

Verdichterentwicklung in Westdeutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans Rudolf Engelhorn

Vortrag gehalten auf der gemeinsamen Veranstaltung der Senioren des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins e.V., der Landesinnung Kältetechnik Hessen (LIH), dem Bezirksvereins Rhein-Main im DKV und dem Historische Kälte- und Klimatechnik e.V. (HKK) am 10.06.2005 in Wiesbaden.

Verehrte Anwesende,

ich begrüße Sie sehr herzlich zu meinem Vortrag über die Verdichterentwicklung in Westdeutschland. Folgenden Inhalt werde ich Ihnen bieten:

Zunächst einen Rückblick in die Historie. Da wir uns dieser verschrieben haben, wissen wir, dass man die Gegenwart und auch die Zukunft nur beurteilen kann, wenn man sich mit der Vergangenheit auseinandergesetzt hat. Bei diesem Rückblick kann ich mich allerdings nicht strikt an die Vorgabe der Einhaltung westdeutscher Grenzen halten.

Danach folgt ein Überblick über den Stand der 50-er/60-er Jahre. Ich entnahm ihn im wesentlichen Band 5 der bekannten Handbücher der Kältetechnik von Rudolf Plank.

Den heutigen Stand entnahm ich Firmenunterlagen, vor allem der Firmen Bitzer und Bock, aufgrund zur Verfügung gestellter Unterlagen, dem Internet und einem Kurzbesuch bei der Fa. Bitzer, wobei ich einige Lichtbilder schoss.

Anschließend folgt ein Vergleich, der den Vortragsinhalt mit einbeziehen.

Gliederung:

Zur Historie.....	1
Heutiger Stand	4
Zu den Hubkolbenverdichtern	4
Zu den Schraubenverdichtern.....	5
Zu den Scroll-Verdichtern	5
Vergleich	6
Erkenntnisse:	6
Bilder zu dem Vortrag.....	7

Zur Historie

Die Zeit der ersten Kältemaschinen reicht bis in die erste Hälfte des 19. Jahrhunderts zurück. Vorwiegend handelte es sich um Kaltgasmaschinen. Zwar hatte man den Vorteil der Kaltdampfmaschinen bereits erkannt, doch waren die Probleme mit den hierfür nötigen Arbeitsstoffen größer als bei Verwendung von Gasen.

Auf dem [1. Bild](#) ist eine Maschine von Lighfoot zu sehen mit Luft als Kältemittel. Sie stellt eine Verbindung von Dampfmaschine und Kältemaschine dar. Die Antriebsweise war bedingt dadurch, dass der Elektromotor noch nicht erfunden war. Die Gesamtlänge der Maschine dürfte etwa 4,5 m betragen haben und war somit von beträchtlichem Ausmaß.

Der eigentliche Kälteteil ist in dem Bild unten als Detail herausgezogen und weist einen beidseitig wirkenden Kompressionszylinder und einen einseitig wirkenden Expansionszylinder auf. Die verdichtete Luft gelangte nach Abkühlung in den Expansionszylinder, wo sie sich unter Arbeitsabgabe bis auf -70°C abkühlte. Aus dem mit max. $1700\text{ m}^3/\text{h}$ angegebenen Luftdurchsatz erhält man überschlägig eine maximale Kälteleistung von 50 kW.

Weiterhin findet man aus der Angabe, dass man etwa 500 kcal Kälte je kg Kohle gewann, eine Leistungszahl von max. 0,1. Betrag somit die Kälteleistung 50 kW, so musste die Dampfmaschine eine Leistung von etwa 500 kW abgeben.

Das [2. Bild](#) zeigt die von Perkins erfundene Kaldampfmaschine gemäß der Patentschrift. Kältemittel war Ethyläther. Wir sehen den handbetriebenen Kolben. Alle übrigen Teile, die für uns heute selbstverständlich sind, wie Verflüssiger, Drosselorgan und Verdampfer, sind bereits vorhanden.

Das [3. Bild](#) zeigt erste Entwicklungen von Kolbenverdichtern von Linde, gebaut von der MAN. Der obere Kompressor dient zur Verdichtung von Methyläther. Zur Abdichtung des Arbeitsmediums diente eine komplizierte Kombination an Sperrflüssigkeiten, die mittels des mittleren Kolbens hin- und hergeschoben wurde. Die zwangsläufige Trägheit und Komplexität des Systems erlaubte nur eine geringe Betriebsfrequenz und führte zu nicht lösbaren Problemen.

Bei dem mittleren Kompressor zur Verdichtung von Ammoniak entfiel der mittlere Kolben und die Abdichtung wurde vereinfacht. Für den Druckausgleich der Sperrflüssigkeit sorgte ein Windkessel.

Bei dem untenstehenden liegenden Kompressor trat an die Stelle der Sperrflüssigkeit eine Stopfbüchse, was eine Steigerung der Betriebsfrequenz und damit der Leistung ergab, gleichzeitig aber die Quelle späterer Leckagen gewesen sein dürfte.

Wie wir sehen, spielte bereits damals die Abdichtung eine große Rolle.

Hierzu im [4. Bild](#) zwei weitere Beispiele: Links ein Membranverdichter, dessen Fördervolumen jedoch wegen des geringen Hubes nur gering war, rechts ein Schlauchverdichter, bei dem eine umlaufende Rolle für die Verdichtung des Kältemittels sorgte. Die Standfähigkeit dürfte wohl gering gewesen sein, die Idee jedoch ist bemerkenswert.

Im [5. Bild](#) ein letztes Beispiel: Die von dem französischen Pater Audiferen erfundene und von BBC in Mannheim gebaute Maschine ist wiederum völlig dicht, die Gehäuse sind nach außen hin geschlossen und miteinander verbunden, der Antrieb erfolgt über eine Riemenscheibe. Kältemittel ist SO_2 .

Damit der Kolben seine bestimmungsgemäße Arbeit verrichten kann, ist ein Gegengewicht angebracht, das den Zylinder in senkrechter Lage hält. Das verflüssigte Kältemittel gelangt in den rechten Gehäuseteil, der den Verdampfer darstellt, wo es gedrosselt und als Gas anschließend vom Verdichter angesaugt wird.

Das [6. Bild](#) zeigt, wie man sich in primitiven Gegenden helfen musste. Geht man davon aus, dass ein Mensch auf Dauer eine Leistung von etwa 100 W abgeben kann, legt man zudem eine Kälteleistungszahl von etwa 2 zugrunde, so betrug die Kälteleistung etwa 400 W. Wollte man das Leistungsgewicht der Maschine ermitteln, müsste man das Gewicht der beiden Menschen mit einbeziehen!

