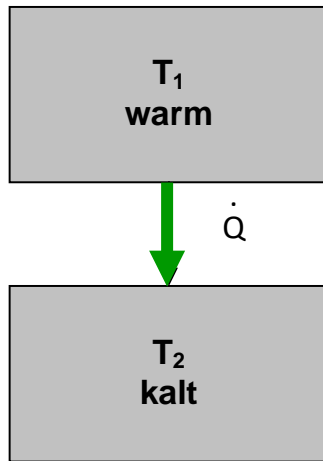
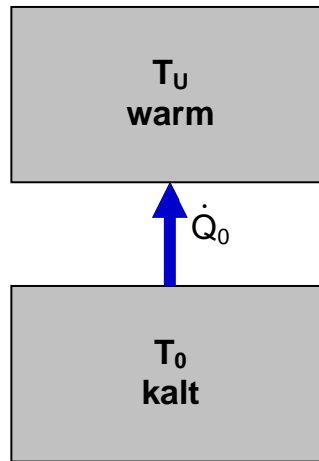


Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



natürlich ablaufender Prozess
(Temperaturausgleich)



Kältemaschine



Kältetechnik:
Kälteprozess
mit nötiger Energiezufuhr



Eis-Ernte im Winter / Auslieferung / „Kühlschrank“



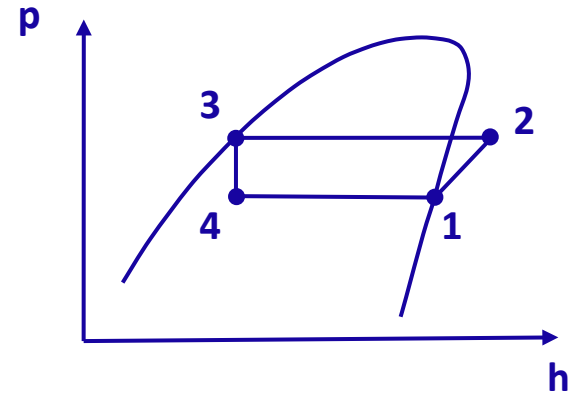
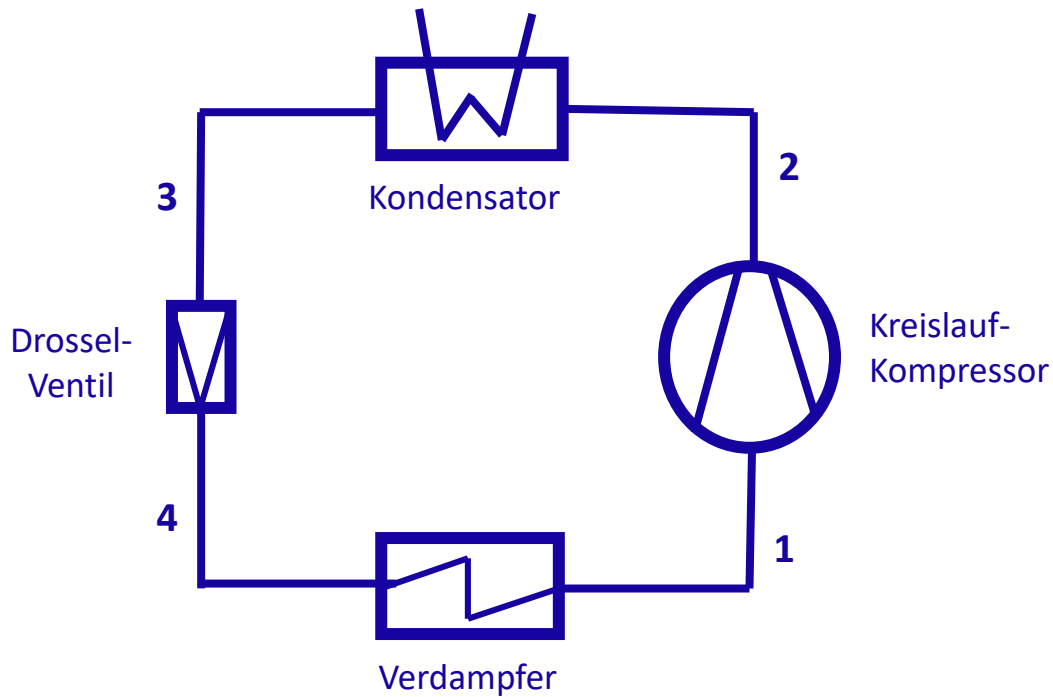
USA (1922)
NH₃ - Kühlschrank
Preis: \$ 714



