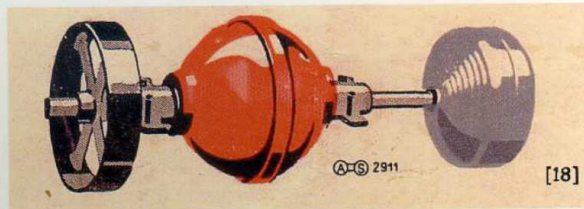


Die erste vollhermetische Kältemaschine

Rot-Silber-Kühlautomat



Verfasser:

Dipl.-Ing. Joachim Naumann,
Schulleiter der Sächsischen Kältefachschule

Herausgeber:

Sächsische Kältefachschule Reichenbach im Vogtland,
Sächsische Innung der Kälte- und Klimatechnik
in Zusammenarbeit mit der Historischen Kleinkälte Scharfenstein e.V.

© Copyright 2008 Sächsische Kältefachschule Reichenbach

Diese Broschüre ist urheberrechtlich geschützt.
Eine Verwertung, wie Veröffentlichungen auch auszugsweise, ohne
Einwilligung des Herausgebers ist strafbar.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	3
2.	Kältemittel SO₂	11
3.	Aufbau der Maschine	19
3.1.	Bauteile im Inneren	20
3.1.1.	Verdichter	20
3.1.2.	Verflüssiger	24
3.1.3.	Expansionsorgan	25
3.1.4.	Verdampfer	30
3.2.	Kühlwassersparer	32
3.3.	Kühlwasser- bzw. Solebecken	34
4.	Betrieb der Maschine	37
4.1.	Prozessbedingungen	37
4.2.	Kreisprozess (l _g p, h-Diagramm)	38
4.3.	Leistungsdaten	40
4.3.1.	Kälteleistung	43
4.3.2.	Antriebsleistung	46
4.3.3.	Verflüssigerleistung	49
4.4.	Steuerung und Regelung	49
5.	Anwendung	52
5.1.	Raumkühlung	52
5.2.	Kühlschränke	55
5.3.	Eiserzeugung	64
6.	Zusammenfassung	65
Anhang 1	Werbeanzeigen	66
Anhang 2	Verzeichnis der Bilder	72
Anhang 3	Verzeichnis der Tabellen	74
	Literaturverzeichnis	75

1. Einleitung

Wenn man sich dieser einzigartigen Kältemaschine nähern möchte, so muss man einen Blick zurück um das Jahr 1900 wagen. Neben der bereits recht weit verbreiteten industriellen Anwendung der Kältetechnik, beispielsweise in Brauereien und Schlachthöfen, wuchs das Interesse am Einsatz in der Lebensmittelverarbeitung und dem Haushalt. Die Kältemittel, die zur Lösung dieser Aufgaben zur Verfügung standen, waren insbesondere Ammoniak, Kohlendioxid und Schwefeldioxid.

Wegen seiner thermodynamischen Eigenschaften wurde Schwefeldioxid für den Einsatz im Bereich kleiner und mittlerer Kälteleistungen bevorzugt. Der stechende Geruch und besonders die hohe Toxizität setzten dabei allerdings eindeutige Grenzen, da man zu diesem Zeitpunkt nicht in der Lage war, dauerhaft dichte Anlagen zu bauen. Probleme bringen die technische Entwicklung voran und so entwickelte der französische Zisterziensermönch und Professor für Physik Marcel Audiffren in Grasse zwischen 1890 und 1895 die erste vollhermetische Kältemaschine. Sie war besonders für den Einsatz in Haushalt und Gewerbe geeignet, da das Kältemittel SO_2 vollständig dicht abgeschlossen im Kreislauf zirkulierte, dauerhaft von der Umgebung getrennt blieb. Im Bild 1 ist der Kopf der Patentschrift Nr. 82314 von 1894 zu sehen



Bild 1: A-S Patent 1894 in Deutschland [36]

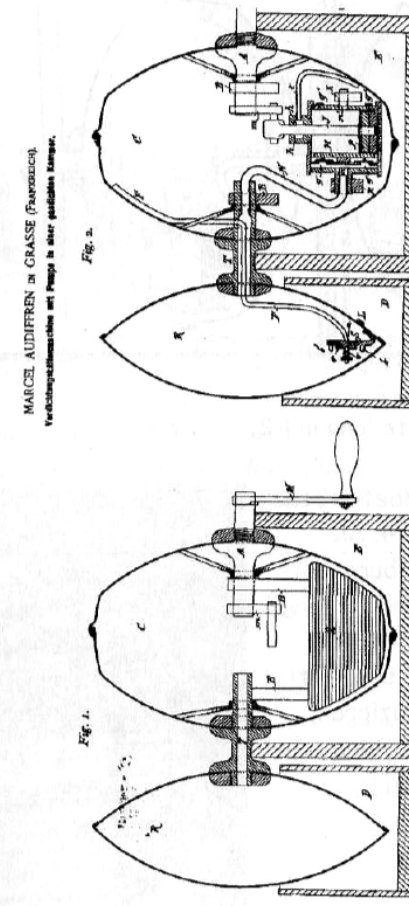


Bild 2: Schnittdarstellung aus dem Patent von 1894 [36]

Bild 2 zeigt, dass die Anfänge der A-S Maschinen handbetrieben waren.

Im Bild 3 handelt es sich ebenfalls um eine Zeichnung aus der deutschen Patentschrift von 1894.

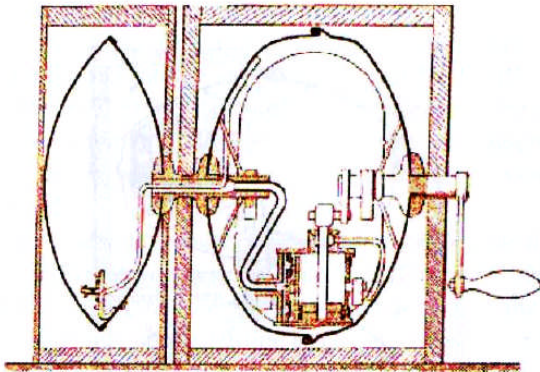


Bild 3: Schnittdarstellung in [21]; [27]

Eine ebenfalls handbetriebene Maschine zeigt Bild 4. Sie wurde laut Beschreibung von französischen Kolonialtruppen eingesetzt und war in der Lage 5 kg Eis pro Stunde zu produzieren, bei einer Antriebsleistung von 0,25 PS.

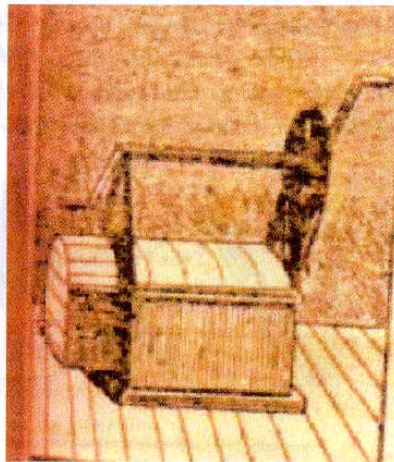


Bild 4: A-S Kältemaschine mit Handbetrieb zur Eiszerzeugung [35]

Schon etwas komfortabler, aber dennoch kräfteeraubend, der Antrieb per Fahrrad im Bild 5.

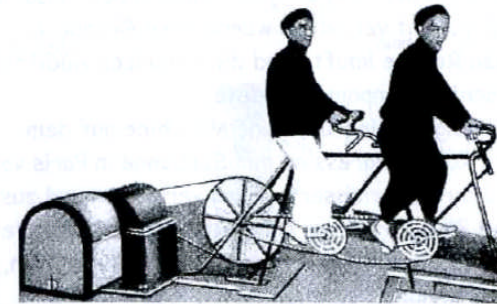


Bild 5: Antrieb der A-S Kältemaschine durch Menschenkraft [10]

Zum Entwickler gesellte sich in den darauf folgenden Jahren der Konstrukteur Albert Singrün. Dieser betrieb in Epinal (Vogesen) eine augenscheinlich sehr erfolgreiche Maschinenbaufabrik, wie man an den Hinweisen auf "Grand Prix" und "Medailles d'Or" im Bild 6 erkennen kann.

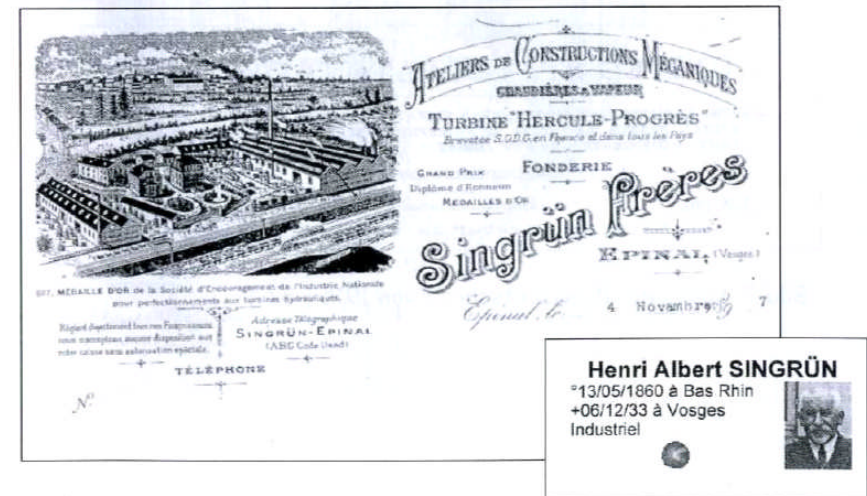


Bild 6: Die Fabrik von Albert Singrün auf einem Dokument von 1897 und ein Portrait des genialen Konstrukteurs [21]

Im Jahr 1903 wurde eine verbesserte Maschine vorgestellt, nunmehr mittels Motor angetrieben. In [27] ist beschrieben, dass dafür 1908 wiederum ein U.S. Patent vergeben wurde, eine Gruppe von Amerikanern diese Rechte kaufte und die American Audiffren Refrigerating Machine Company gründete.

Ebenfalls 1908 gelang es Singrün, seine Maschine auf dem 1. Internationalen Kältekongress an der Sorbonne in Paris vorzuführen. Er konnte auf 3 Jahre Betriebserfahrung verweisen und zusichern, dass die Maschine 20 Jahre ohne Kältemittelverlust arbeitet. Dies war zu diesem Zeitpunkt eine revolutionäre Innovation, wie Werbeanzeigen im Anhang 1 belegen.

1911 erwarb General Electric die Patentrechte und es begann die Produktion in Ford Wayne USA. Bis 1928 stellte GE dort jährlich 150 bis 200 Maschinen her, deren Preis anfangs 1000 \$ betrug, der doppelte Preis eines Autos.

Die Bilder 7 und 8 zeigen eine US-Patentschrift von 1915. Hervorzuheben sind die sehr detailgetreuen Zeichnungen und Schnitte.