Aus dem [7. Bild](#) sind in der oberen Tabelle Werte zur Entwicklung von Kältemaschinen in der Zeit zwischen 1895 und 1950 zu entnehmen. Demgemäß erhöhten sich die Drehzahlen von 80 auf 1450 U/min, die Kolbengeschwindigkeiten von etwa 1,6 m/s auf 4 m/s. Mit der Drehzahl von 1450 U/min werden auch heute noch die meisten Kältemaschinen betrieben, wie wir im weiteren noch sehen werden. Auch bei den heutigen Maschinen liegen zudem die Kolbengeschwindigkeiten meist unter 5 m/s.

In der unteren Tabelle findet man nähere Angaben zu den Kolbengeschwindigkeiten, aufgegliedert nach Maschinenleistung und Arbeitsmedium. Mit 3,6 m/s stimmt der Maximalwert in etwa mit dem der oberen Tabelle überein.

Kein Rückblick wäre vollständig ohne eine Einbeziehung der Kältemittel. Die bis dahin verwendeten Kältemittel, wie SO_2 , NH_3 , Methylchlorid, Ethyläther u.a., waren in der Handhabung und Verträglichkeit naheliegenderweise nicht unproblematisch.

Dies änderte sich mit dem Aufkommen der Frigene, die als Sicherheitskältemittel galten. Sie wurden als Derivate von Methan und Ethan gewonnen und deckten ein dichtes Feld der kältetechnisch relevanten Temperaturen ab. Man erkennt dies aus dem [8. Bild](#), in dem ihre Dampfdruckkurven eingetragen sind.

Das [9. Bild](#) zeigt die wichtigsten der Stoffe, die heute, nach Inkrafttreten der FCKW-Halon-VerbotsVO, verfügbar sind.

Neben dem bekannten, schon früher verwendeten CO_2 , das heute zur Fahrzeugkühlung auch für einstufige, überkritische Kreisläufe in Erprobung ist, finden wir das wiederentdeckte NH_3 , zudem R 134a als einziges reine organisches Kältemittel und Ersatz für R12, sowie die zeotropen organischen Gemische R 404A und R407C.

Die Umstellung auf die neuen Kältemittel erforderte neue Schmieröle, Esteröle, für die im Kältemaschinenbau neue Dichtmaterialien gefunden werden mussten.

Die Zeit von 1950/1960

Da in diese Zeit der Mauerbau fiel, stellt sie auch die Zeit dar, in der unterschiedliche Verdichterentwicklungen ihren Ausgang nehmen konnten.

Ich werde nur einige typische Beispiele samt wenigen Zahlenwerten erörtern. Auf weitergehende Erläuterungen kann in Anbetracht der Fachkunde der Hörerschaft mit gutem Gewissen verzichtet werden.

Das [10. Bild](#) zeigt gleich ein Prachtexemplar des Kälteverdichterbaus, einen zweistufigen ölfreien Hubkolbenverdichter von Borsig etwa aus dem Jahr 1960, für Leistungen bis 1.160 kW, der vor allem für industrielle Gase entwickelt wurde, vereinzelt auch in der Kältetechnik zum Einsatz kam. Die Kolbenabdichtung erfolgte durch Teflonringe, der Kreuzkopfantrieb gewährleistete, dass keine Querkräfte auf den Kolbenwänden wirkten.

Im [11. Bild](#) ist ein Hubkolbenverdichter der Fa. Rheinkälte abgebildet, der der U-Baureihe entstammt. Sie beinhaltete Verdichter mit 3, 4, 6 und 8 Zylindern. Wir sehen hier die 8-Zylindermaschine. Aus den Zahlenangaben ergeben sich Kälteleistungen von 122 bis 272 kW, Leistungszahlen um 4,5 und Gewichts/Leistungsverhältnisse von 10 bis herab zu 5,2 kg/kW.

Auf letztgenannte Werte werde ich noch öfters zu sprechen kommen und sie im Weiteren als Leistungsgewicht bezeichnen.

Bekanntlich ist die Fa. Rheinkälte heute ebenso nicht mehr Hersteller von Kälteverdichtern wie die vorgenannten Firmen Borsig und Linde. Wir werden leider diese Feststellungen auch im weiteren noch machen.

Das [12. Bild](#) zeigt wiederum einen offenen Hubkolbenverdichter, diesmal von BBC. Die Antriebswelle war als Exzenterwelle ausgeführt, eine damals übliche Ausführung, die heute durch Kurbelwellen abgelöst ist. Die Schmierung erfolgte mittels Schöpfschaufeln, die das Öl

ins Gehäuseinnere warfen. Bei einer auf R 404 A bezogenen Kälteleistung von etwa 7 kW ergibt sich das Leistungsgewicht zu 10 kg/kW.

Im [13. Bild](#) ist ein halbhermetischer Verdichter der Fa. Göldner zu sehen. Zwar existiert diese Firma nicht mehr, doch bestand Anfang 1930 eine Zusammenarbeit mit der Fa. Bock, so dass eine gewisse Tradition bis heute gegeben ist.

Aus dem untenstehenden Anlagenschema erkennt man die Schaltung, wonach das im ND-Zylinder verdichtete Kältemittel vor Eintritt in den Hochdruckzylinder zwischengekühlt wurde und danach in üblicher Weise den Kreislauf durchströmte.

Das [14. Bild](#) zeigt einen halbhermetischen Verdichter von Linde, der bereits deutliche Merkmale heutiger halbhermetischer Verdichter trägt. Zur Anwendung kam bereits die Sauggaskühlung, jedoch dient noch eine Exzenterwelle für den Kolbenantrieb, anstelle heutiger Kurbelwellen. Weiterhin vorhanden ist eine Druckschmierung mittels Ölschleuderrad.

Es ergeben sich recht niedrige Leistungszahlen mit Werten zwischen 1,5 und 2,3. Die Synchrondrehzahlen betragen wiederum 1500 U/min. Als Leistungsgewicht findet man Werte von 36 bis herab zu 11 kg/kW. Die angegebenen Kälteleistungen sind, wie in den meisten hier gezeigten Fällen, bezogen auf t_o/t_c von $-10/+25^\circ\text{C}$.

Das [15. Bild](#) zeigt offene Hubkolbenverdichter der Baureihe V, VI und VII von Escher Wyss. Es waren reine Gleichstromverdichter, d.h., die Saugventile waren im Kolbenboden angeordnet. Man erkennt dies an der Lage der Saugabsperrentile, die sich an der Gehäuseseitenwand befinden. Die Maximaldrehzahl betrug 620 U/min. Die Maschinen wurden bis weit in die 90-Jahre gebaut und fanden Verwendung zur Krankklimatisierung unter den dort herrschenden hohen Verflüssigungstemperaturen.