zum Vergleich:
Pkw (Ford Model T): \$ 450
Durchschnittsgehalt: \$ 2000 / Jahr

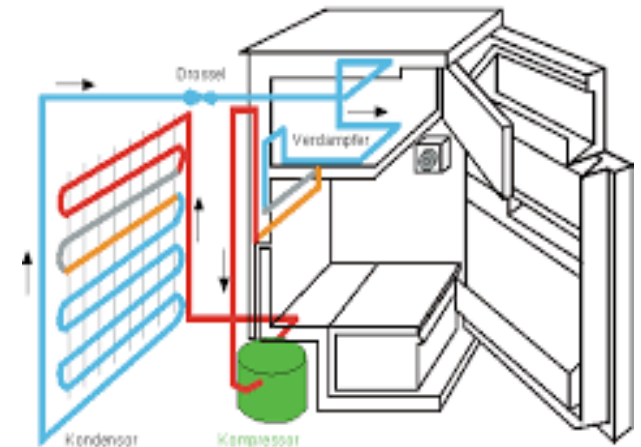
Einführung Europa:
→ erst ab 50er Jahre
(u.a. DKV Scharfenstein, nahe Dresden)

Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



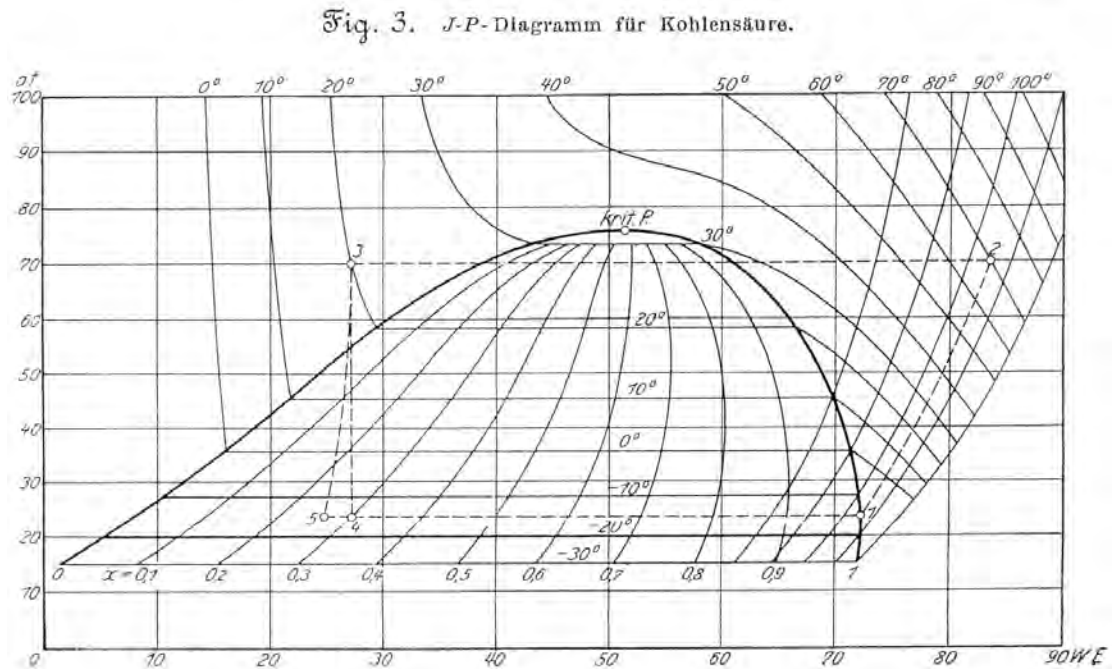
Kaltdampfprozess (Bsp. Haushaltskühlschrank)
Kältemittel mit Kondensation und Verdampfung
nahe Umgebungstemperatur

R11, R600a, R134a, CO_2 , NH_3 , ...



Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung

p, h - Diagramm

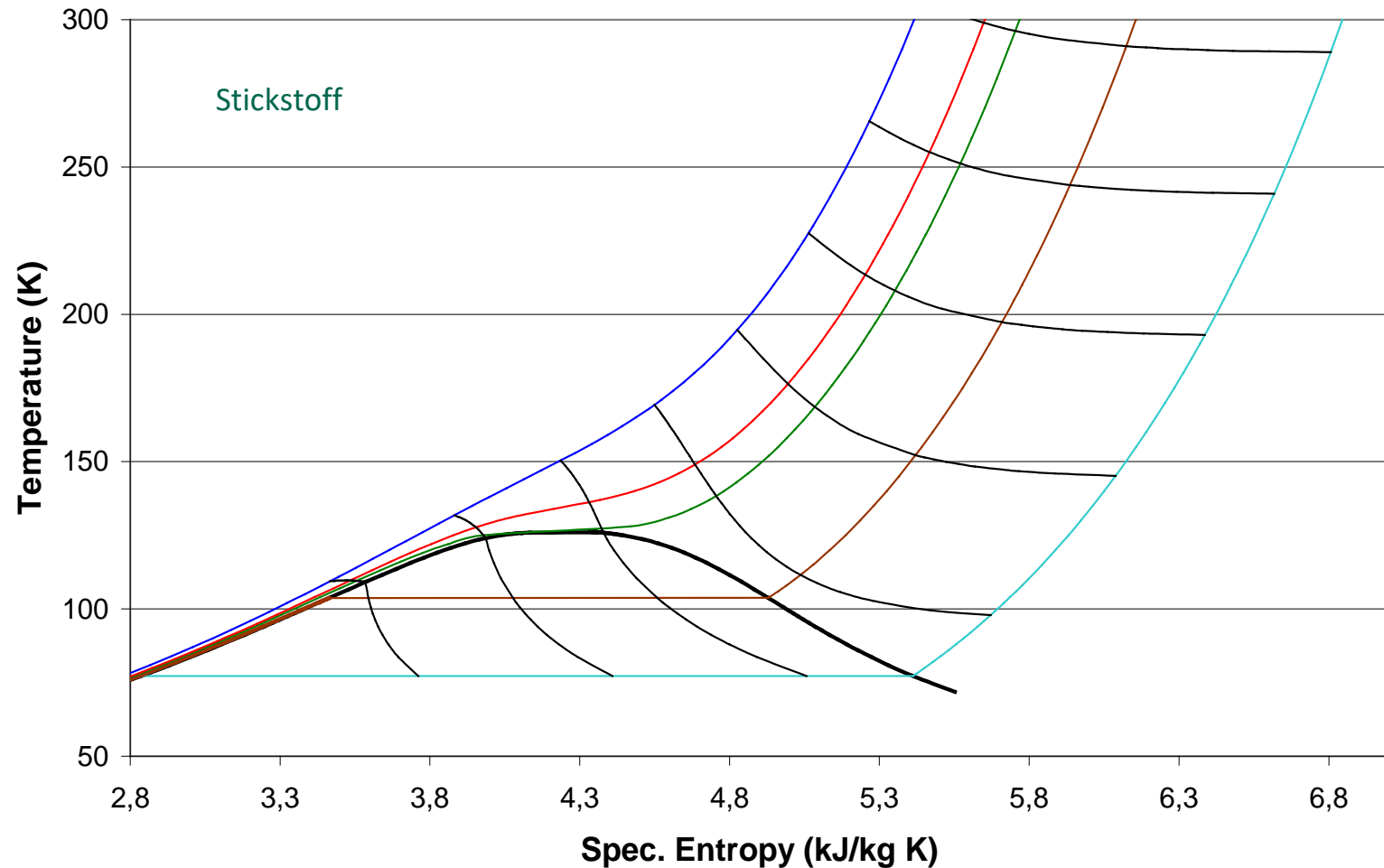


Richard Mollier, Professor