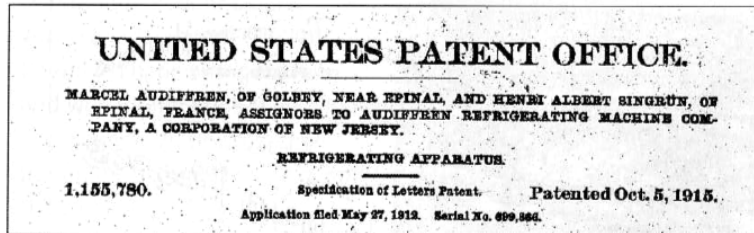


Bild 7: Kopf der US-Patentschrift von 1915 [37]

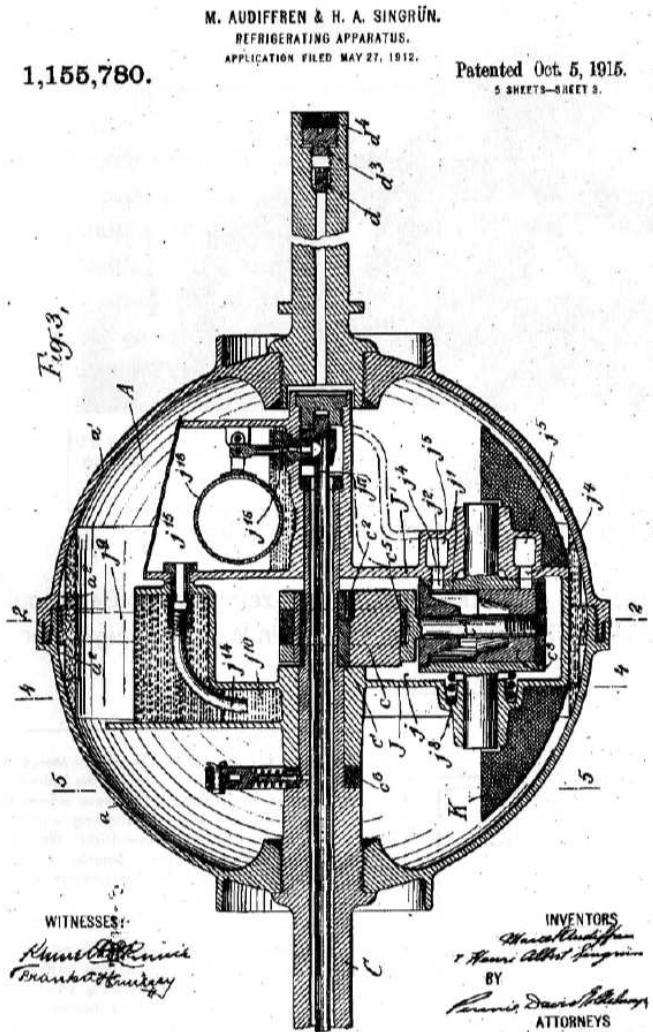
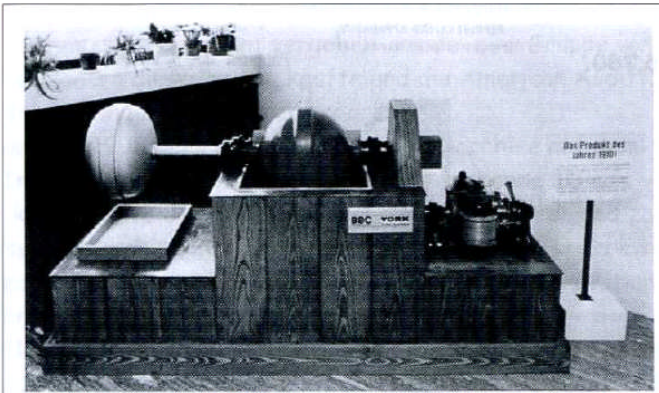


Bild 8: US-Patent von 1915, Schnitt durch die Verflüssiger-Kugel [37]

Ab 1910 lief in Deutschland bei Brown Boveri & Co. in Mannheim die Produktion an, wie Bild 9 verdeutlicht.



Das war der Anfang 1910!
Die erste hermetisch gekapselte stopfbüchsenlose Kältemaschine der Welt! Serienmäßig geliefert durch BBC.

Bild 9: Darstellung von BBC York Mannheim [19]

Der Stolz über die erbrachten Leistungen zeigt sich im Bezug auf diese Maschine noch 1957 (bzw. 1961-Anhang 1) in Werbeanzeigen der Fachpresse.

ÜBER 50 JAHRE...

Es ist fast ein halbes Jahrhundert her, dass die Welt die ersten hermetisch gekapselten Kältemaschinen sah. Diese der Zeit weit vorausweisende Erfindung wurde von den Gebrüder Singrün verwirklicht, die den ersten geschlossenen Audiffren-Singrün-Kühlautomaten konstruierten. Als AS-Kühlautomat ist er weithin bekannt geworden.

BROWN BOVERI begann 1910 mit dem Bau von AS-Kältemaschinen und hat diese zu Kältemaschinen höchster technischer Vollendung entwickelt, die an Lebensdauer und Betriebssicherheit bisher nicht übertroffen wurden.

1957

ist es her, seit der Physikprofessor Marcel Audiffren im Jahre 1905 eine automatische Kältemaschine in vollkommen gekapselter Bauweise erfand. Diese der Zeit weit vorausweisende Erfindung wurde von den Gebrüder Singrün verwirklicht, die den ersten geschlossenen Audiffren-Singrün-Kühlautomaten konstruierten. Als AS-Kühlautomat ist er weithin bekannt geworden.

BROWN BOVERI begann 1910 mit dem Bau von AS-Kältemaschinen und hat diese zu Kältemaschinen höchster technischer Vollendung entwickelt, die an Lebensdauer und Betriebssicherheit bisher nicht übertroffen wurden.

Bild 10: Inserat aus der Zeitschrift Kältetechnik [23]

Die folgenden Ausführungen zur Technik und zum Betrieb der Anlage werden anschaulich machen, welche technischen Innovationen in die Konstruktion einfließen, was sich auch in der Tatsache manifestiert, dass Kältemaschinen des Typs Audiffren-Singrün (AS) zum Teil 60 Betriebsjahre absolviert hatten, bevor sie der technische Fortschritt endgültig verdrängte.

Unternehmen wir den Versuch, den Aufbau und die Wirkungsweise der AS-Kältemaschine zu verstehen, sind wir auf die Literatur und wenige noch vorhandene Anlagen angewiesen. Nur am Ende ihres Lebenszyklus, mit aufgeschnittener Verflüssiger- und Verdampferkugel, gelingt uns ein Blick in das Innere der ansonsten mit giftigem SO₂ im flüssigen und gasförmigen Zustand gefüllten Kugeln.

Betrachten wir daher zunächst einmal den Arbeitsstoff SO₂, welcher seit Jahrzehnten nicht mehr in neuen gewerblichen Kälteanlagen angewendet wird.

2. Kältemittel SO₂

Wie die nachfolgende Tabelle belegt, war SO₂ in der Anwendung als Kältemittel eines der ersten der heute sogenannten „klassischen“ Kältemittel neben NH₃ und CO₂.

Jahr	Kältemittel	eingeführt durch
1834	Schwefeläther	Perkins
1836	Aethyläther	Shaw
1871	Methyläther	Tellier
1874	Schwefligsäure (SO ₂)	Picelet
1874	Ammoniak	Linde
1878	Chlormethyläther	Vicent
1881	Kohlensäure (CO ₂)	Windhausen

Tabelle 1: Einsatzbeginn der „klassischen“ Kältemittel nach [10]

SO₂ ist sowohl im flüssigen wie im gasförmigen Zustand farblos.

SO₂ ist nicht brennbar und nicht explosiv. Bei Kontakt mit Flammen oder heißen Flächen entstehen keine schädlichen Stoffe.

SO₂ besitzt einen scharfen, stechenden Geruch und ist sehr giftig.

In der Luft bewirken:

0,005 Vol-% nach 30 - 60 Min. eine leichte Wirkung,

0,04 Vol-% nach 30 - 60 Min. eine schädliche Wirkung,

0,2 Vol-% tötet die meisten Lebewesen in kurzer Zeit.

Daher, wie bereits oben beschrieben, die zunehmende Tendenz die Kältemaschinen möglichst dicht zu gestalten.

Der Nachweis von SO₂ ist mit Salmiakgeist (Bildung eines weißen Nebels) oder mit blauem Lakmuspapier (Rotfärbung) möglich.

Wichtig ist ein sehr geringer Anteil von Wasser im Kältemittel und im Öl, da SO₂ mit Wasser zu schwefliger Säure und diese mit Sauerstoff zu Schwefelsäure reagiert. Wasserfreies SO₂ greift Metalle wie Stahl und Kupfer, Aluminium, Rotguss, Messing im für Kälteanlagen üblichen Temperaturbereich (< 200°C) nicht an.

Trockner in der Flüssigkeitsleitung bringen keinen Erfolg. Wenn Trockner eingesetzt werden, dann nur im gasförmigen Zustand des Kältemittels. SO₂ ist mit den üblicherweise verwendeten Ölen nur begrenzt mischbar und im Öl nur wenig lösbar.

SO₂ ist schwerer als Luft, muss demzufolge am Boden abgesaugt werden. Durch den Austritt von SO₂ in die Umgebung werden Lebensmittel ungenießbar und Pflanzen zerstört. [30]; [31]; [32]

Wenden wir uns nun einigen thermodynamischen Eigenschaften von SO₂ zu, die für den praktischen Einsatz und die Bestimmung der Bauteile der Anlagen von Interesse sind. Es sind dies insbesondere:

- die Drücke
- die Verdampfungswärme,
- die volumetrische Kälteleistung,
- die Verdichtungsendtemperatur,
- der Liefergrad,
- die Strömungsgeschwindigkeiten in den Rohrleitungen,
- die Kältemittelfüllmenge.

Aus [4] und [10] sind zu entnehmen.

Druck bei +20°C	3,35 atm
-10°C	1,04 atm.

Bei der lange Zeit überwiegend eingesetzten Wasserkühlung im Durchlauf erscheint 20°C Kondensationstemperatur durchaus realistisch und für die Kühlung von Kälteträgern wurde häufig mit -10°C Verdampfungstemperatur gearbeitet.

Das niedrige Druckverhältnis von ca. 3,4 wirkte sich günstig auf die Verdichtungsendtemperatur aus. Diese liegt relativ hoch, bedingt durch den großen Adiabatenexponenten von $\kappa \approx 1,35$.

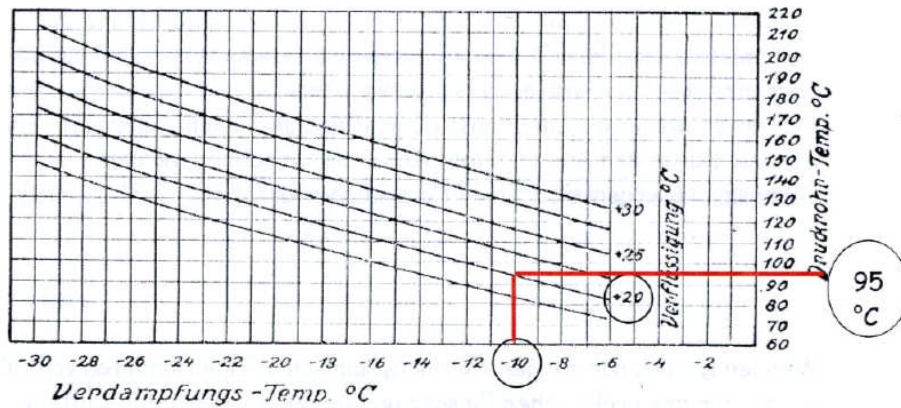


Bild 11: Verdichtungsendtemperatur SO_2 nach [4]

Bei einer Verdampfungsstemperatur von -10°C sollten nach [4] einreguliert werden:

- Soletemperatur: -5°C (Vorlauf)
- Kühlwasserzufluss: $+12^\circ\text{C}$
- Unterkühlung: $+14^\circ\text{C}$
- Kühlwasserabfluss: $+20^\circ\text{C}$
- Druckmanometer $+23$ bis $+24^\circ\text{C}^*$ ($\approx t_c$)
- Temp. am Vdi-Ausgang: $+90$ bis $+95^\circ\text{C}$ (vergleiche Bild 11)

*) "Die Manometer-Alarmvorrichtung stelle man für das Saugmanometer jeweils 5° kälter als die Saugmanometertemperatur, für das Druckmanometer um jeweils 5° wärmer als die Druckmanometertemperatur ein".