Aus dem [16. Lichtbild](#) erkennt man einen offenen Boxer-Kompressor von Escher Wyss, für Leistungen von 63.000 bis 138.000 kcal/h, je nach Kältemittel, entsprechenden kW-Werten von 73 bis 160.

Eine neuere Entwicklung von Escher Wyss zeigt das [17. Bild](#), es handelte sich um die 110-er Baureihe mit 4, 6 und 8 Zylindern. Die Leistungen reichten, wiederum baugrößen- und kältemittelabhängig, von 93 bis 318 kW.

Heutiger Stand

Zunächst ergibt sich aus dem [18. Bild](#), dass nur noch die Rede sein wird von Hubkolben- und die Rotationskolbenverdichtern. Strömungsverdichter scheiden für den westdeutschen Bereich aus; sie waren die Domäne von Ausländern wie York, Carrier, Trane, Sulzer u.a. Im Folgenden beschränkt sich die Darstellung auf die rein bildliche ohne Zahlenwerte.

Zu den Hubkolbenverdichtern

Das [19. Bild](#) zeigt den Schnitt durch einen modernen, halbhermetischen Hubkolbenverdichter von Bitzer: 4-Zylinder, gleitgelagert, Ventilplatten mit Ventilen, den Absperrventilen, dem Magnetventil für die Zylinderabschaltung u.a.

Das [20. Bild](#) zeigt einen solchen Verdichter in der Außenansicht; Fabrikat Bock, 6 Zylinder, 1450 U/min, Leistung wiederum auf R 404 A bezogen ca. 70 kW.

Die Maschine ist auch in offener Ausführung erhältlich, wie dies aus dem [21. Bild](#) hervorgeht.

Das [22. Bild](#) zeigt einen offenen Verdichter von Bock für die Transportkühlung. Die Drehzahlen reichen bis ca. 3.500 U/min. Das Gehäuse besteht aus Aluminium.

Eine ähnliche Bauweise bietet auch die Fa. Bitzer an, sie ist im [23. Bild](#) gezeigt. Die maximale Kälteleistung dürfte über 100 kW betragen.

Zu den Schraubenverdichtern

Die Schraubenverdichter eroberten sich ein weites Anwendungsfeld, nachdem sie anfänglich hauptsächlich für industrielle Zwecke entwickelt wurden. Der Leistungsbereich reicht bis etwa 15 kW herunter. Das [24. Bild](#) zeigt eine halbhermetische Schraube der Fa. Bitzer. Die Herstellung der Schrauben erfordert höchste Präzision. Die Lagerung erfolgt mittels Wälzlager, um die erforderliche Quertoleranz so niedrig wie möglich zu halten. Man erkennt Teile der Schieberregelung. Die Maschine ist sauggasgekühlt.

Das nächste [25. Bild](#) zeigt einen Blick in die Fertigungshalle der Fa. Bitzer. Rechts befindet sich eine Kälteschraube großer Leistung (etwa 100 kW Antriebsleistung), in der Mitte eine große Klimaschraube und links wiederum eine kleine Kälteschraube.

Der Unterschied zwischen Kälte- und Klimaschraube besteht darin, dass in die Klimaschraube der Ölabscheider integriert ist, während er bei den Kälteschrauben außerhalb sitzt. Grund ist der größere Öldurchsatz bei Kälteschrauben wegen des größeren Druckverhältnisses.

Das [26. Bild](#) zeigt ein Verdichtergehäuse von der Motorseite aus gesehen, [Bild 27](#) von der Schraubenseite, [Bild 28](#) die Schraubenrohlinge, [Bild 29](#) nach erfolgter Teilbearbeitung, [Bild 30](#) nach abgeschlossener Bearbeitung bei der Qualitätskontrolle und [Bild 31](#) den nahezu fertig komplettierten Verdichter. Die Rohre gehören zur Leistungsregelung.

Zu den Scroll-Verdichtern

Sie stellen ein Novum auf dem Verdichtermarkt dar. Ihre Serienreife verdanken sie vor allem der Präzision, welche durch die modernen CNC-gesteuerten Werkzeugmaschinen möglich ist.

Das [32. Bild](#) zeigt oben den Schnitt durch einen Scroll-Verdichter in vollhermetischer Bauweise. Man erkennt den das Gehäuse größtenteils ausfüllenden Antriebsmotor und die darüber befindlichen beiden Spiralen, die feststehende und die orbitierende Spirale. Die Abdichtung wird durch die an der orbitierenden Spirale wirkende Fliehkraft bewirkt. Eigentümlich ist die Rückdrehbremse, um ein Rückdrehen im Stillstand zu verhindern.

Der untere Teil des Bildes zeigt das wohl allgemein bekannte Prinzip der Verdichtung: Das Kammervolumen des angesaugten Kältemittels verkleinert sich zunehmend, bis das verdichtete Kältemittel zentral austritt.

Das [33. Bild](#) zeigt orbitierende Spiralen im Rohzustand, [Bild 34](#) feststehende Spiralen nach der Bearbeitung, [Bild 35](#) ein Spiralenpaar, [Bild 36](#) nach der Komplettierung mit dem Läufer des Motors.

Im [37. Bild](#) sind Vergleiche der Eigenschaften von Schrauben-, Kolben- und Scrollverdichtern vorgenommen. Sie stammen von Herrn Sandkötter von der Fa. Bitzer und wurden der am Bildfuß gen. Literatur entnommen. Der Saugvolumenstrom ist bezogen auf 10 m³/h.

Demgemäß weist der Scrollverdichter die größte Kälteleistung auf, was auf die Dichtheit der Spiralen zurückgeführt wird. Beim Kolbenverdichter wirken sich nachteilig die Verluste beim Ansaugen und der Rückexpansion aus. Beides wird bestätigt durch den Verlauf der Liefergrade. Trotz vorgeh. Nachteile erreicht der Kolbenverdichter bei größeren Druckverhältnissen den besten Gütegrad.

Letztlich noch zu dem, den bisherigen Vortragsinhalt übergreifenden

Vergleich

der die Leistungsgewichte von Kältemaschinen zum Gegenstand hat.

Das [38. Bild](#) zeigt die Entwicklung von 1900 bis heute. Waren es anfangs mehr als 60 kg, die je kW Kälteleistung aufgewendet werden mussten, ergaben sich drastische Gewichtseinsparungen bis etwa 1950 auf Werte, die sich bis heute nur noch unwesentlich verringerten.

Betrachtet man das Leistungsgewicht in Abhängigkeit der Kälteleistung, zunächst für offene Verdichter im dem [39. Bild](#), so ergeben sich gemäß dem derzeitigen Stand Werte von etwa 3,5 bis 1,5 kg/kW. Deutlich niedriger liegen die Fahrzeugverdichter bis knapp unter 1 kg/kW, bedingt durch den Leichtbau und durch die etwa doppelt so hohen Drehzahlen.