für Thermodynamik in Dresden

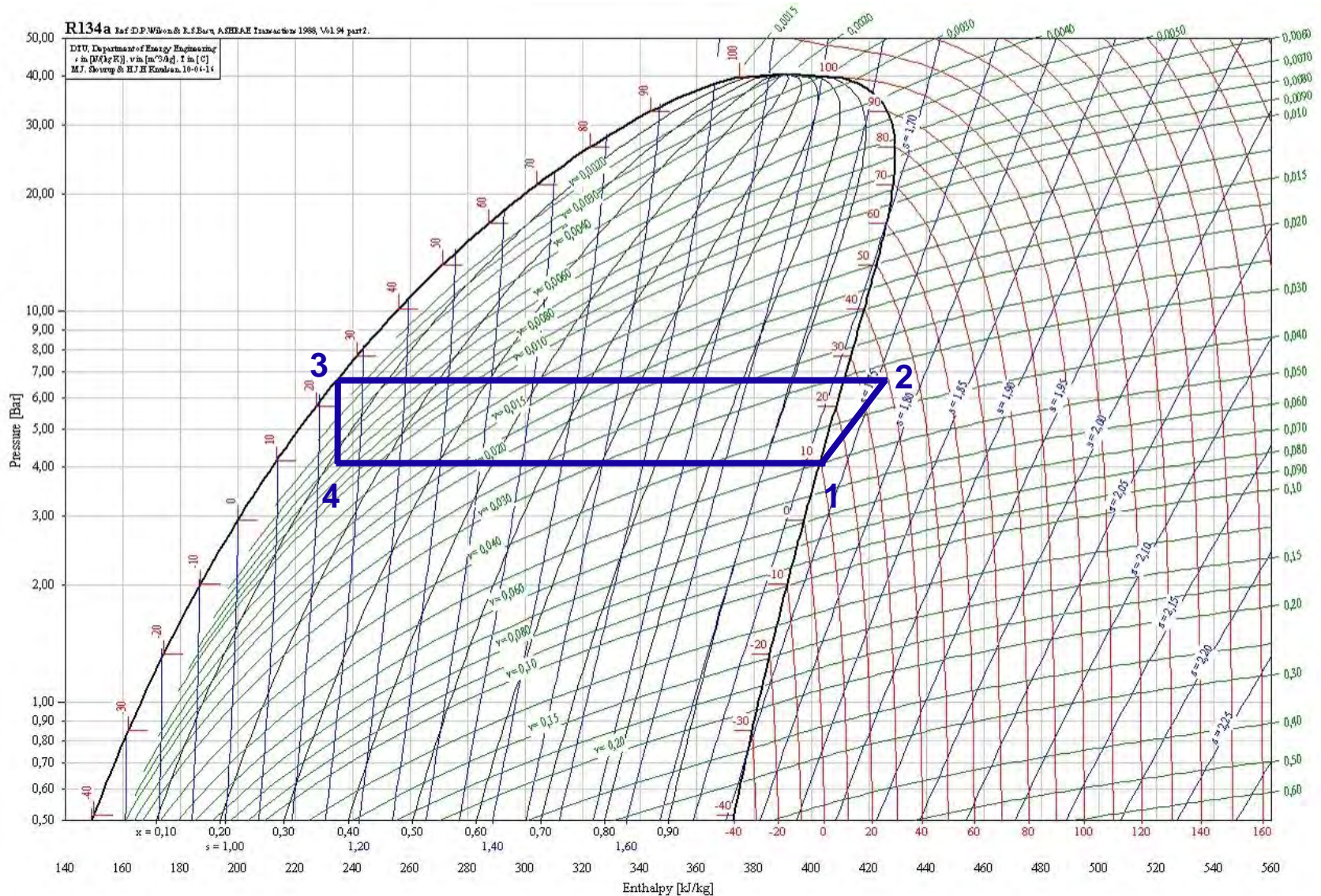
1904 erstmals p, h – Diagramm vorgeschlagen (am Beispiel CO₂)

