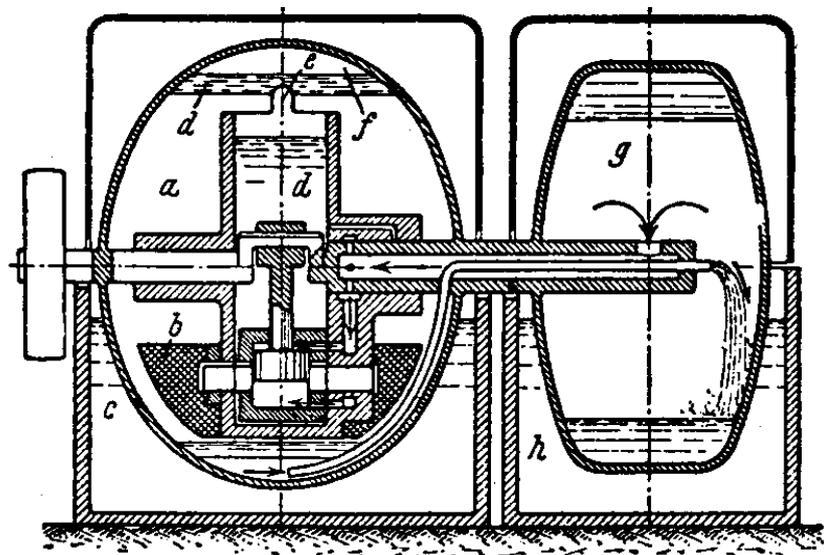


Abb: Erste vollkommen gekapselte Kältemaschine nach AUDIFFREN-SINGRÜN (Brown, Boveri).

**a** Verflüssiger, **b** Gegengewicht, **c** Kühlwasser, **d** Öl, **e** Ölabbreiter, **f** verflüssigtes SO<sub>2</sub>, **g** Verdampfer, **h** Sole.

Der Vorteil dieser Maschine war, dass sie völlig dicht war und wartungsfrei arbeitete – die Antriebsquelle konnte frei gewählt werden. Nachteil dieser Konstruktion war allerdings, dass sie nur mit

geringer Drehzahl betrieben werden konnte, da sonst die für die Verdichterfunktion nötige Schwerkraft durch die Fliehkraft aufgehoben wurde. Außerdem standen für die Wärmeübertragung nur die Außenflächen der beiden Gehäusekugeln zur Verfügung, was alles in allem die Leistung begrenzte bzw. große Bauvolumen erforderte. Die Suche nach einer dichten, effektiven und preisgünstiger zu bauenden Maschine ging also weiter.

A. Freundlich – später Rheinkälte - entwickelt 1915 die „Autofrost-Maschine“, einen stopfbuchslosen Hubkolbenverdichter mit integriertem Motor, Kältemittel  $\text{NH}_3$  – Abbildung Hirschmann<sup>3)</sup>. - Damit es nicht zu Kurzschlüssen an der Motorwicklung kommen sollte, wurde die Spannung durch einen aufgesetzten Transformator auf 10 Volt reduziert. – Diese Maschine war vermutlich der erste halbhermetische Verdichter überhaupt; bedingt durch das gewählte Kältemittel aber offensichtlich kein großer Erfolg. - Abb. M. Hirsch<sup>3)</sup>