Die Gewichtsabnahme mit der Leistung bei Hubkolbenverdichtern beruht auf der bekannten Tatsache, dass das Verhältnis von Oberfläche und damit dem Materialaufwand zum Hubvolumen mit dem Kehrwert des Durchmessers abnimmt (geht man davon aus, dass der Hub etwa gleich groß ist wie der Durchmesser).

Für Schraubenverdichter gilt dies offenbar nicht, ihr Leistungsgewicht bleibt nahezu konstant. Zusätzlich eingetragen sind Werte der alten Escher Wyss Baureihen 5, 6 und 7 und der Baureihe 110. Erwartungsgemäß können sie mit den modernen heutigen Verdichtern nicht konkurrieren. Dies gilt auch für die alte Bitzer-Baureihe, die etwa auf das Jahr 1940 zurückgeht.

Das [40. Bild](#) zeigt die Verhältnisse für halb- und vollhermetische Verdichter. Hier ergeben sich die deutlich höheren Werte naturgemäß wegen des zusätzlichen Motorgewichts.

Für Hubkolbenverdichter zeigen die Leistungsgewichte wieder den bereits bekannten sinkenden Verlauf, die Werte liegen zwischen etwa 10 und 1,5 kg/kW. Gleiches Verhalten zeigen die Scrolls, jedoch mit niedrigeren Werten.

Die Schrauben weichen vom tendenziellen Verhalten der Hubkolbenverdichter (und der Scrolls) wiederum ab, wie dies auch für die offenen Maschinen schon festgestellt wurde.

Ein letzter Vergleich sei noch bezüglich der Preise anhand des [41. Bildes](#) vorgenommen: Aufgetragen sind spezifische, d.h. auf die Kälteleistung bezogene Listenpreise in Abhängigkeit der Kälteleistung bis 250 kW. Man erhält das bekannte Verhalten, wonach der Preis mit der Leistung und damit der Maschinengröße stark abnimmt. So muss man für kleine Halbhermetikverdichter ca. 200 €/kW bezahlen, für große Maschinen, und das gilt auch für die halbhermetischen Schrauben, nur noch etwa 80 €/kW. Als besonders preisgünstig erweisen sich die Scroll-Verdichter.

Erkenntnisse:

Die meisten ehemals namhaften deutschen Firmen sind ganz oder als Hersteller von Kälteverdichtern vom Markt verschwunden.

In Deutschland gibt es nur noch die Firmen Bitzer und Bock.

Die Hermetisierung ist vorherrschend.

Fertigungsverfahren weisen eine hohe Präzision auf.

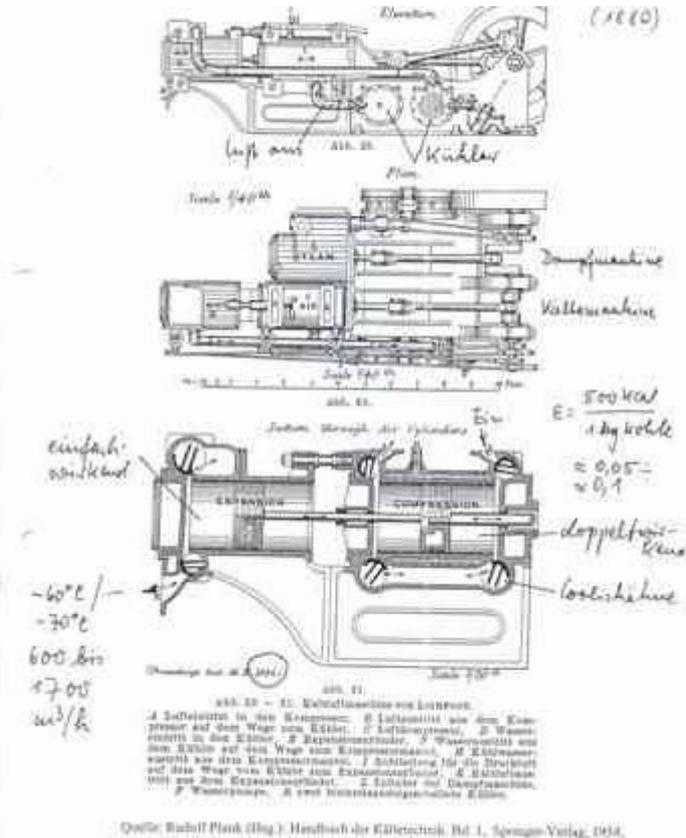
Verstärkter Einsatz von Schraubenverdichtern bis in den Bereich kleinerer Leistungen.

Bedeutender Anteil von Scrollverdichtern.

NH₃ ist wieder Auferstanden; keine Hermetisierung.