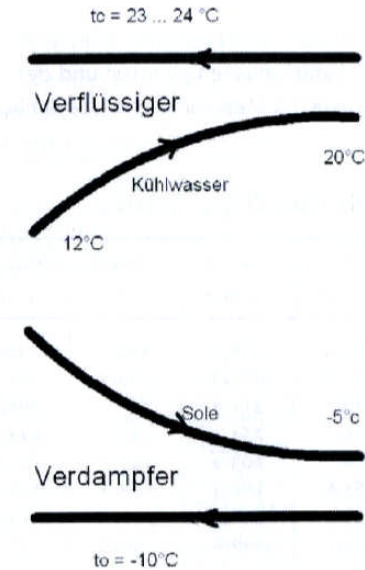


Bild 12: Temperatur-Flächen-Schaubild mit den Werten nach [4]

Für das erforderliche Fördervolumen (die Größe) des Verdichters sind der Liefergrad und die volumetrische Kälteleistung entscheidend. Einen Vergleich zwischen den „klassischen“ Kältemitteln kann man Bild 13 entnehmen.

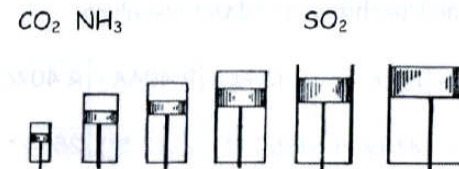


Bild 13: Vergleich der erforderlichen Zylindervolumina [9]

Tabelle 2 gibt die volumetrische Kälteleistung in kcal/m³ an, in Abhängigkeit von der Verdampfungstemperatur und der Temperatur vor dem Regelventil, als direktes Maß für das erforderliche Zylindervolumen.

b) Schweflige Säure. = t₃						
Verdampf.-Temp. °C	Temperatur vor dem Regelventil					
	+ 10°	+ 15°	+ 20°	+ 25°	+ 30°	+ 35
+ 5	476,5	467,4	458,2	448,8	439,2	429,4
0	392,8	385,2	377,6	369,8	362	354
- 5	324	317,7	311,4	305	298,6	292
- 10	264,3	259,3	254,2	249	243,6	238,2
- 15	212	208	203,9	199,7	195,4	191,1
- 20	168,9	165,6	162,3	158,9	155,5	152
- 25	133,8	131,2	128,6	125,9	123,2	120,4
- 30	103,9	101,8	99,8	97,7	95,6	93,4

Tabelle 2: Volumetrische Kälteleistung von SO₂ in kcal/m³ [3]

Um die Werte der Tabelle 2 unseren heutigen Erfahrungswerten in kJ/m³ anzupassen, sind sie mit 4,19 zu multiplizieren.

Die unten stehende Tabelle enthält die vol. Kälteleistung in kJ/m³ für t₀ = -10°C und t₃ = 20°C, ohne Überhitzung und Unterkühlung

	SO ₂	CO ₂	NH ₃	R 134a	R 404A	R 407C
q _{ov} kJ/m ³	1065,1	1275 *)	2769 *)	1650 **)	2912 **)	2534 **)

*) berechnet nach [13]

**) ermittelt mit [28]

Tabelle 3: Vergleich der volumetrischen Kälteleistung

In Tabelle 4 finden sich Werte für K_{th} in kcal/PSH, die als dimensionslose Zahl die Leistungszahl ε_{th} oder den COP-Wert repräsentieren, wobei sich praktische Werte nach [4] durch die Multiplikation mit 0,6 bis 0,8 ergeben!

b) Schweflige Säure. (SO ₂)									
Verflüssigungs-Temp. °C	Temperat. vor Reg.-Vent. °C	Verdampfungs-Temperatur °C							
		- 30	- 25	- 20	- 15	- 10	- 5	0	+ 5
+ 15	+ 10	2959	3462	4114	4988	6213	8058	11139	17313
	+ 15	2901	3395	4035	4892	6094	7904	10927	16983
	+ 20	2664	3081	3604	4282	5186	6459	8374	11572
+ 20	+ 12,5	2638	3051	3570	4241	5137	6398	8294	11462
	+ 15	2612	3021	3535	4200	5087	6336	8214	11352
	+ 20	2559	2960	3464	4116	4986	6210	8052	11127
+ 25	+ 10	2425	2777	3210	3753	4455	5396	6717	8706
	+ 12,5	2401	2750	3179	3717	4413	5345	6653	8623
	+ 15	2377	2723	3148	3681	4370	5293	6589	8540
	+ 17,5	2353	2696	3117	3645	4327	5241	6524	8456
	+ 20	2329	2668	3085	3608	4283	5188	6459	8371
	+ 25	2280	2612	3020	3533	4195	5081	6326	8199

Tabelle 4: K_{th} für SO₂ in kcal/PSH aus [4]

Um die heute übliche Darstellung als dimensionslosen Wert zu erreichen, dividiert man die Tabellenwerte durch 632.

Die Tabelle 5 enthält den Vergleich der ε_{th} (COP)-Werte unter den Randbedingungen der Tabelle 4.

	SO ₂	CO ₂	NH ₃	R 134a	R 404A	R 407C
COP	5,5*)	5,8***)	7,7***)	6,1**)	6,0**)	5,8**)

*) Wert nach Tabelle 4, praktischer Multiplikationsfaktor 0,7

**) ermittelt mit [28]

***) berechnet mit [29]

Tabelle 5: Theoretische Kälteleistungszahl ε_{th} bzw. COP-Wert

Bild 14 ermöglicht die Ermittlung von Liefergraden der Hubkolbenverdichter anhand von praktischen Anhaltswerten.

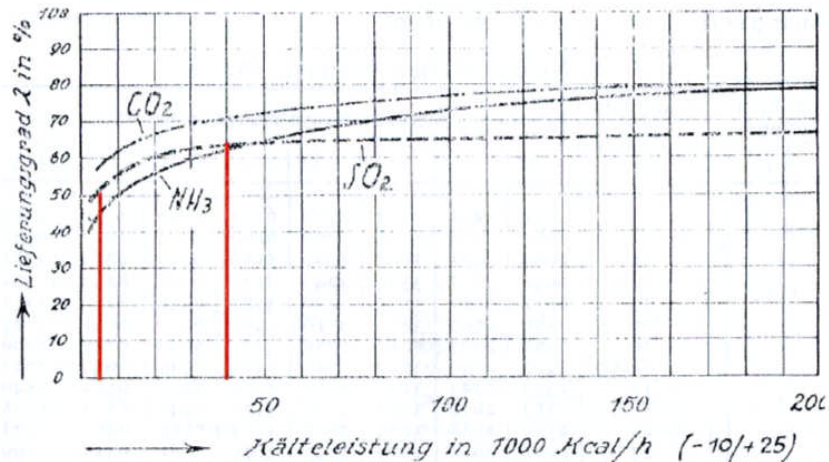


Bild 14: Angenäherte Liefergrade aus der Praxis nach [4] bei einem Druckverhältnis von $p_c/p_0 \approx 4$. (-10°C/20°C ergeben ein Druckverhältnis von $\approx 3,3$!)

Interessant im Vergleich zu den Kältemitteln CO_2 und NH_3 ist für SO_2 zu erkennen, dass der Liefergrad bereits ab ca. 40000 kcal/h, d. h., etwa 47 kW, nahezu konstant bleibt bei ca. 0,64 bis 0,67. Bei ca. 5 kW erreicht der Liefergrad etwa einen Wert von 0,5.

Nach [15] gilt für Verdichter ab 2000 kcal/h ($\approx 2,3$ kW) und einem Druckverhältnis von 3:

- Liefergrad 83 ... 86 %
- indizierter Wirkungsgrad 70 ... 73 %

Bei Kälteleistungen bis ca. 1 kW beträgt der Liefergrad 78 ... 82 %.

Die Richtwerte für die Geschwindigkeiten in den Rohrleitungen von SO_2 - Maschinen werden in Tabelle 6 wiedergegeben.

Geschwindigkeit m/s	Saugleitung	Druckleitung	Flüssigkeitsleit.
SO_2 kleine Anlagen	5 ... 10	10 ... 12	0,5 ... 1 *)
SO_2 große Anlagen	20 ... 25	25 ... 30	1 ... 1,5 *)

*) Keine Literaturangaben für SO_2 zugänglich, Werte abgeschätzt

Tabelle 6: Richtwerte für Strömungsgeschwindigkeiten von SO_2 [15]; [17]

Die Literatur liefert keinerlei Hinweise auf die Füllmengen der Anlage, weder für Kältemittel noch für Öl.

Lediglich [4] ist der sicher allgemein zu verstehende Hinweis zu entnehmen, dass bei einem Soleverdampfer ca. 4 ... 5 kg SO_2 je 1000 kcal/h Verdampferleistung erforderlich sind. Dies ließe für die ab Seite 47 betrachtete Maschine auf eine Füllmenge von ca. 10 ... 12 kg SO_2 schließen.

3. Aufbau der Maschine

Schaut man sich die A-S Kältemaschine zunächst vom äußeren Aufbau her an, so fallen die beiden "Kugeln" und der Antrieb ins Auge. Im Bild 15 sehen wir die älteste dem Verfasser zugängliche Darstellung von 1915 in [1]. Im Bild 16 wird deutlich, warum die Maschine im praktischen Sprachgebrauch auch als Rot-Silber-Kältemaschine bekannt ist.

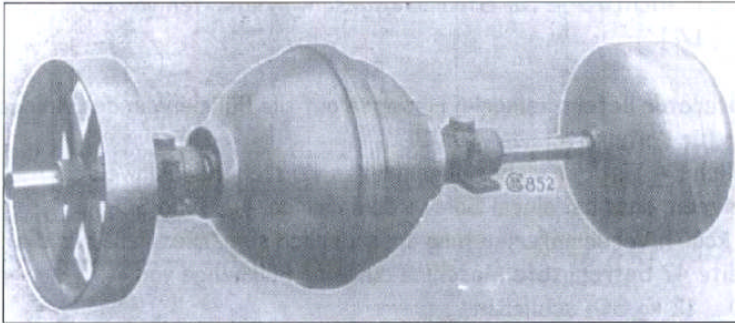


Bild 15: Äußerer Aufbau der A-S Maschine nach [1]; [8]

Rechts im Bild ist der Verdampfer zu sehen, der in der Sole umläuft und diese kühlt. In der Mitte die "Verflüssigerkugel", in deren Inneren Verdichter und Expansionsorgan angeordnet sind.

Die Kugeln sind aus Hartbronze gefertigt, bestehen aus jeweils zwei Teilen, die verschraubt und zusätzlich verlötet wurden.

In [42] ist dazu zu lesen: "Die Kugelhälften werden im Schraubengewinde durch Verzinnung miteinander verlötet und dann zusätzlich nochmals eine besondere Ringnut durch bestes Zinn ausgefüllt."

Beide Kugeln sind durch eine Hohlwelle verbunden, um sowohl die Einspritzung in den Verdampfer als auch das Absaugen zu gewährleisten. Die linke Seite bildet die Riemenscheibe für den äußeren Antrieb, anfangs mit Flach-, später mit Keilriemen.