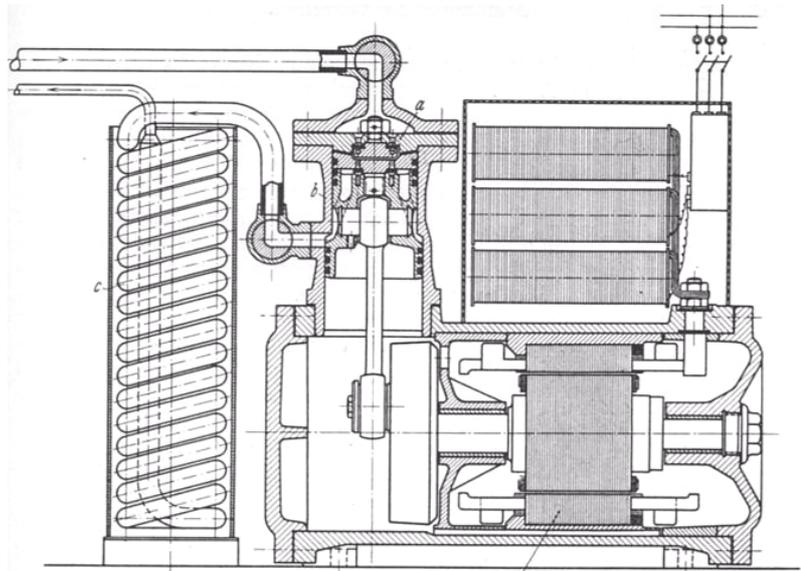
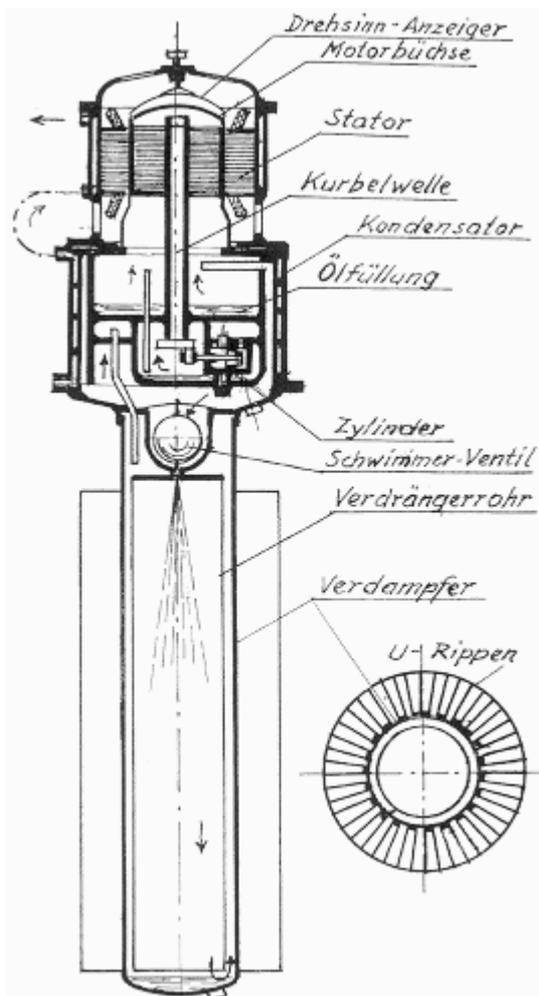


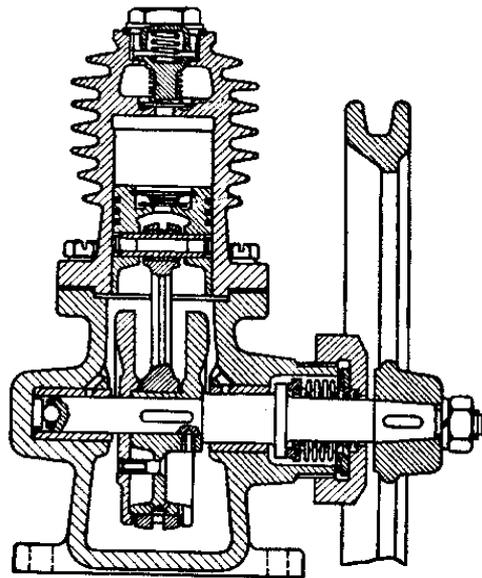
Abb. 49. Stopfbuchsloser Ammoniakverdichter (Freundlich). a Saugventil, b Druckventil, c Verflüssiger, d Motor, e Schwimmerventil.