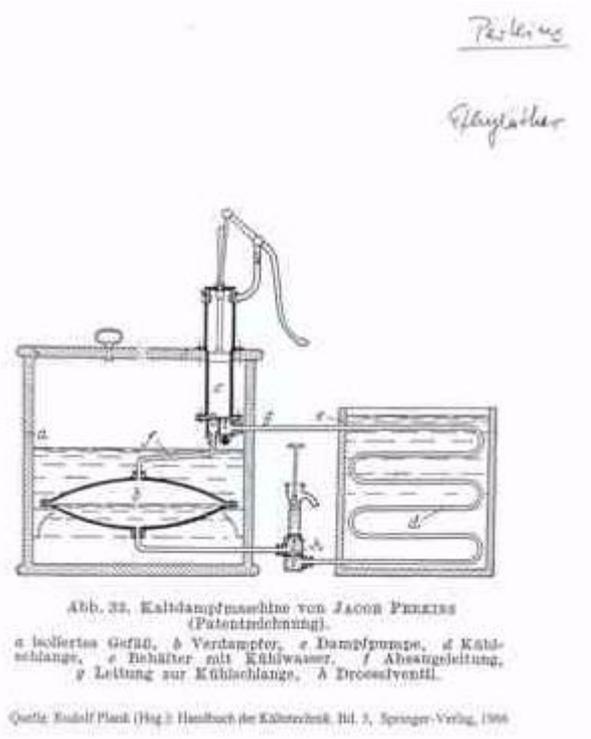
Bilder zu dem Vortrag

Bild 1



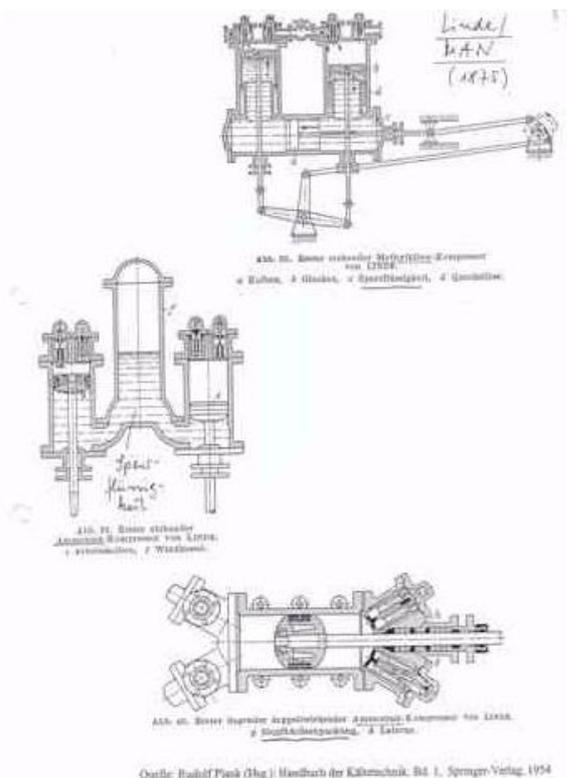
Quelle: Rudolf Plink (Hg.) Handbuch der Kältetechnik, Bd. 1, Springer-Verlag, 1934.

Bild 2



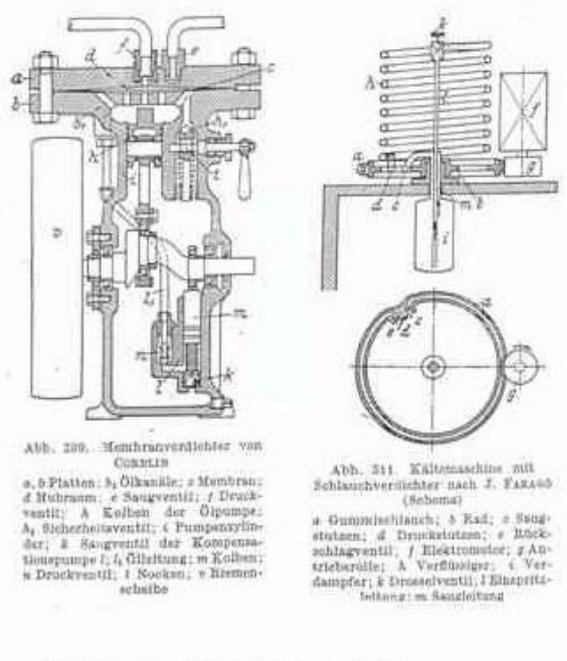
Quelle: Rudolf Plink (Hg.) Handbuch der Kältetechnik, Bd. 1, Springer-Verlag, 1934.

Bild 3



Quelle: Rudolf Plink (Hg.) Handbuch der Kältetechnik, Bd. 1, Springer-Verlag, 1934.

Bild 4



Quelle: Plink/Kupersmidt: Die Kältekältemaschinen, Springer-Verlag, 1960.

Bild 5

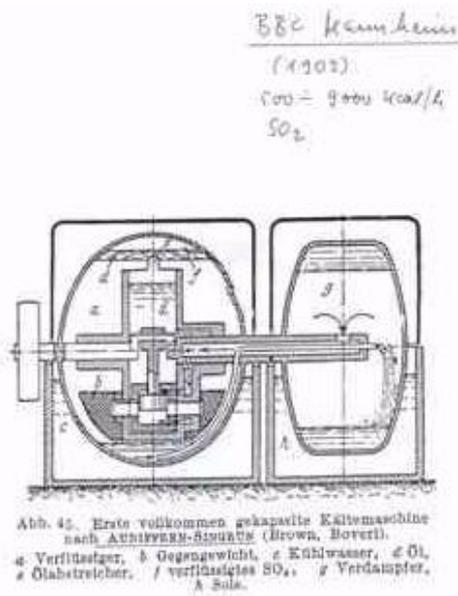


Bild 6



Bild 7

Tabelle 1. Veränderung der Drückkräfte, mittleren Kältegeschwindigkeiten und Leistungswerte von NH₃-Halbdruckkompressoren in den Jahren 1924-1929

Drucke (atm)	Revol.	Druckkraft (Din)	Mitt. Kältegeschw. (m/s)	Leistung für 1000 m³/h (hp)	G/W
1925	2,2%	80	1,8	120	4,1
1926	3,5%	130	2	80	3,5
1927	4,2%	230	2-2,5	23	2,8
1928	1,2%	350	2	14	2,2
1929	4,2%	500	4	4	2
1945	6,2%	850	5-3,3	5-7	2,4
1950	8 bis 10,2%	1450	3,5-4	4,5-5	2,1

Die Werte der Zahlenstafel entsprechen stündlichen Ammoniak-Kompressoren von ca. 30000 kcal stündlicher Kälteleistung bei -10° + 25°.

Tabelle 2.10. Praktisch vorkommende ungefähre Kältegeschwindigkeiten in m/s

Kältemittel	100-1000 Z/a		10000 Z/a		100000 Z/a	
	Spindelventil	Plattenventil	Spindelventil	Plattenventil	Spindelventil	Plattenventil
Ammoniak	2,5	1	0,8	1,8	1,8	2,6
Schwefelkohlenstoff	0,5	1	0,7	1,4	1,4	2,8
Kohlensäure		0,4-0,7	0,5	1	1	1
Methylchlorid R. 11 und R. 22		0,4-0,5		1,4-1,8		1,4-1,8