T, s - Diagramm

mit Isobaren, Isenthalpen und Zweiphasengebiet eingezeichnet



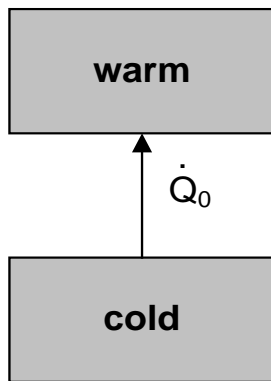
Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



CoolPack www.et.web.mek.dtu.dk/coolpack

Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung

zusätzlich: $\Delta T \approx 2 \dots 5 \text{ K}$
nötig für Wärmestrom!



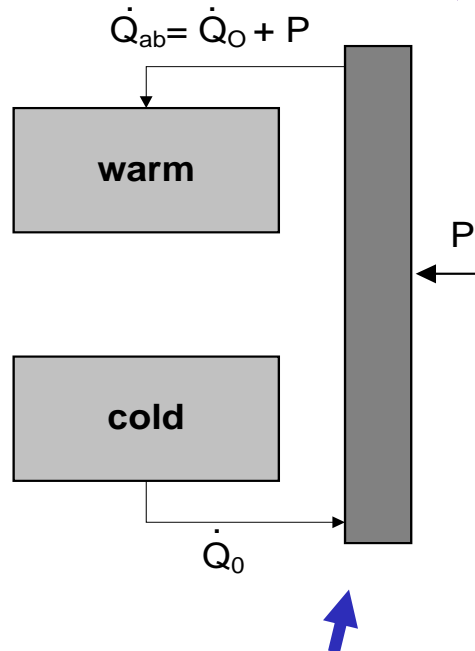
Anforderungen:

- Entropieaufnahme / Abgabe
- Transport (ohne weitere Entropieproduktion!)
- große Entropie-Breite ΔS

Ablauf: a) kontinuierlich (Kreislauf)
b) Batch – Prozess, einmalig

Mögliche physikalische Effekte:

- Gas-Kompression / -Expansion
- gasf./fl. (Verdampfung / Kondensation)
- Sublimation / Desublimation (CO_2)
- thermoelektrisch (Peltier-Effekt)
- magnetokalorisch (Gd, ...)
- thermoakustisch
- optisch (Anti-Stokes)
- ...

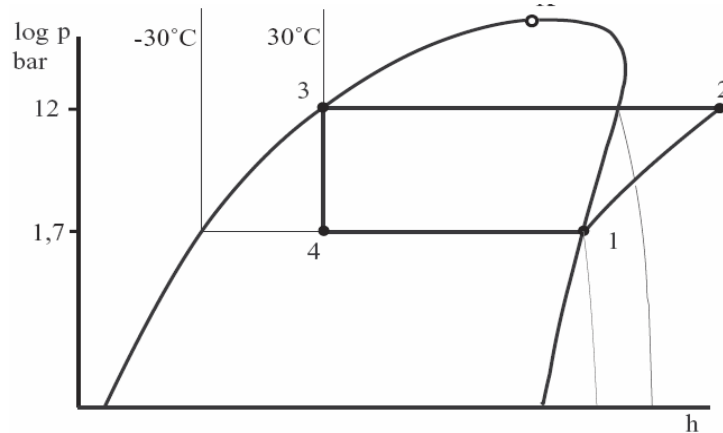


Nicht erlaubt
wg. 2. Hauptsatz
der Wärmelehre
(obwohl
Energieerhaltung
gewahrt)