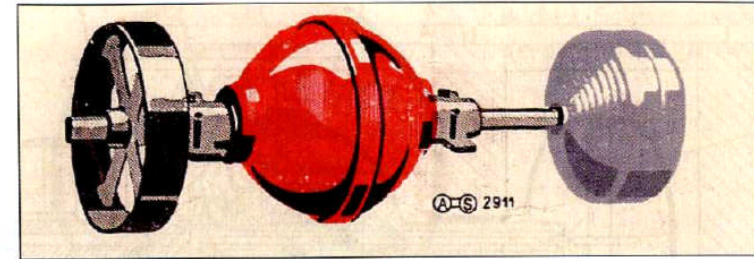


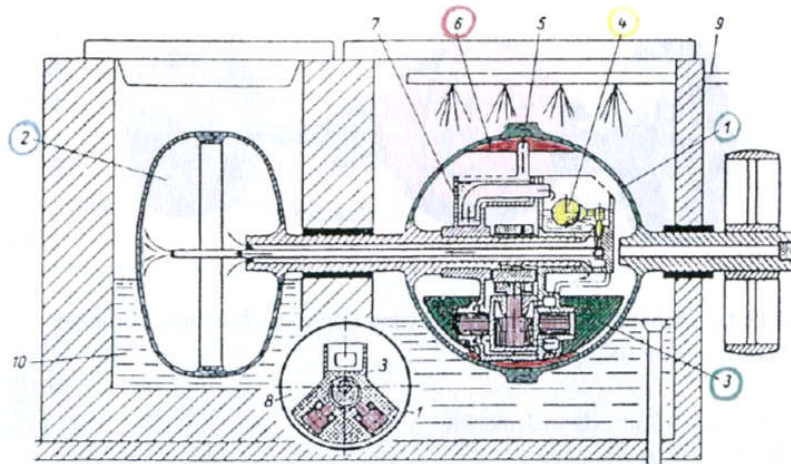
Bild 16: Übliche farbliche Gestaltung der A-S Maschine in einem Prospekt von BBC [18]

3.1. Bauteile in Inneren

3.1.1. Verdichter

Das „Herz“ der Kältemaschine, der Verdichter, ist im Bild 17 in 2 Schnitten, einer versetzt um 90°, dargestellt und es lässt sich zunächst erkennen:

- Es handelt sich um einen Hubkolbenverdichter.
- Die 2 Zylinder sind um ca. 90° versetzt angeordnet (Bilder 18 und 19).
- Der Verdichter ist hängend auf der Welle in der "Verflüssigerkugel" eingebaut.
- Ein Gegengewicht, nach [19] und [33] entsprechend dem max. zulässigen Verflüssigerdruckes bemessen, hält den Verdichter bei laufender Maschine in der senkrechten Lage unterhalb der Welle.
- Ein Exzenter auf der Welle sorgt für die Auf- und Abbewegung der Kolben (Ansaugung und Verdichtung des Gases).
- Da Kolben und Kolbenstange starr miteinander verbunden sind, schwingen die Zylinder um den Drehzapfen.



- 1 Kompressor, Verflüssigerkugel; 2 Verdampfer; 3 Gegengewicht
 4 Hochdruck-Schwimmerregelventil; 5 Auffanganordnung, welche die Flüssigkeit von 6 nach 7 führt;
 6 Flüssigkeitsring, bestehend aus Öl und verflüssigtem Kältemittel;
 7 Ölabscheider;
 8 Verkleinerter Querschnitt durch den Kompressor mit der Verflüssigerkugel 1;
 9 Kühlwasserzulauf; 10 Sole

Bild 17: Schnitt durch die A-S Maschine und den Verdichter [16]

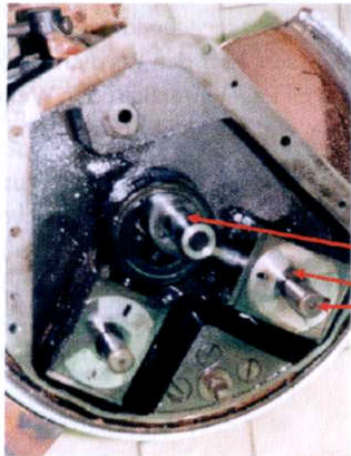


Bild 18: A-S Kältemaschine im demontierten Zustand, Blick auf die Welle mit dem Exzenter und die beiden Zylinder mit den Drehzapfen.

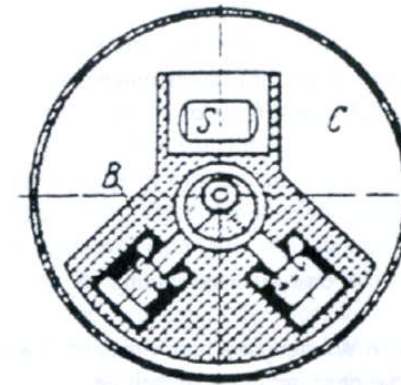


Bild 19: Schnitt durch den Verdichter [5]; [14]

In konstruktiven Details unterscheiden sich sowohl Beschreibungen als auch Darstellungen in der Literatur. Es ergibt sich die Frage:

Waren die Verdichter mit Saug- und Druckventil oder nur mit Druckventil ausgerüstet, bzw. arbeitete der Verdichter gänzlich ohne Ventile?

„Das Druckventil des Verdichters öffnet dagegen direkt in das Verflüssigergehäuse.“ [20]

„Der Kolben wird durch einen Nocken auf der Hohlwelle auf und nieder bewegt, während der Zylinder um den Drehzapfen schwingt. Diese Bewegung wird zur Steuerung der Ein- und Auslaßöffnungen benutzt.“ [7]

Die Maschine in Bild 18 besitzt Druckventile. Im Bild 20 ist um den linken Drehzapfen eine Feder zu erkennen, die den Zylinder gegen die rechts befindliche Steuerfläche mit der Ein- und Auslassöffnung drückt. Dies lässt auf eine Bauart wie in [7] beschrieben schließen.

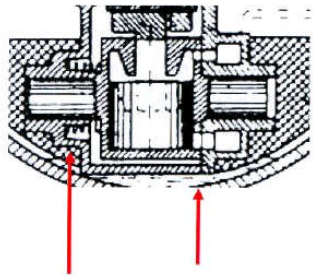


Bild 20: Detail aus Bild 17
 Andeutungsweise lässt sich die Feder um den linken Drehzapfen erkennen und eine Ein- und Auslassöffnung.

Feder Steuerfläche mit Ein- und Auslassöffnung

Einer Darstellung in [21], auf deren Wiedergabe hier verzichtet wird, ist eindeutig zu entnehmen, dass die dort gezeigte Maschine Ansaugöffnungen und Druckventile besitzt.

Es lässt sich vermuten, dass 2 Varianten gebaut wurden:

1. Maschinen ohne Ventile zur Steuerung des Ein- und Auslasses am Verdichter
2. Maschinen mit Ansaugöffnungen und Druckventilen.

Sowohl zur Frage nach den Beweggründen, sich für die jeweilige Variante zu entscheiden, als auch über den Zeitraum, in dem u. U. die Varianten zum Einsatz kamen, gibt die zugängliche Literatur keine Antwort.

In genial einfacher Weise ist die Maschine gegen Überlastung geschützt.

Steigt, z. B. durch Ausfall der Kühlwasserversorgung, der Druck im Kondensator bis zum zulässigen Wert an (nach [33] ca. 5 ata entsprechend ca. 32°C), so ist der Kolben ab diesem Druckwert nicht mehr in der Lage, das Gas aus dem Zylinder zu pressen. Der Kolben und damit die Verdichtung kommt zum Stillstand und der gesamte Verdichter mit dem Gegengewicht wird um die Welle geschleudert. Setzt die Kühlung wieder ein, sinkt der Gegendruck, überwiegt ab einem bestimmten Punkt die Masse des Verdichters und des Gegengewichts, der Verdichter bleibt wieder in der Stellung unterhalb der Welle und die Verdichtung beginnt erneut.

3.1.2. Verflüssiger

Die rechte Kugel läuft im Kühlwasser um, was im Bild 17 deutlich zu erkennen ist.

Das Kältemittel verflüssigt sich an der inneren Oberfläche der Kugel. Vernachlässigt man deren Wandstärke, dann ist die Kühlwassertemperatur gleich der Verflüssigungstemperatur. Damit ist die Kühlwassertemperatur von unmittelbarer Bedeutung für den wirtschaftlichen Betrieb der Anlage.

Dies wird deutlich in der Tatsache, dass man in der Literatur, z. B. [1] aus dem Jahr 1915, mehrere Seiten den Kühlwassertemperaturen und ihrer Veränderung im Jahresverlauf widmet.

Mit dem Kältemittel wird Öl abgeschieden.

Dieses muss anschließend vom Kältemittel getrennt werden, wie die Anmerkung 7 zum Bild 17 zeigt. Die Drehung der Kugel sorgt dafür, dass der Abstreifer, der in den Kältemittel-Öl-Film hinein ragt, das Gemisch in den Ölabscheider befördert.

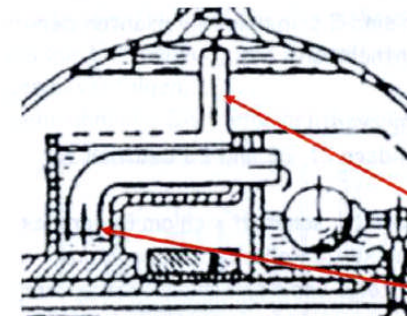


Bild 21: Detail aus Bild 17

Abstreifer
 Ölabscheider

Im Ölabscheider trennen sich durch den Dichteunterschied das Öl vom Kältemittel. Das Öl ist leichter als das Kältemittel, schwimmt auf diesem und läuft über den oberen Rand des Ölabscheiders in die Verflüssigerkugel zurück. Somit ist ein erster Ölkreislauf innerhalb der Verflüssigerkugel gesichert.

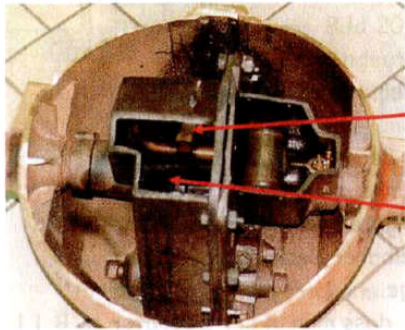


Bild 22: A-S Kältemaschine
Verflüssigerkugel

Abstreifer (Blechkänälchen mit
ca. 20 mm Kantenlänge)

Ölabscheider

3.1.3. Expansionsorgan

Nachdem das flüssige SO_2 von der inneren Wand der Kugel abgestreift wurde, steht es nunmehr zur Expansion und Einspritzung in den Verdampfer zur Verfügung.

Den Darstellungen in der Literatur sind 3 prinzipielle Varianten der Entspannung des Kältemittels zu entnehmen:

a) Entspannung mittels Schwimmerventil.

Der Schwimmerkörper ist in den Bildern 21, 22 und 23 deutlich zu erkennen.

Das flüssige SO_2 ist schwerer als das Öl, sammelt sich am Boden des Ölabscheiders und gelangt über eine kurze Rohrverbindung in das Schwimmerventil. Der Entspannung folgt unmittelbar die innere Rohrleitung in der Hohlwelle, die das Kältemittel in den Verdampfer überströmen lässt.

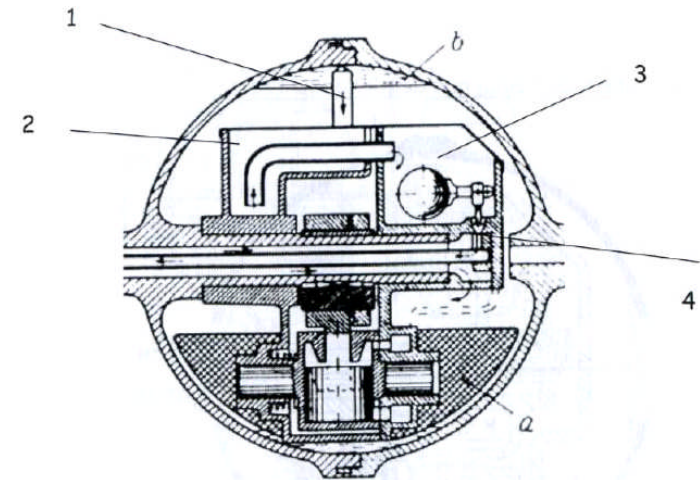


Bild 23: Schnittdrastellung [15]

Im Bild 23 läßt sich der Weg des flüssigen Kältemittel b vom Abstreifer (1), über den Ölabscheider (2) und das Schwimmerventil (3) bis zur Entspannung und Einspritzung in den Verdampfer nach links (4) genau verfolgen.