### Autofrost-Maschine für $\text{NH}_3$ von A. Freundlich 1915



Escher Wyss Zürich entwickelt 1921 den „Autofrigor“ einen Kühlautomat, in dem Verdichter und Rotor des elektrischen Antriebsmotors (Spaltrohrmotor), als auch Kondensator und Verdampfer in einem hermetischen geschlossenen Kreislauf einbezogen waren – Kältemittel  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$  und später auch R12. Die Escher Wyss Zürich gründet in Lindau-Reutin das Zweigwerk EWL für die serienmäßige Fertigung. Das Gerät wurde über 20 Jahre produziert und vornehmlich in gewerblichen Anlagen eingesetzt.<sup>4)</sup>

In den frühen 20er Jahren begann in den USA die Nachfrage nach Kälteanlagen mit mechanischer Verdichtung für Krankenhäuser, Theater, öffentliche Gebäude und Eisenbahnwagen immer größer zu werden. Die Verdichter dafür hatten schon ein geschlossenes Kurbelgehäuse, die Abdichtung zur Atmosphäre erfolgte an der Antriebswelle über eine Gleitringabdichtung. Ein führender Hersteller dieser Verdichter war Frigidaire, eine Tochtergesellschaft von General Motors. Auch die ersten Haushaltskühlschränke wurden angeboten; der 1926 erschienene M-9 von Frigidaire war seinerzeit der modernste Kühlschrank - 1929 hatte das Unternehmen bereits 1 Million Kühlschränke verkauft. Der Bedarf an Neugeräten auf dem US-Markt lag mittlerweile bei 200.000 Geräten im Jahr.



**offener Verdichter mit geschlossenem Kurbelgehäuse aus den 20er Jahren <sup>4)</sup>**

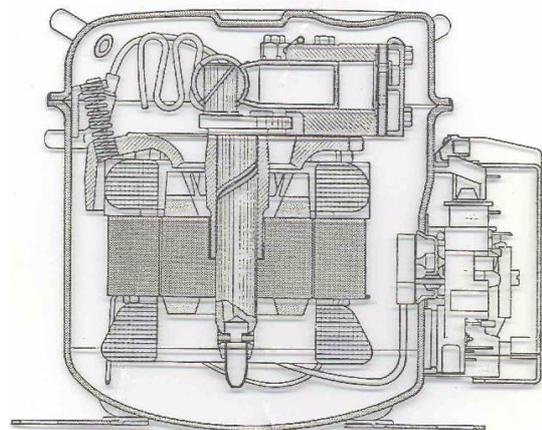
### Kältemittel und Dichtheit als Schlüsselfragen

Zu dieser Zeit waren eine Vielzahl verschiedener Kältemittel in Gebrauch, darunter Ammoniak, Schwefeldioxid, Methylchlorid, Äthylchlorid, Isobutan, Äthylen, Methylenechlorid und Kohlendioxid. Die wahren Herausforderungen beim Auf- und Ausbau der Kältetechnik hing mit dem Kältemittel und besonders mit der Dichtheit des offenen Verdichters und damit der Anlagen zusammen.

In der Kältemittelgeschichte von DuPont<sup>5)</sup> heißt es dazu: *Je mehr sich die mechanische Kälteerzeugung allgemein verbreitete, desto mehr wurden das Entweichen von Kältemittel und die damit verbundenen Risiken zum Problem. Besonders akut war dieses Thema bei Haushaltskühlschränken. Neben einer zunehmenden Zahl von Beschwerden von Verbraucherseite, kam es in Krankenhäusern und Theatern zu einer Reihe tödlicher Unfälle, die alle mit austretendem Kältemittel zusammenhingen. Die Dämpfe waren giftig und führten bei einigen Menschen, die sie eingeatmet hatten, tatsächlich zum Tod. Wegen dieser Gefährdung wurden die ersten Kühlschränke manchmal hinter dem Haus aufgestellt statt in der Küche; in Krankenhäusern konnten sie überhaupt nicht eingesetzt werden.*

Es wurden erste Versuche unternommen, Verdichter und Motor in einem Gehäuse unterzubringen. So entwickelte 1926 General Electric, in Anlehnung an den AS Rotor, einen gekapselter Tauchkolbenverdichter mit eingebautem Motor und Kältemittel SO<sub>2</sub>. Die Ergebnisse waren aber nicht befriedigend und es begann die Suche nach einem neuen, ungiftigen und unbrennbaren Kältemittel, mit geeignetem Siedepunkt und neutral zu allen Verdichterwerk- und Isolierstoffen.