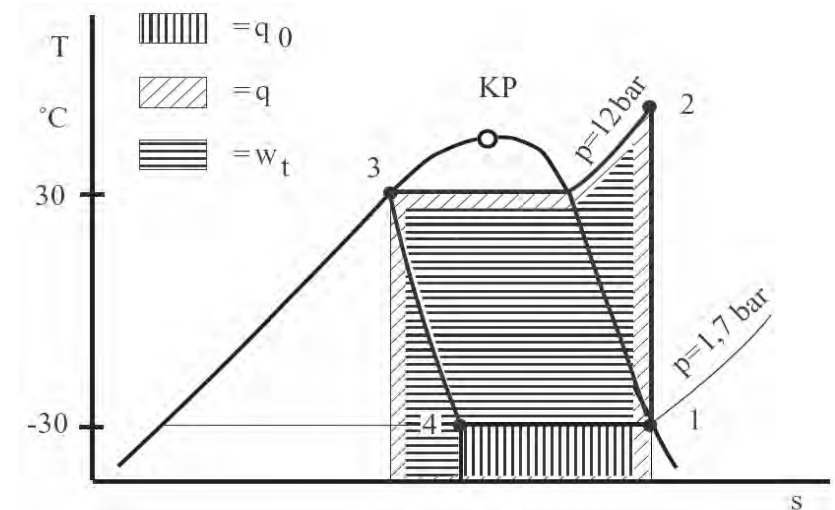
irgendwie geartete
Kältemaschine

- Kältemittel
- Wärmetransport

Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



log p, h - Diagramm



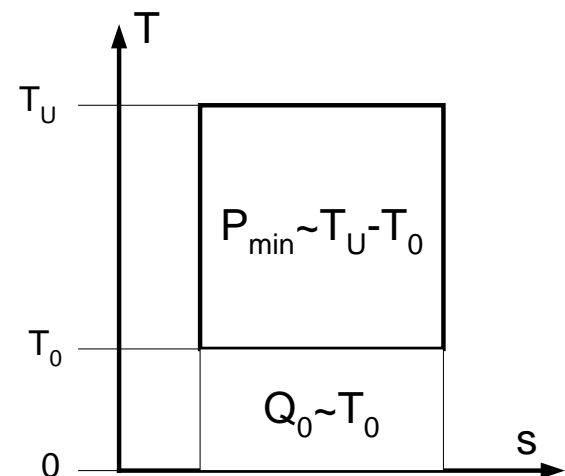
T, s - Diagramm

Kryotechnik:

Startpunkt (Kompression bei Umgebungstemperatur)

weit entfernt oberhalb des kritischen Punktes!

Aufwand / Nutzen direkt grafisch ablesbar \Rightarrow



Kryogene Kälteerzeugung

Abkühlung eines Gases durch Drosselung:

Joule - Thomson – Verfahren

(Linde – Verfahren) ← Luftverfl. durch C.v.Linde 1895

reales Gas an Drosselstelle entspannt:

isenthalpe Zustandsänderung

$$\Delta h = 0$$

$$\delta W = 0$$

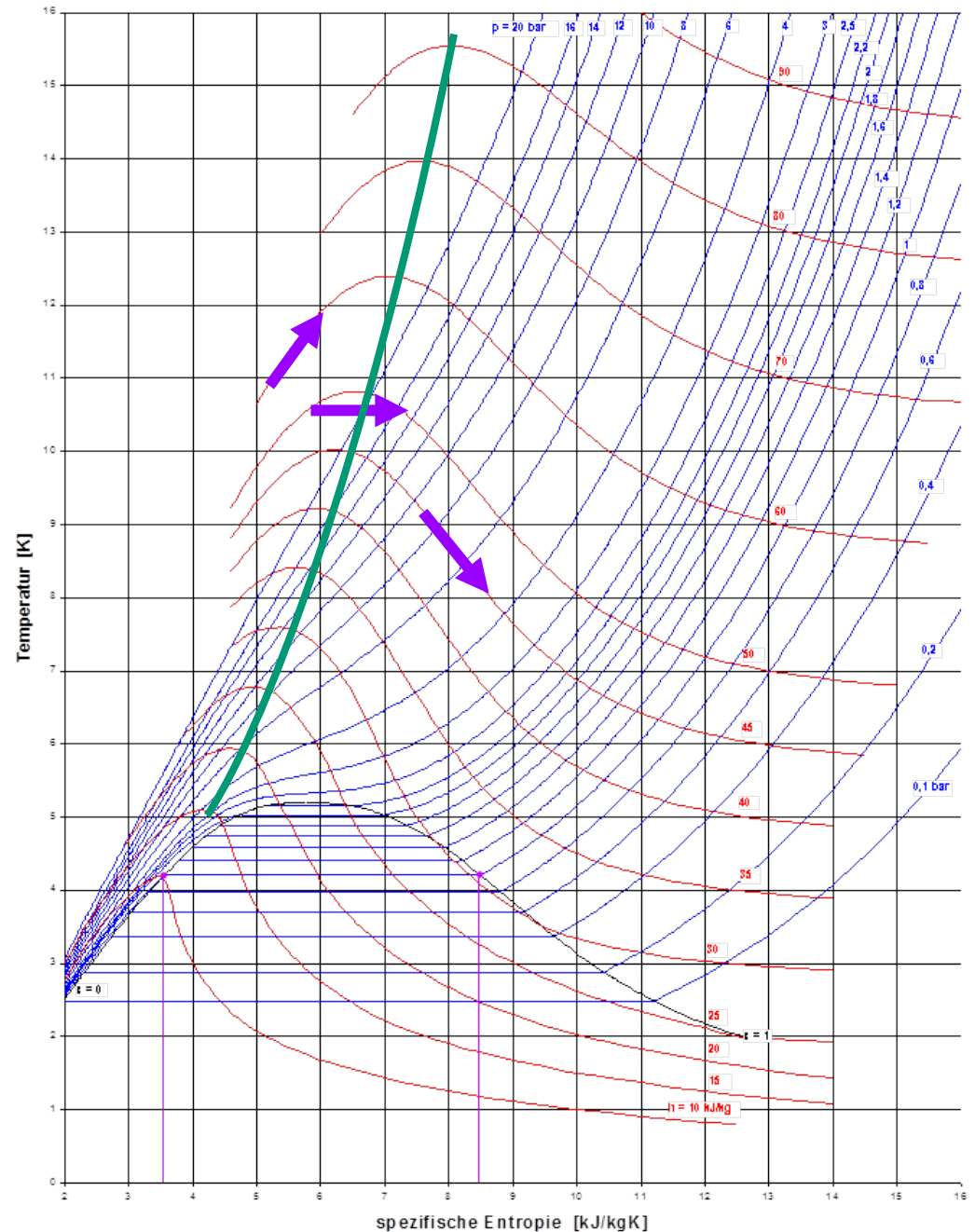
$$\delta Q = 0$$