Bild 8

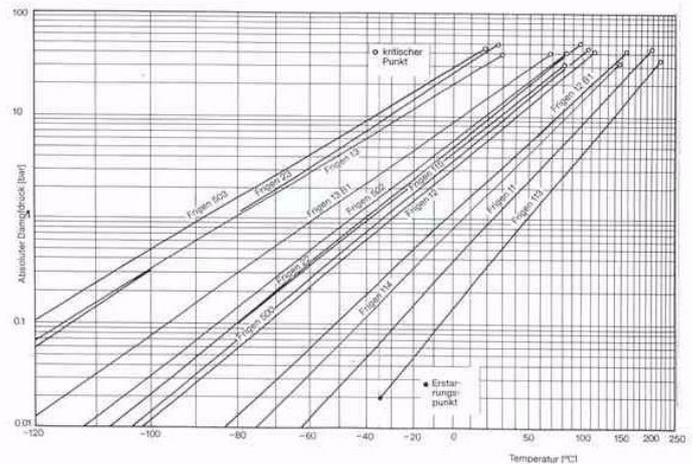


Bild 9

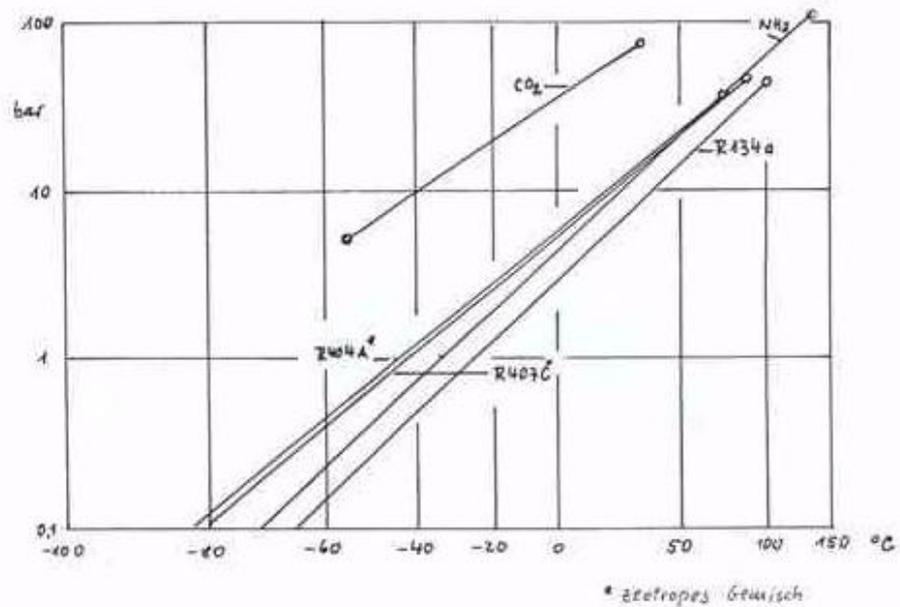


Bild 10

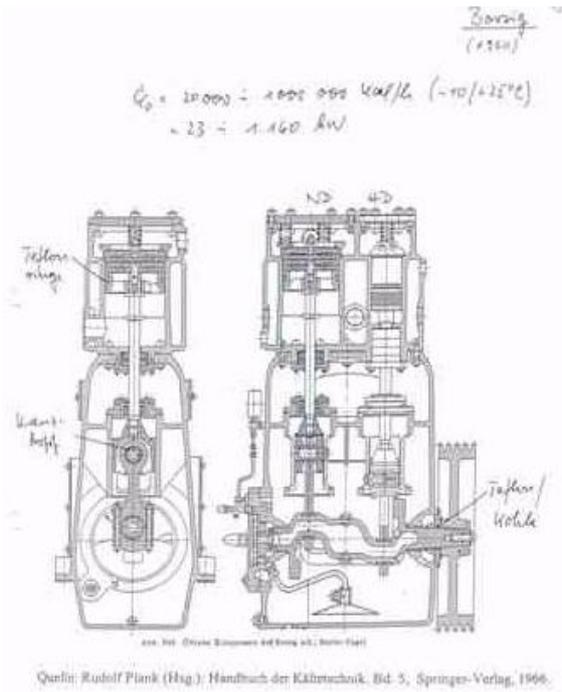


Bild 11

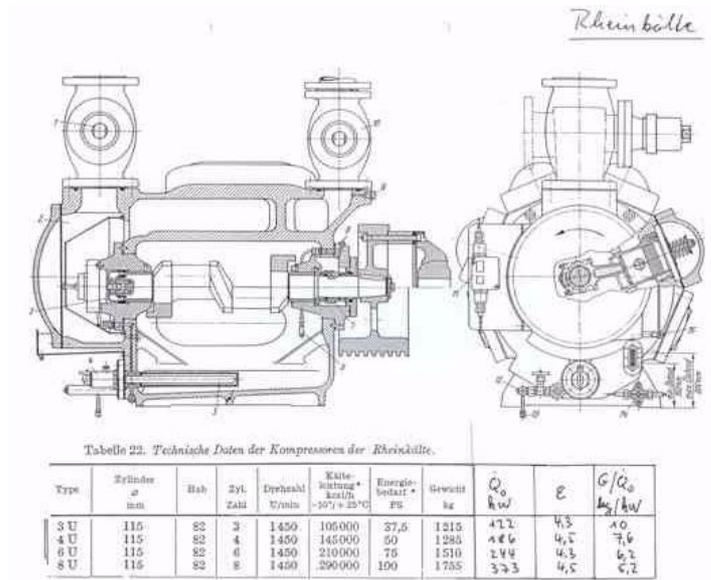


Bild 12

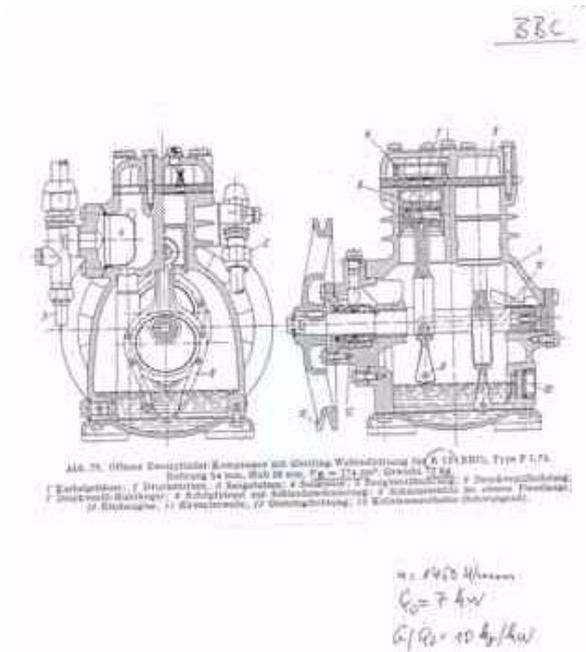


Bild 13

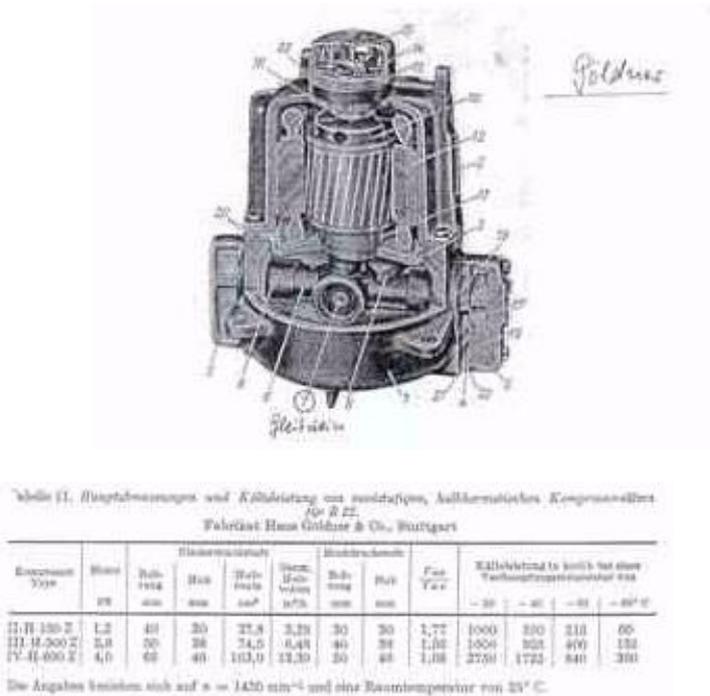
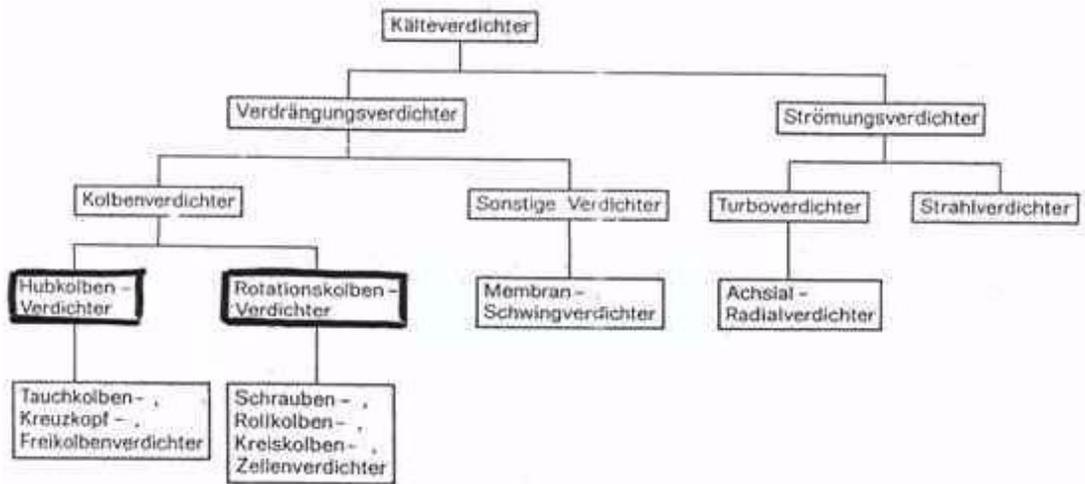


Bild 18



Quelle: v. Cube: Lehrbuch der Kältetechnik, Kapitel 4: H.J. Bauder: Komponenten der Kälteerzeugung, CF, Müller Verlag.