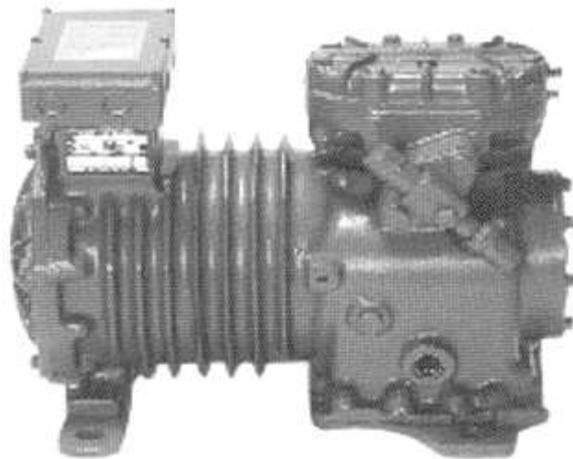
Am Ende des Jahres 1928 hatte Tom Midgely herausgefunden, dass Dichlorfluormethan, kurz „Freon“ 12, alle genannten Voraussetzungen



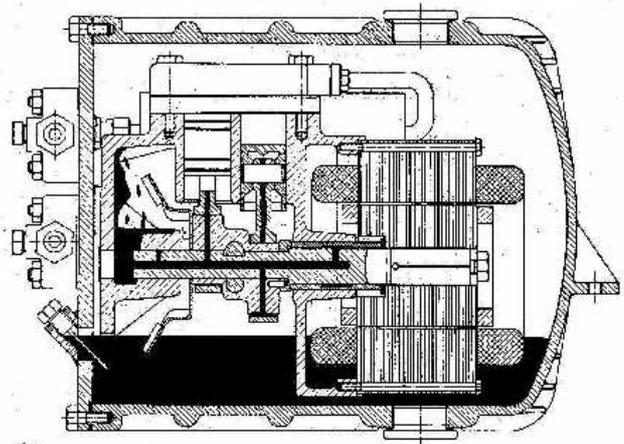
**hermetischer Tauchkolbenverdichter von Danfoss <sup>4)</sup>**

erfüllte. DuPont entwickelt 1929 eine Pilotanlage zur kommerziellen Herstellung von R11 und R12 - damit begann in den USA eine stürmische Entwicklung von hermetischen Tauch- und Rollkolbenverdichtern für Kühlschränke, die sich danach auch in Europa fortsetzte.

Parallel dazu wurden für gewerbliche Anlagen Halbhermetikverdichter in den verschiedensten Ausführungen entwickelt, so von Copeland in den USA, später auch bei uns von Göldner und Bitzer.