Sehr ähnliche Darstellungen findet man in [5] und [19]

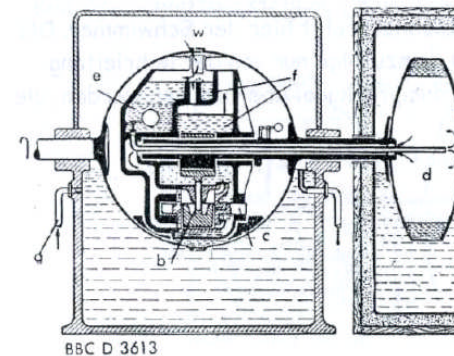


Bild 24: Werkzeichnung von
Brown Boveri [9]

Im Bild 24 ist eine Sonderform der Einspritzung mittels Schwimmer zu sehen. Der Schwimmer ist direkt im Ölabscheider untergebracht.

b) Kapillareinspritzung aus dem Ölabscheider

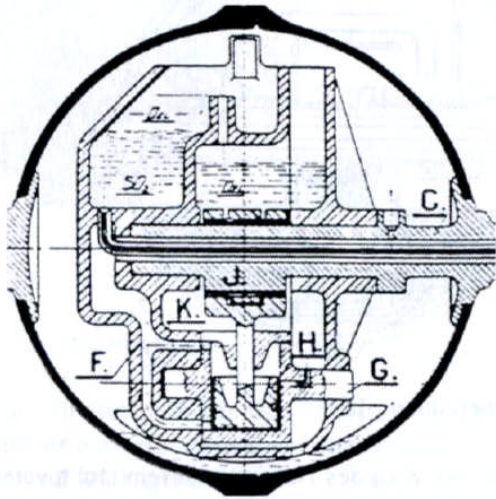


Bild 25: Schnittdarstellung [6]

Wie im Bild 25 deutlich ersichtlich ist, fehlt hier der Schwimmer. Die Funktion der Entspannung kann demzufolge nur von der Rohrleitung zwischen Verflüssiger- und Verdampferkugel übernommen werden, die als Kapillare dient.

Ähnliche Darstellungen findet man in [1], [12] und [13]

c) Kapillareinspritzung aus dem Flüssigkeitsfilm

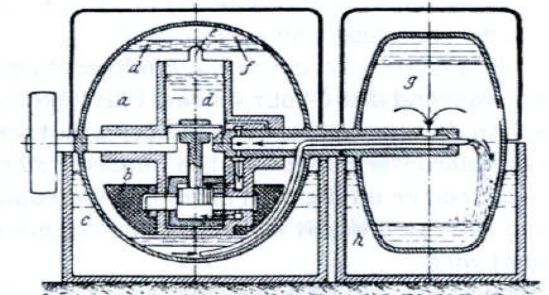


Bild 26: Schnittdarstellung [10]

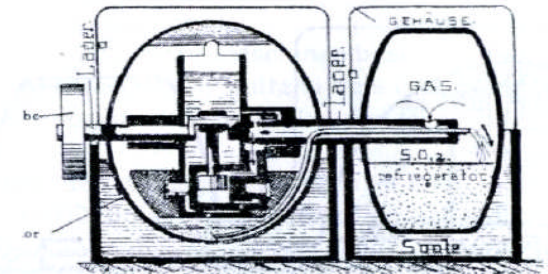


Bild 27: Schnittdarstellung [8]

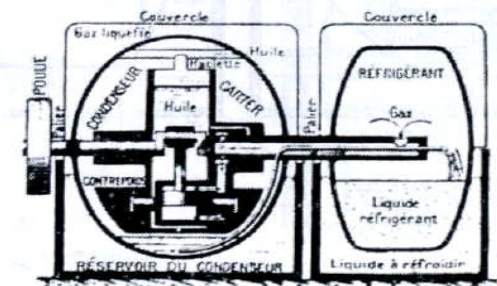


Bild 28: Schnittdarstellung [25]

Auffällig ist das Fehlen des Ölabscheiders und der in den Bildern 26, 27 und 28 identisch größere Abstand des Abstreifers von der inneren Wandung der Verflüssigerkugel.

Die schwerere SO_2 -Flüssigkeit wird durch die Fliehkraft an die Innenwand gedrückt, während das Öl auf diesem Flüssigkeitsfilm "schwimmt". Dort soll in diesem Fall der Abstreifer ansetzen, um möglichst nur Öl in den darunter angeordneten Behälter zu befördern. Im Gegensatz zum Abstreifer ist die sich mitdrehende Kapillare nahe an der Wandung platziert, damit möglichst nur Kältemittel in den Verdampfer entspannt wird.

Abschließend zur Einspritzung sei noch ein Bild angefügt, dem keine der beschriebenen Möglichkeiten zugeordnet werden kann.

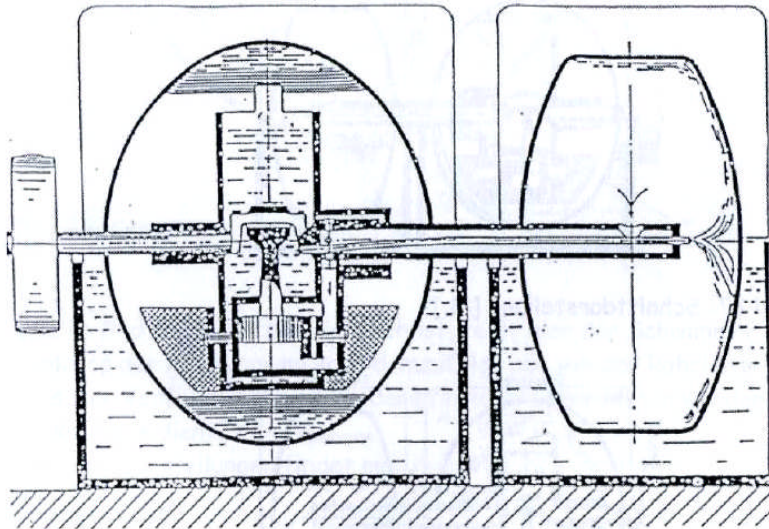


Bild 29: Schnittdarstellung [20]

3.1.4. Verdampfer

Betrachtet man die Schnittdarstellungen in der Literatur, so sind zwei Aspekte beachtenswert:

1. die Tatsache, ob Kältemittelflüssigkeit im Verdampfer vorhanden ist oder nicht,
2. Unterschiede in der Ansaugung der Dämpfe.

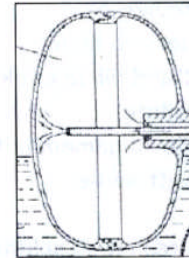


Bild 30: Detail aus Bild 17

Deutlich wird, dass keinerlei Einbauten im Verdampfer zu sehen sind.

Nahezu identisch ist dieses Bild in [5] und [15] zu finden.

Diese Maschinen besitzen jeweils einen Schwimmer für die Entspannung des Kältemittels und die Ansaugung des Kältemitteldampfes ist frontal in das Mantelrohr der Hohlwelle zu sehen.

Diese Form der Ansaugung ist auch im Bild 24 zu erkennen, wobei Kältemittelflüssigkeit im Verdampfer vorhanden ist.

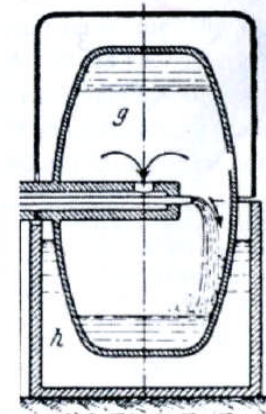


Bild 31: Detail aus Bild 26

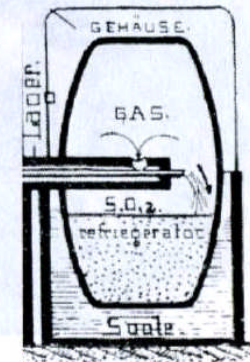


Bild 32: Detail aus Bild 27

Sieht man sich die beiden Bilder 31 und 32 in der Gesamtdarstellung auf Seite 28 an, wird deutlich, dass es sich um die Einspritzvariante mit Kapillare handelt. Die Ansaugung der Dämpfe im Verdampfer ist hier durch eine radiale Bohrung in der Hohlwelle realisiert.

Die Verteilung des dargestellten flüssigen Kältemittels könnte die Vermutung nahe legen, dass sich die Maschine im Bild 27 (bzw. 28) im Stillstand befindet.

Beide zu den Bildern gehörenden Maschinen besitzen keinen Ölabscheider. Es stellt sich damit zwangsläufig die Frage, ob es im Betrieb tatsächlich möglich war, Kältemittelflüssigkeit und Öl so exakt zu trennen, dass kein Öl in den Verdampfer gelangen konnte.

Diese Frage muss sicher verneint werden und die für die Allgemeinheit bestimmten Skizzen in der Literatur sollten u. U. bewusst keine Details zu Einbauten im Verdampfer preisgeben.

Denn schaut man in das Innere des Verdampfers einer realen Maschine, so findet man durchaus sehr speziell ausgebildete Einbauten, die nur dem Zweck der Ölrückführung aus dem Verdampfer in die Verflüssigerkugel gedient haben können.

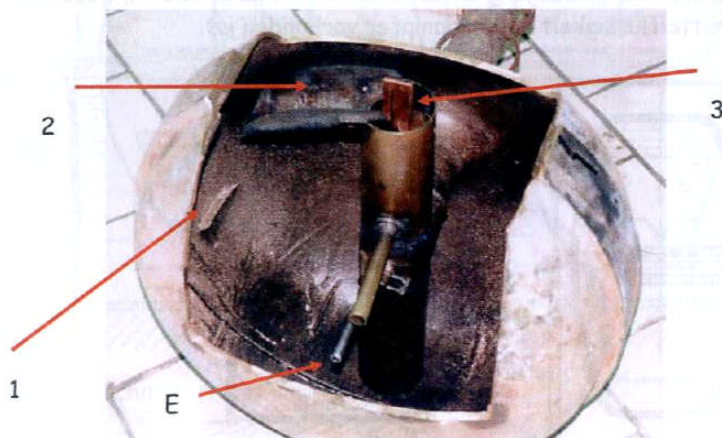


Bild 33: A-S Kältemaschine - Verdampferkugel

Das im Verdampfer befindliche rohrförmige Bauteil ist drehbar auf der Welle gelagert und verbleibt im Betrieb in der senkrechten Lage, wie im Bild 33 zu sehen ist.

Bezüglich des Mechanismus der Ölrückführung lässt sich vermuten:

- 1 Einbauten im inneren Umfang der Verdampferkugel sorgen für den Öltransport nach oben
- 2 Eine "Schöpfkelle" nimmt das Öl auf.
- 3 Das Öl fließt in diesem Rohr nach unten und wird wieder in die Verflüssigerkugel zurück gesaugt.

Als Verlängerung der inneren Rohrleitung in der Hohlwelle ist im Bild 33 die Einspritzung zu sehen (E).

3.2. Kühlwassersparer

Bereits im frühen Stadium der Anwendung der A-S Kältemaschine erkannte man das Problem des hohen Kühlwasserverbrauchs der Anlagen.

Immerhin benötigten die größten Maschinen ca. 1600 Liter/Stunde an Kühlwasser.

Ein Ansatz zur Lösung des Problems bildete der Versuch, zusätzlich zur reinen Wasserkühlung den Verdunstungseffekt zu nutzen. Man montierte über die Verflüssigerkugel einen Ventilator, der Luft über der stets feuchten Kugel absaugte. Angaben zu Luftmengen sind nicht beschrieben, demgegenüber aber in [8], dass durch den sog. "Kühlwassersparer" der Kühlwasserverbrauch von 40 auf 2 Liter/Stunde sinkt, wie Tabelle 7 zu entnehmen ist.