Bild 19



Bild 20



Bild 21



Bild 22



Bild 23



Bild 24

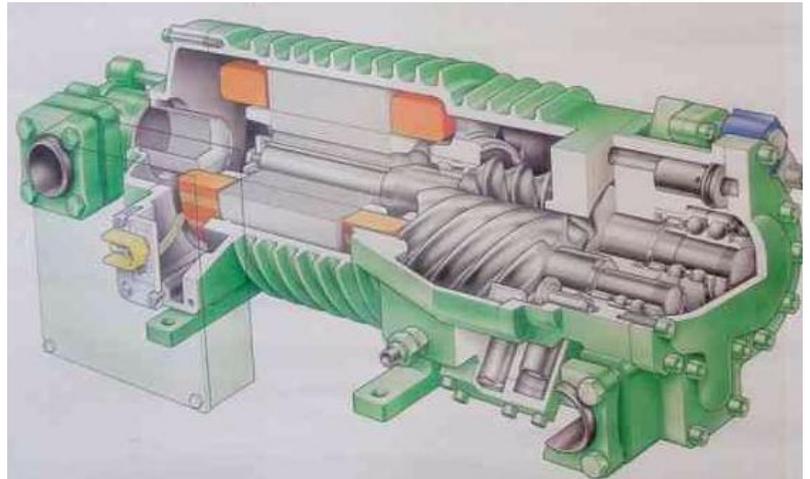


Bild 25



Bild 26



Bild 27



Bild 28



Bild 29



Bild 30

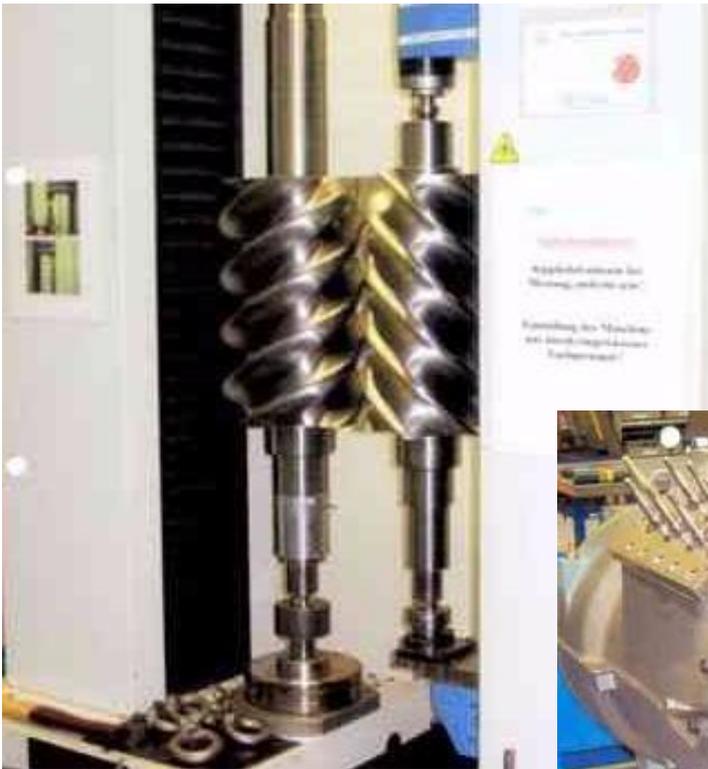


Bild 31



Bild 32

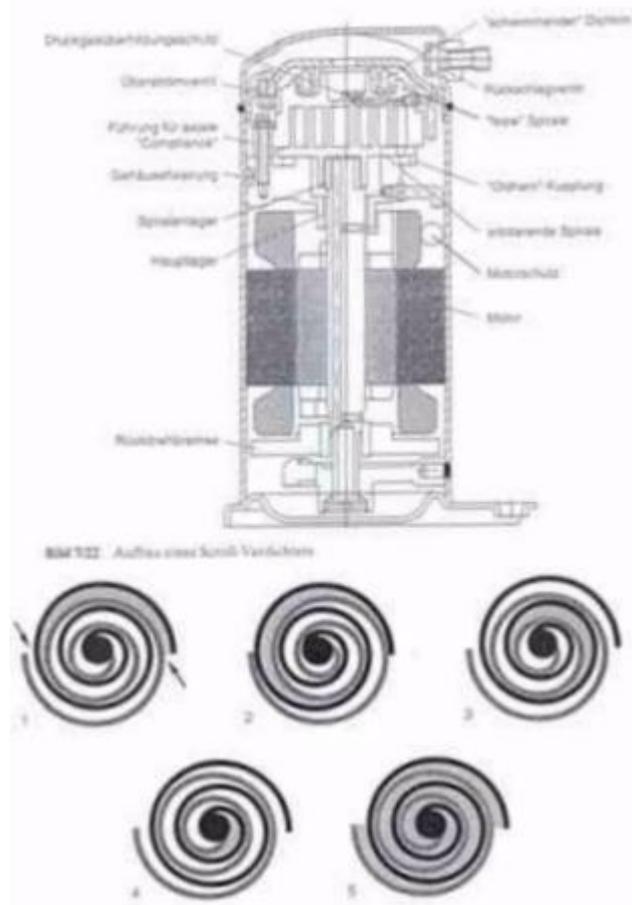