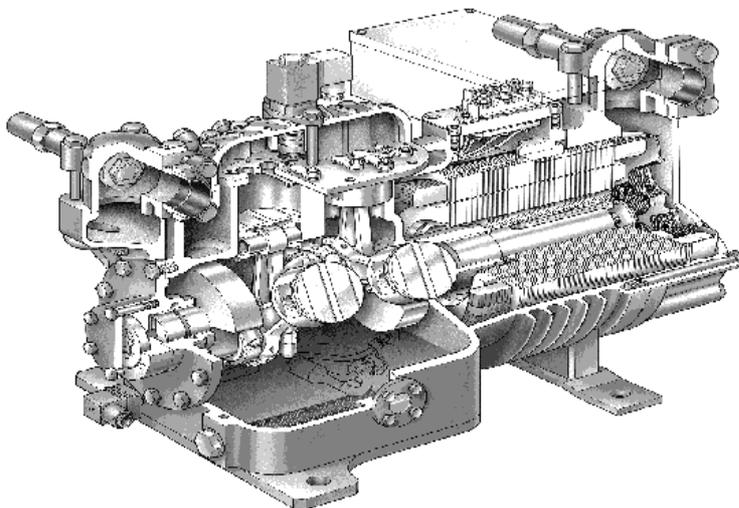


**Copeland 2 HP <sup>4)</sup>**

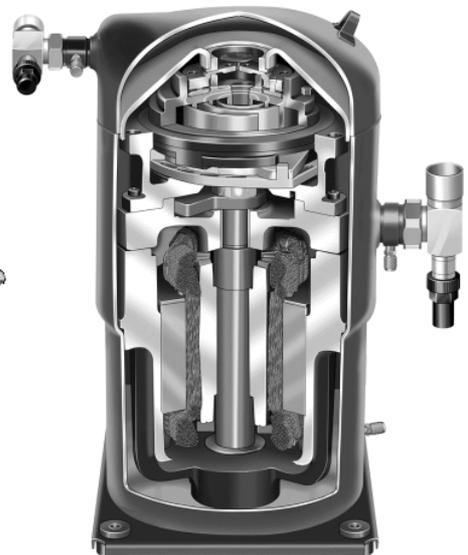


**Bitzer Hermeta <sup>4)</sup>**

Heute werden nicht nur Kühlschränke und Kleinklimaanlagen mit hermetischen Verdichtern ausgerüstet – neben Tauchkolben und Rollkolbenverdichtern stehen halbhermetische Kolbenverdichter und hermetische Scrollverdichter für alle Bereiche der gewerblichen Kühlung und Klimatisierung mit umweltfreundlichen und ungiftigen Kältemitteln zur Verfügung, die den Bau von weitgehend dichten Anlagen ermöglichen.



**6-Zylinder Kolbenverdichter von Bitzer <sup>4)</sup>**



**Scrollverdichter von Copeland <sup>4)</sup>**

### Zusammenfassung

Es ist interessant, dass die Fragen des Kältemittels und der Dichtheit von Anfang an bis heute die Entwicklung und Anwendung der Kaltdampfmaschine und damit auch die Konstruktion des Verdichters bestimmten. Anfänglich suchte man nur nach einem

ungefährlichen Kältemittel mit beherrschbaren Drucklagen, um bei Undichtigkeiten den Schaden in Grenzen zu halten. - Dann forschte man, mit zunehmender Anwendung im häuslichen Umfeld, nach einem für Menschen und Material neutralen Kältemittel, um durch Integration des Antriebsmotors in den Kreislauf, die Dichtheit der Anlagen zu verbessern und damit den ungefährdeten Betrieb im Wohnbereich zu ermöglichen. - Heute ist die Forderung nach Umweltverträglichkeit hinzugekommen. Im Hinblick auf den Treibhauseffekt ist diese aber noch nicht erfüllt, wenn man der Nichtbrennbarkeit weiterhin Priorität einräumt. Damit ergeben sich erhöhte Anforderungen an die Dichtheit der Anlagen – eine Forderung, die dank integriertem Antrieb, hochentwickelter Lecksuchtechnologie und ausgefeilter Qualitätskontrolle, jetzt auch weitgehend zu lösen ist.

## Literaturquellen

- 1) Rudolf Plank, „Die schöpferische Leistung von Carl von Linde im Spiegel der Entwicklung der Kältetechnik“
- 2) Carl Linde; „Aus meinem Leben und von meiner Arbeit“
- 3) M. Hirsch, „Die Kältemaschine“ 1. und 2. Auflage
- 4) Bilder aus der Sammlung der DKV Senioren, „Unternehmensgeschichten“
- 5) DuPont, „Kältemittelgeschichte“
- 6) Dienel, „Geschichte der Linde AG“