Kühlwasserbedarf in Liter je Stunde:				
a) ohne Kühlwassersparer bei einer Temperaturdifferenz zwischen Einlauf und Auslauf von				
1. 10° max.	200	480	940	1850
min.	80	170	320	620
2. 20° max.	100	240	470	920
min.	40	85	160	310
b) mit Kühlwassersparer	2	5	10	20

Tabelle 7: Ausschnitt aus der Leistungstabelle in [8]

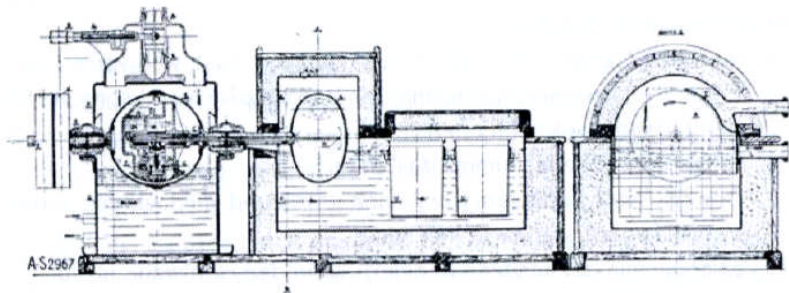


Bild 34: Gesamtdarstellung mit Schnitt [12]

Im Bild 34 ist solch ein Kühlwassersparer links oben zu sehen. Der Antrieb erfolgte über die Welle der Kältemaschine.

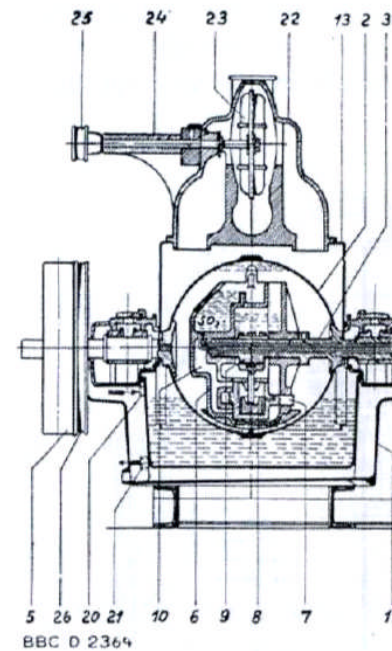


Bild 36: A-S-Maschine mit Kühlwassersparer [13]

- 22 Kühlwassersparergehäuse
- 23 Ventilator
- 24 Welle
- 25 Antriebsscheibe
- 26 Antriebsscheibe für Wassersparer

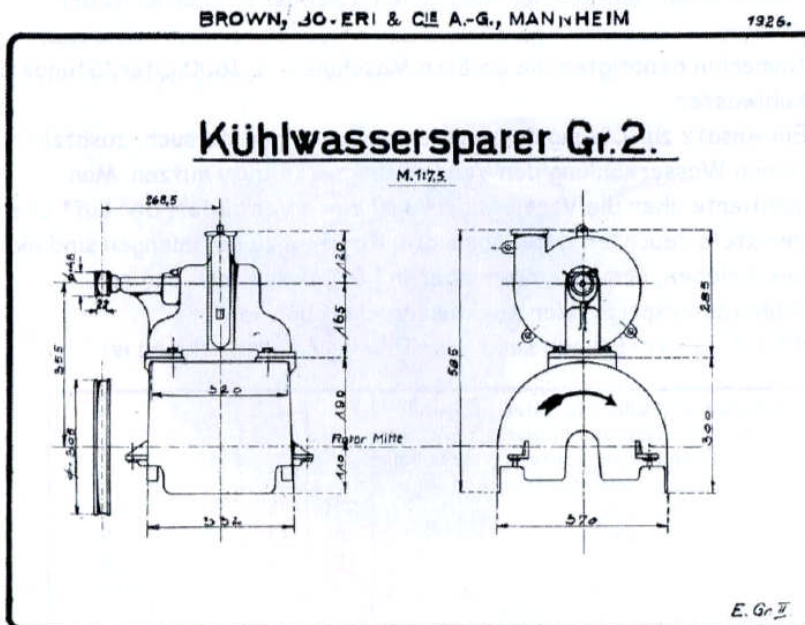


Bild 35: Kühlwassersparer in einer Zeichnung von BBC 1926 [41]

3.3. Kühlwasser- und Solebecken

Die Darstellungen der Kühlwasserbecken unterscheidet sich durch die Höhe des Kühlwasserstandes. Dieser reicht, wie im Bild 24, Bild 28 und in [1] zu sehen, bis kurz unter die Lagerschalen und sorgt damit dafür, dass die Verflüssigerkugel fast zur Hälfte im Kühlwasser umläuft. Im Bild 24 ist wie in [1] ein freier Überlauf erkennbar, der sicher verhindert, dass der Kühlwasserspiegel über die festgelegte Marke ansteigt.

Eine andere Form des Kühlwasserzu- und ablaufes zeigt Bild 34. Es ist kein freier Überlauf vorhanden und die Verflüssigerkugel taucht nur zu ca. 1/3 des Durchmessers in das Kühlwasser. Der Kühlwasserzulauf befindet sich oberhalb des Wasserspiegels.

Im Bild 17 ist nur ein Überlauf erkennbar, der den Wasserspiegel begrenzt.

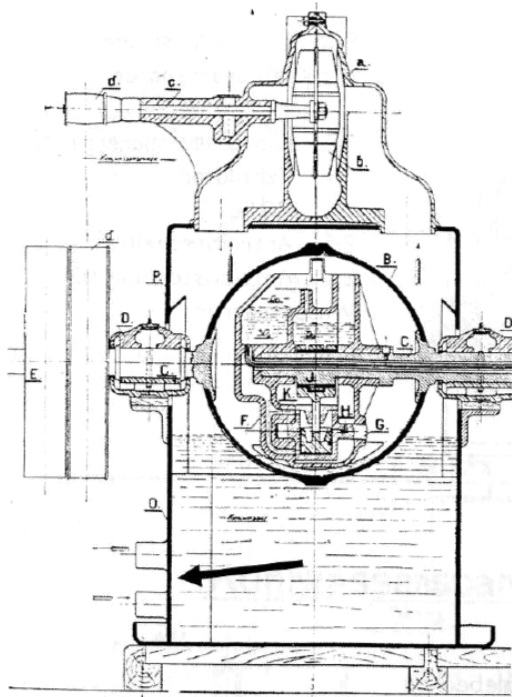


Bild 37: Schnittdarstellung [6]

Kühlwasserzu- und -ablauf befinden sich im Bild 37 unterhalb des Wasserspiegels. Dies deutet auf eine schematische Darstellung hin, wie auch in [12] zu sehen ist.

Das Solebecken diente vordergründig der Flüssigkeitskühlung, wurde jedoch auch gleichzeitig zur Eiszerzeugung genutzt. Es wird auf Bild 34 verwiesen.

Die Versorgung der Kühlstellen mit Sole realisierte man mittels Pumpen. Unter der Bedingung, dass die Kältemaschine oberhalb des Kühlraumes montiert werden konnte, war auch ein Umlauf der Sole mit natürlichem Gefälle üblich. Bild 38 zeigt den grundlegenden Aufbau zur Erzeugung einer Höhendifferenz zwischen Vor- und Rücklauf.

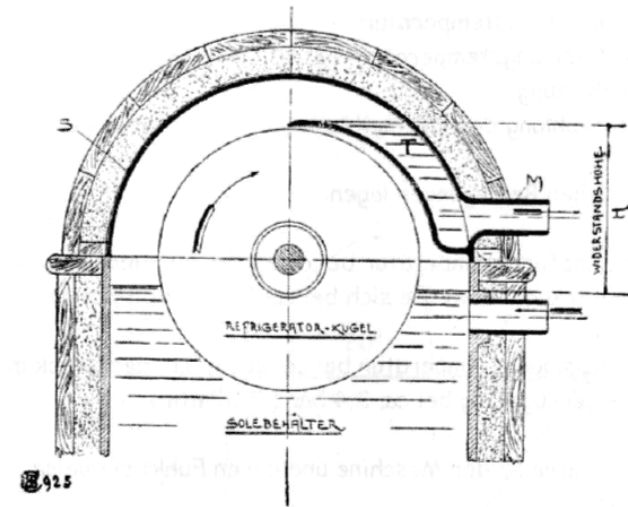


Bild 38: Schema der selbsttätigen Solezirkulation [6]; [8]

Der von der Verdampferkugel mitgerissene Flüssigkeitsfilm wurde "abgeschabt" und stand mit einer Höhendifferenz zwischen Vor- und Rücklauf von mindestens dem Radius der Verdampferkugel zur Verfügung. Die Sole konnte im freien Gefälle in den darunter befindlichen Verdampfer laufen und wie in einem System verbundener Gefäße schloss sich der Kreislauf durch das Überlaufen des Sole aus dem Rücklauf in den Solebehälter der Kältemaschine.

4. Betrieb der Maschine

4.1. Prozessbedingungen

Verschiedene Temperaturen, die den Betrieb der Maschine charakterisieren, sind bereits auf Seite 13 beschrieben.

Um den Prozess eindeutig festlegen zu können, müssen Angaben bekannt sein über:

- die Verdampfungstemperatur
- die Verflüssigungstemperatur
- die Überhitzung
- die Unterkühlung des Kältemittels.

Unter den üblichen Bedingungen lagen:

- die Verdampfungstemperatur bei ca. -10°C , d.h. der Druck in der Verdampferkugel bewegte sich bei ca. 1 bar (1,034 atm);
- die Verflüssigungstemperatur bei ca. 20°C , d.h. der Druck in der Verflüssigerkugel lag bei ca. 3,4 bar (3,37 atm).

Die kompakte Bauweise der Maschine und deren Funktionsweise bedingten, dass:

- die Überhitzung des Kältemittels auf dem Weg vom Verdampfer zum Verdichter vernachlässigbar klein blieb,
- eine Unterkühlung des Kältemittels nach dem Verflüssigen an der inneren Wandung der Verflüssigerkugel nicht möglich war, da keine Trennung zwischen der flüssigen und der dampfförmigen Phase stattfinden konnte.

Somit lässt sich die Lage der Punkte 1 und 3 im Diagramm eindeutig festlegen, obwohl klar ist, dass Grenzkurvenzustände niemals stabil sind.

Berücksichtigt man die Angaben auf Seite 17 zum Liefergrad, so kann $\lambda \approx 0,5$ entsprechend der Größe der Maschine gewählt werden. Seite 13 liefert Anhaltswerte zur Verdichtungsendtemperatur, wobei bei den oben beschriebenen Prozessbedingungen $t_2 \approx 95^{\circ}\text{C}$ zu erwarten ist.