Bild 33



Bild 34



Bild 35



Bild 36



Bild 37

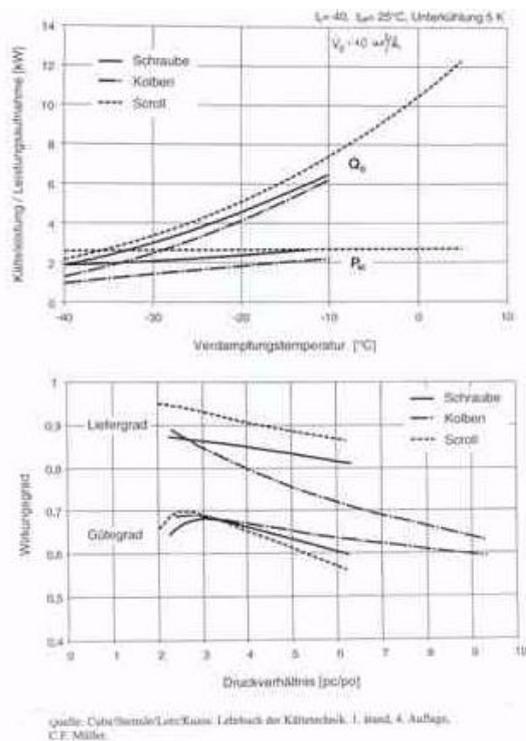


Bild 38

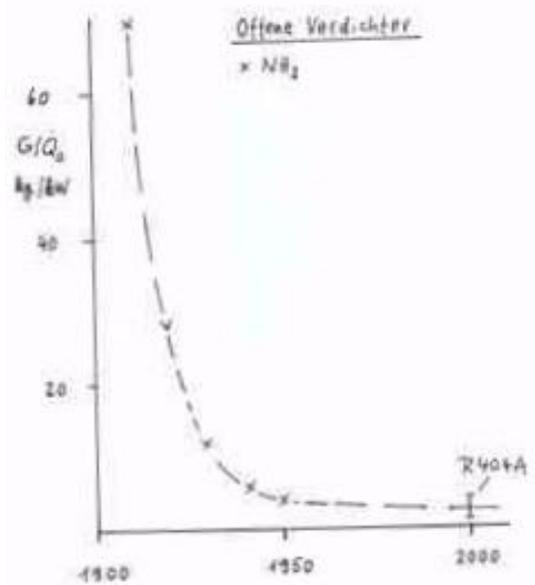


Bild 39

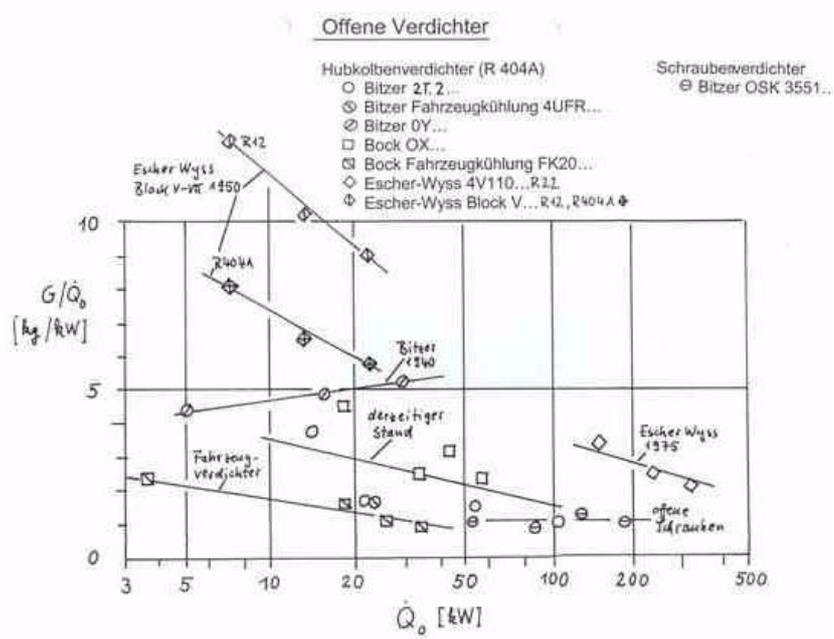


Bild 40

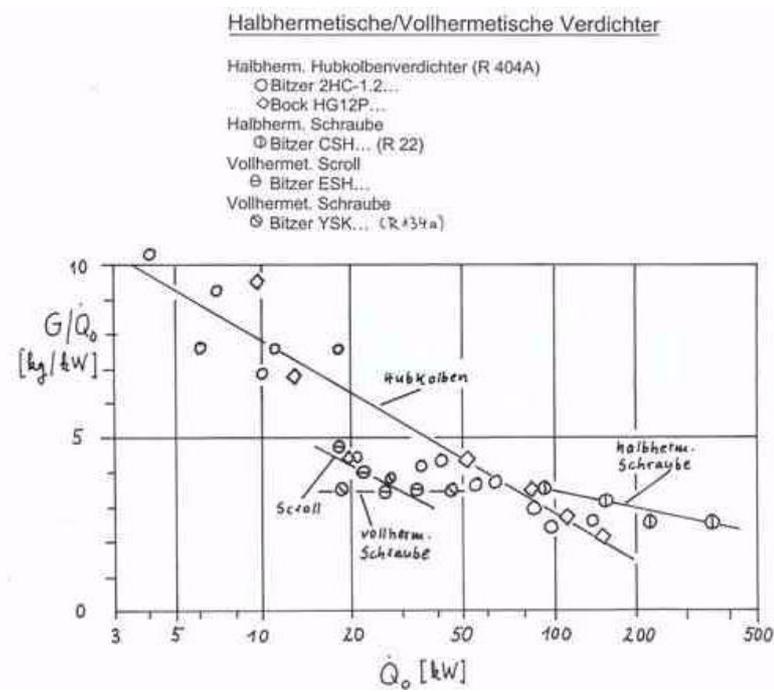


Bild 41