Somit wird der indizierte Wirkungsgrad mit den Werten der Tabelle 8:

$$\eta_i = (h_{2is} - h_1) / (h_2 - h_1) = 0,69 \approx 0,7 \text{ und}$$

$$h_2 = h_1 + (h_{2is} - h_1) / \eta_i = 863 \text{ kJ/kg}$$

4.2. Kreisprozess im $\lg p, h$ -Diagramm

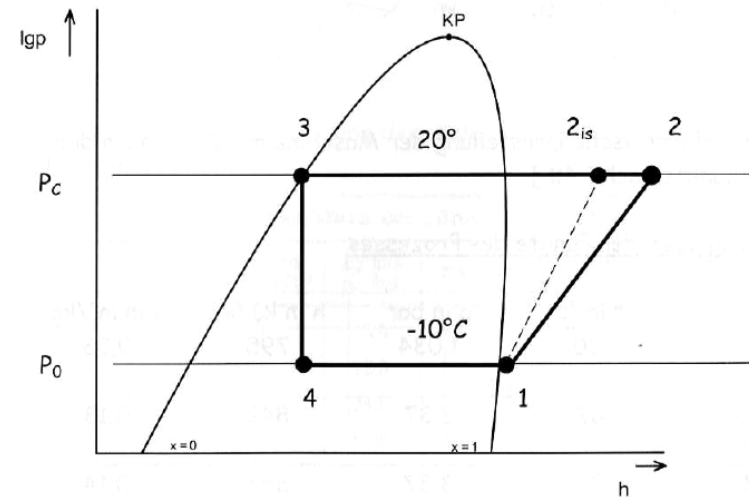


Bild 39: Darstellung der Eckpunkte des Prozesses im $\lg p, h$ -Diagramm

Im Bild 40 wird der Versuch unternommen, die Prozesspunkte einem Punkt in der Maschine zuzuordnen.

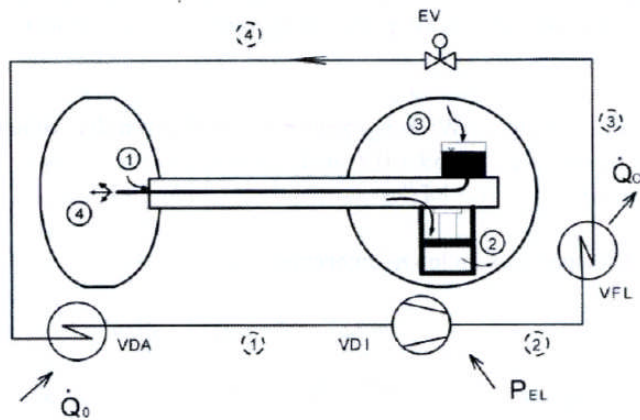


Bild 40: Schematische Darstellung der Maschine mit Zuordnung der Prozesspunkte nach [48]

Zustandsgrößen der Punkte des Prozesses

Punkt	t in °C	p in bar	h in kJ/kg	v in m ³ /kg
1	-10	1,034	795	0,33
2is	67	3,37	842	0,13
2	95	3,37	863	0,14
3	20	3,37	446	0,72*10 ⁻³
4	-10	1,034	446	0,034

Tabelle 8: Zustandsgrößen der Prozesspunkte, bestimmt mit der Dampftafel und dem lgp,h-Diagramm von SO₂ in [10], umgerechnet in heute übliche Einheiten

4.3. Leistungsdaten

Die Leistungsdaten der Maschine sind in [1]; [4]; [5]; [7] und [8] dokumentiert.

Zusammenfassend gibt Tabelle 9 zunächst einen Überblick.

Ausführung	6 (7) Baugrößen
Kälteleistung	440 bis 12000 kcal/h (ca. 0,5 bis 14 kW)
Wasserverbrauch	ca. 100 bis 1600 l/h
Drehzahl	380 bis 140 U/min
Motor	0,75 bis 10 PS
Eisproduktion	5 bis 50 kg/h
Masse	ca. 140 bis 1150 kg

Tabelle 9: Zusammenfassung der in der Literatur dokumentierten Leistungsdaten

A-S Kältemaschinen der „Brown, Boveri & Cie., A.-G.“						
Nr.	Cal. pro Std. bei -10° +20°	kg Eis p. Std.	PS	n pro min.	Gewicht Rot.Teil kg	Kühlwas. l/Std.+10°
2	440	5,0	0,6	380	140	80—200
3	1100	12,5	1,3	280	300	170—480
4	2200	25,0	2,0	190	680	320—940
6	4400	50,0	3,0	140	1150	620—1850

Tabelle 10: Leistungsdaten [1]

Leistung, kcal/h bei -5° Soletemperatur, 10° Kühlwasserzulauftemperatur, gemessen in der Sole	Kraftverbrauch, P _{Se} einschl. selbsttätigen Soleförderer	Kühlwasserbedarf, m ³ /h
900	0,65	0,13
2300	1,8	0,38
6000	4	0,9
9500	5,5	1,35

Tabelle 11: Leistungsdaten [7]

Leistungstabelle der AS-Kühlmaschine. AS-Rotsilber-Kühlautomat						
Type	Verflüssigerkühlung	Leistung kcal/h -5°C Sole	Eisleistung kg/24h	Stromverbrauch kW/h $t_{we} = +15^\circ\text{C}$	Wasserverbrauch l/h	n min
AS 2	Wasser	580	125	0,40	100	380
AS 2A		835	180	0,49	130	380
AS 3		1620	335	0,94	260	280
AS 3A		2250	540	1,35	360	280
AS 6B		6250	1400	3,60	980	170
AS 6A		9000	2200	3,90	1350	140

Tabelle 12: Leistungsdaten [4]

Leistungstabelle						
Type	Kältemittel	Kondensator-kühlung	Leistung kcal/h $t_o = -10^\circ\text{C}$	Stromverbrauch KW h $t_{we} = -15^\circ\text{C}$ $t_{le} = -25^\circ\text{C}$	Antriebsmotor PS	Wasserverbrauch l/h
Haubold-Rotoren						
G 5	Schwefligsäure	Luft	550	0,51	3/4	—
G 10			1050	0,91	1	—
G 20			2200	1,56	2	—
G 40			3500	2,40	3	—
G 5	Schwefligsäure	Wasser	550	0,44	3/4	90
G 10			1050	0,77	1	175
G 20			2200	1,33	2	350
G 40			3500	2,05	3	550
G 60			5700	3,05	4,5	850
G 80			7900	3,90	6,0	1150
G 135			12000	6,0	10,0	1650

Tabelle 13: Leistungsdaten [5]

	Kältemaschine Nr.			
	2	3	4	6
Temperatur des Kühlwassers im Kondensatorbehälter °C	20	20	20	20
Eiserzeugung je Stunde aus Wasser von 15° C ca. kg	5	12,5	25	50
Kälteerzeugung in Kalorien je Stunde bei einer Temperatur im Refrigerator von:				
a) +30°	1680	4200	8400	16800
b) +20°	1290	3225	6450	12900
c) +10°	960	2400	4800	9600
d) ± 0°	700	1750	3500	7000
e) -2,5°	600	1500	3000	6000
f) -5°	560	1400	2800	5600
g) -10°	440	1100	2200	4400
Kraftbedarf in PS der Kältemaschine:				
a) ohne Kühlwassersparer	0,6	1,3	2,0	3,0
b) mit Kühlwassersparer	0,8	1,6	2,4	3,5
Kühlwasserbedarf in Liter je Stunde:				
a) ohne Kühlwassersparer bei einer Temperaturdifferenz zwischen Einlauf und Auslauf von				
1. 10° max.	200	480	940	1850
min.	80	170	320	620
2. 20° max.	100	240	470	920
min.	40	85	160	310
b) mit Kühlwassersparer	2	5	10	20
Drehzahl der Maschine je Minute	380	280	190	140
Riemenscheibe:				
a) Durchmesser mm	305	600	1000	1000
b) Breite mm	55	70	80	100
c) Bohrung mm	33	50	65	80

Tabelle 14: Leistungsdaten [8]

4.3.1. Kälteleistung

Wie aus Tabelle 9 ersichtlich, bewegt sich die Kälteleistung der Maschinen im Bereich zwischen ca. 500 W und 14 kW bei Wasserkühlung. Bei der luftgekühlten Variante lag die Kälteleistung zwischen 600 W und 4 kW. Diese Maschinen, auch als Haubold-Rotoren bekannt, siehe Tabelle 13, wurden nicht nur von der Firma Haubold in Chemnitz, sondern auch von BBC in Mannheim gebaut, wie die Bilder 42 und 55 belegen.

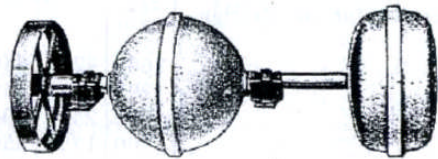


Abb. 37
„HAUBOLD“-Rotor, wassergekühlt

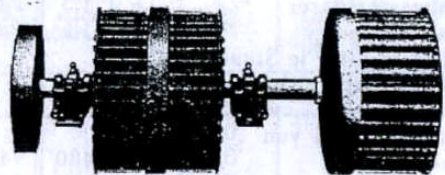


Abb. 38
„HAUBOLD“-Rotor, luftgekühlt

Bild 41: Darstellung der beiden Haubold-Rotoren [5]

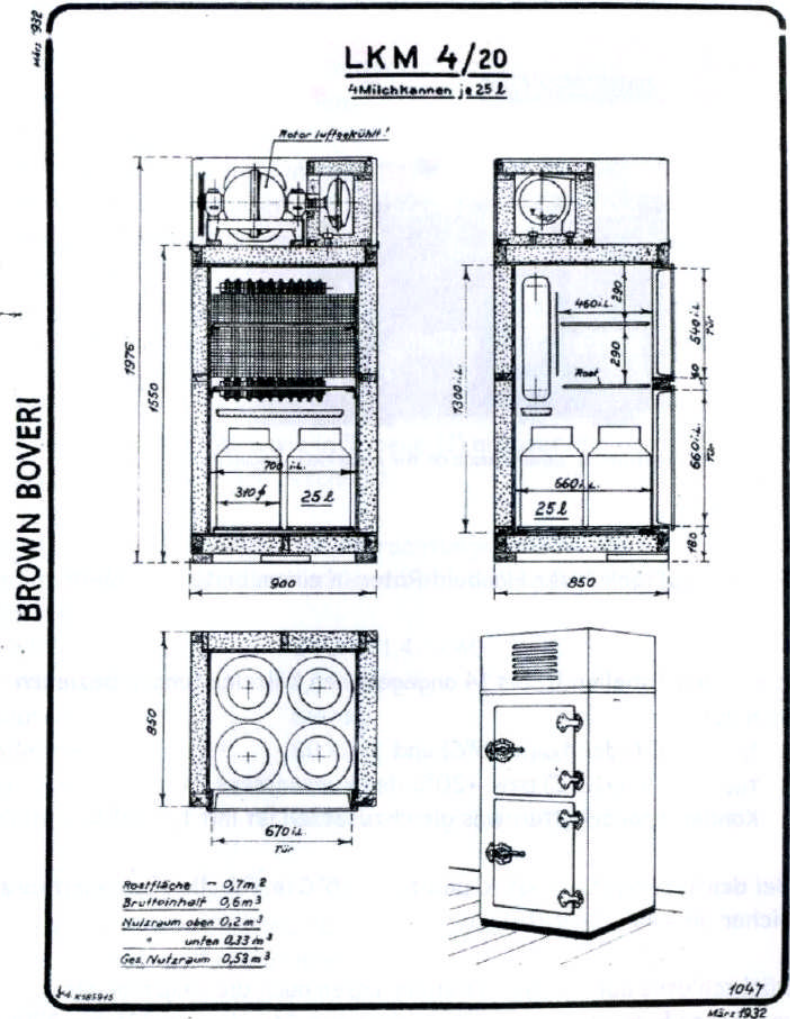
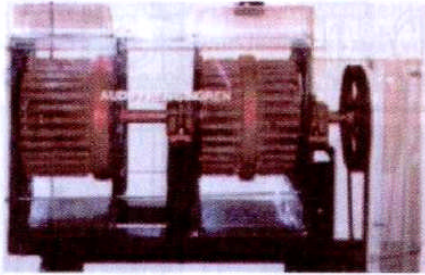


Bild 42: Milchkühlschrank mit luftgekühlter A-S Maschine [44]



HISTORICAL SIGNIFICANCE OF THE AUDIFFREN-SINGREN

Bild 43: Luftgekühlter Haubold-Rotor in einem britischen Museum [22]

Die in den Tabellen 10 bis 14 angegebenen Kälteleistungen beziehen sich auf:

- $t_0 = -10^\circ\text{C}$ (oder $t_{\text{sole}} = -5^\circ\text{C}$) und
- $t_{\text{We}} = +15^\circ\text{C}$ ($+10^\circ\text{C}$) bzw. $+20^\circ\text{C}$ des Kühlwassers im Kondensatorbehälter, was gleichzusetzen ist mit $t_c = 20^\circ\text{C}$.

Bei den Werten $t_{\text{We}} = -15^\circ\text{C}$ und $t_{\text{Le}} = -25^\circ\text{C}$ in Tabelle 13 handelt es sich sicher um einen Druckfehler.

Rückschlüsse auf die Kälteleistung lassen auch die Angaben der möglichen Eiszeugung von 5 bis 50 kg je Stunde bzw. 125 bis 2200 kg je 24 Stunden zu.

4.3.2. Antriebsleistung

Die Leistungstabellen liefern Daten zur benötigten Antriebsleistung der Maschinen mit den Angaben:

- Kraftbedarf bzw.
 - Antriebsmotor, jeweils in PS,
- so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Leistung auf dem Typenschild, also die abgegebene Leistung des Motors gemeint ist. Zum anderen werden Zahlenwerte zum Stromverbrauch in kWh genannt, die alle Verbräuche und Verluste beinhalten müssten. Ein Vergleich der unten stehenden Zahlenwerte ergibt, dass ein Verbrauch von 1,33 kWh bei einem Motor mit 1,47 kW abgegebener Leistung nicht richtig sein kann. Es könnte nur sinnvoll sein, den Wert in kWh/h (nicht in kW/h wie in Tabelle 11) anzusetzen, was für die folgenden Betrachtungen geschieht.

Nehmen wir zu vergleichenden Betrachtungen die Maschine Nr. 4 aus Tabelle 10 und 14, die identisch scheint mit Type G20 aus Tabelle 13.

Technische Daten:

- Antriebsmotor	2 PS (= 1,47 kW)
- Stromverbrauch	1,33 kWh/h
- Masse	680 kg
- Wellendurchmesser	80 mm (angenommen)
- Drehzahl	190 1/min.
- Kälteleistung	2200 kcal/h (= 2,56 kW) bei $-10/+20^\circ\text{C}$

Über den Ansatz $\dot{Q}_0 = \dot{m} (h_1 - h_4)$ lässt sich mit den Werten der Tabelle 8 der erforderliche Kältemittelmassenstrom $\dot{m} = 7,34 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$ berechnen.

Die indizierte Leistung wird $P_i = \dot{m} (h_2 - h_3) = 0,499 \approx 0,5 \text{ kW}$.

A-S Kühlautomat Gr.4.

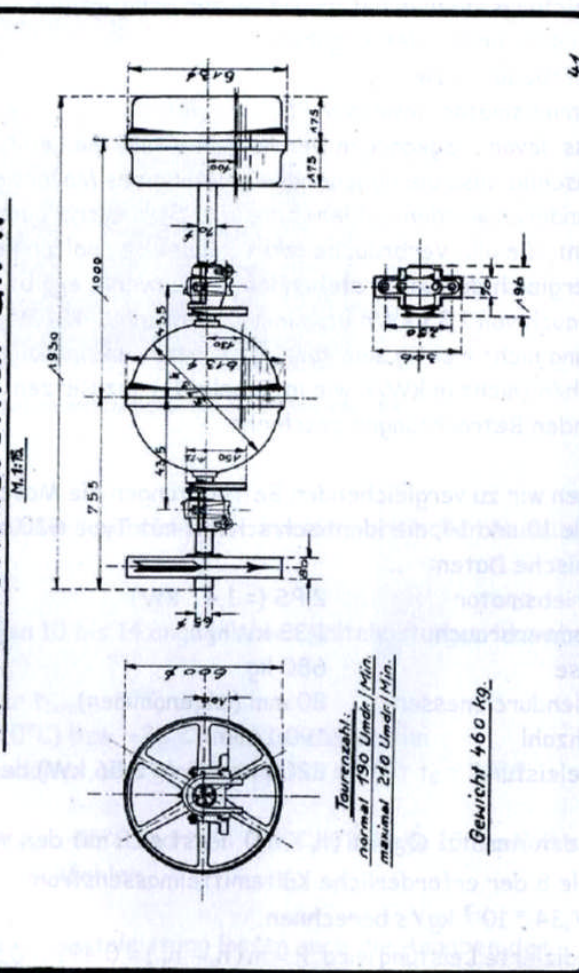


Bild 44: Datenblatt A-S Größe Nr. 4 [49]

Einen großen Teil der Antriebsleistung beansprucht naturgem a  die Reibung der beiden Gleitlager. Legt man die Werte von Seite 46:

- Masse der Maschine 680 kg,
- Wellendurchmesser 80 mm,
- Drehzahl 190 1/min zugrunde und sch tzt den Reibungsfaktor aufgrund praktischer Erfahrungswerte mit $\mu = 0,1$, so wird die Leistung, die zur Überwindung der Gleitreibung an den Lagern aufzubringen ist $P_R = 0,53 \text{ kW}$, wie die folgende Rechnung zeigt.

$$P_R = \frac{\mu \cdot m \cdot g \cdot r \cdot n}{95,55 \cdot 10^5} = \frac{0,1 \cdot 680 \cdot 9,81 \cdot 40 \cdot 190}{95,55 \cdot 10^5} = 0,53 \text{ kW}$$

Als erste Summe, ohne Reibungsverluste im Inneren der Maschine, ergibt sich

$$P^* = P_i + P_R = 1,03 \text{ kW.}$$

Legt man weiter zugrunde, dass der Stromverbrauch gemessen wurde und somit alle Verluste enthält (= 100%), so verbleiben 0,3 kW für die:

- Reibungsverluste in der Maschine,
 -  bertragungsverluste des Riementriebes,
 - Verluste im Motor,
- zusammen ca. 25% der Leistung.

Aus der Demontage einer Maschine ist bekannt, dass alle Teile im Inneren der Kondensatorkugel gut geschmiert sind. Die Kugel ist hermetisch verschlossen, so dass ein Alterungsprozess des  les nicht zu vermuten ist. Eine gute Wartung der Maschinen vorausgesetzt, sind nur geringe Übertragungsverluste durch den Riemenantrieb zu erwarten.

Rechnet man 0,15 kW (50%) der Verluste dem Motor zu, so ergibt sich $P_e = 1,18 \text{ kW}$ und eine Überdimensionierung der Motorleistung (1,47 kW) von ca. 20%, was noch einen normalen Motorwirkungsgrad erwarten lässt.

Es wird für künftige Berechnungen demzufolge davon ausgegangen, dass die Klemmenleistung $P_{kl} = 1,33 \text{ kW}$ beträgt.

4.3.3 Verflüssigerleistung

Die Verflüssigerleistung der Maschine Nr. 4 wird berechnet über:

$$\dot{Q}_c = \dot{Q}_o + P_{kl} = 2,56 + 1,33 = 3,89 \approx 3,9 \text{ kW.}$$

Mit $\Delta t_w = 10 \text{ K}$ wie in Tabelle 14 bestimmt sich der

Kühlwasservolumenstrom zu $\dot{V}_w = 0,093 \text{ l/s}$ oder 335 l/h .

Dieser Wert korrespondiert gut mit den Zahlen aus den Tabellen 13 bzw. 14 von 350 und 320 l/h Wasserverbrauch.

4.4. Steuerung und Regelung

Die folgenden Überlegungen beziehen sich auf die wassergekühlte Ausführung der Maschinen, lassen sich jedoch prinzipiell auf die luftgekühlte Variante übertragen.

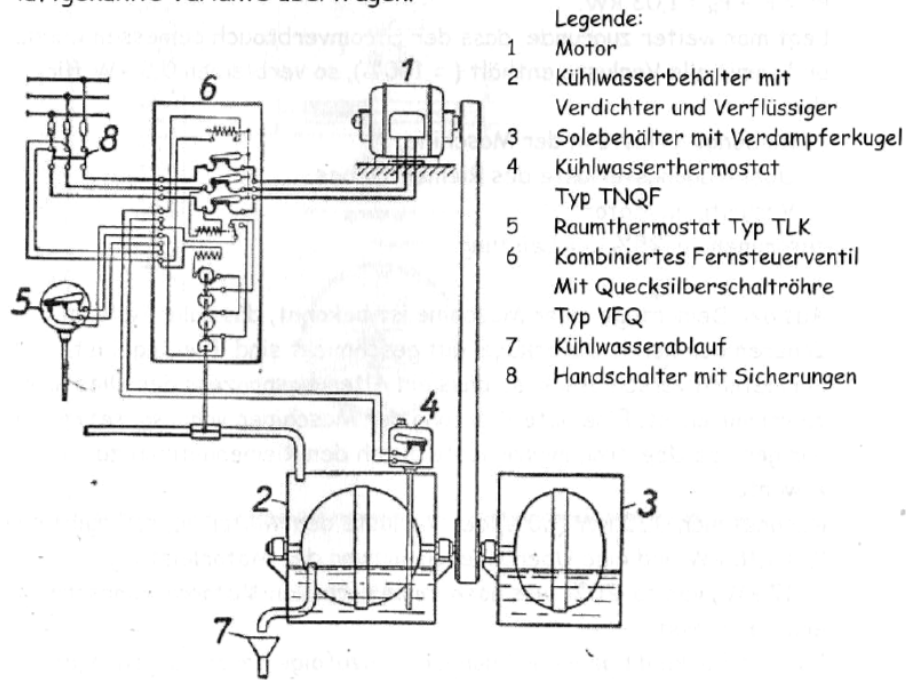


Bild 45: Steuerung einer AS-Kältemaschine zur Raumkühlung [9]

Die Wirkungsweise erklärt sich nach [9] wie folgt:

Raumthermostat 5 steuert Ventil 6

- $t_R > t_{Soll}$: 5 öffnet Kühlwasserventil über 6, Motor ein
- $t_R = t_{Soll}$: 5 schließt Kühlwasserventil über 6, Motor aus
- $t_{We} > t_{W,Soll}$: 4 schaltet Motor aus, Kühlwasserventil bleibt offen

Neben durchaus üblichen Thermostaten ist das Ventil 6 ein bemerkenswertes Bauteil in seiner Komplexität. Hervorzuheben ist in der Darstellung oben noch der Antrieb in der Mitte zwischen den beiden Kugeln.

Eine weitere schematische Darstellung der Steuerung findet sich in [33].

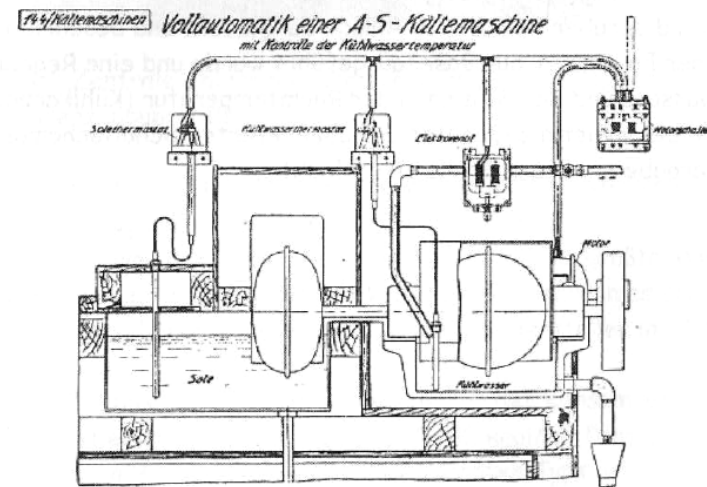


Abb. 47

Bild 46: Steuerung einer AS- Kältemaschine [33]