adiabat

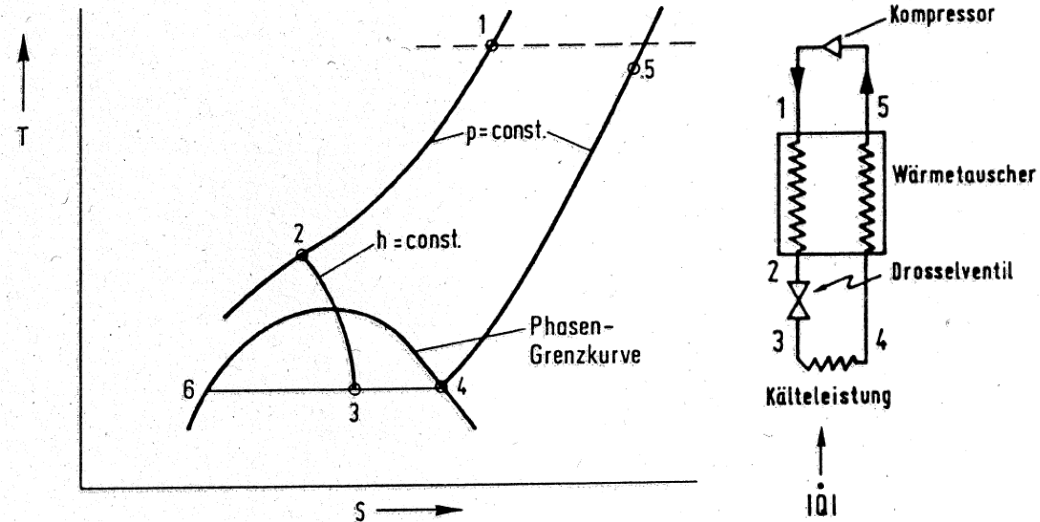
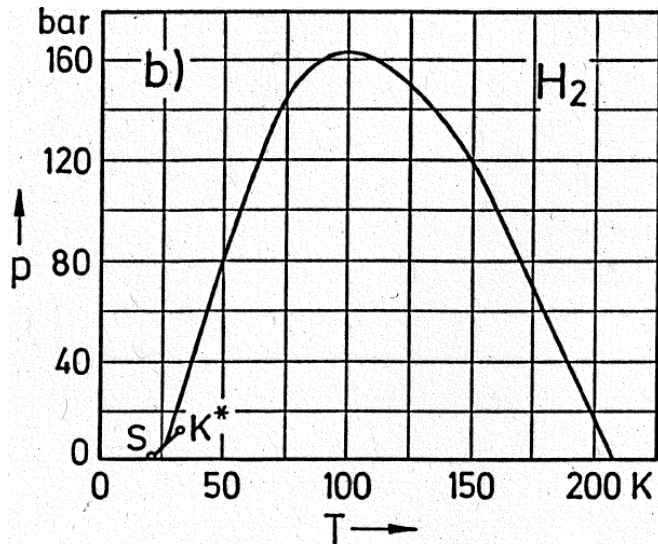
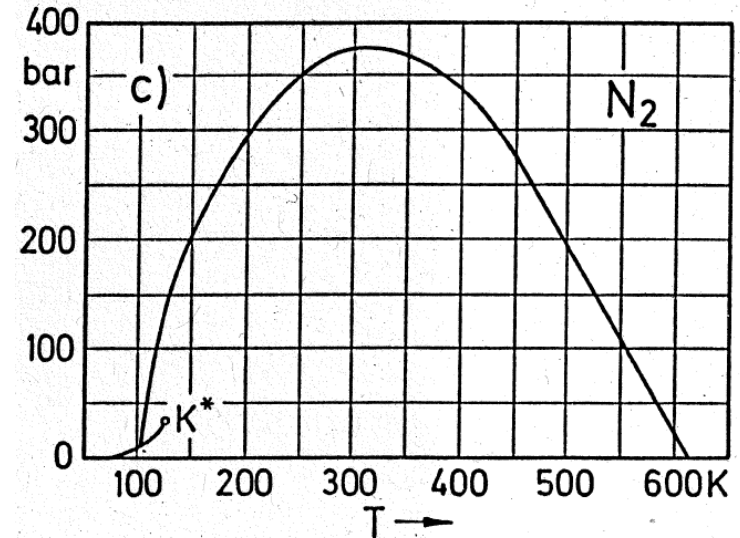
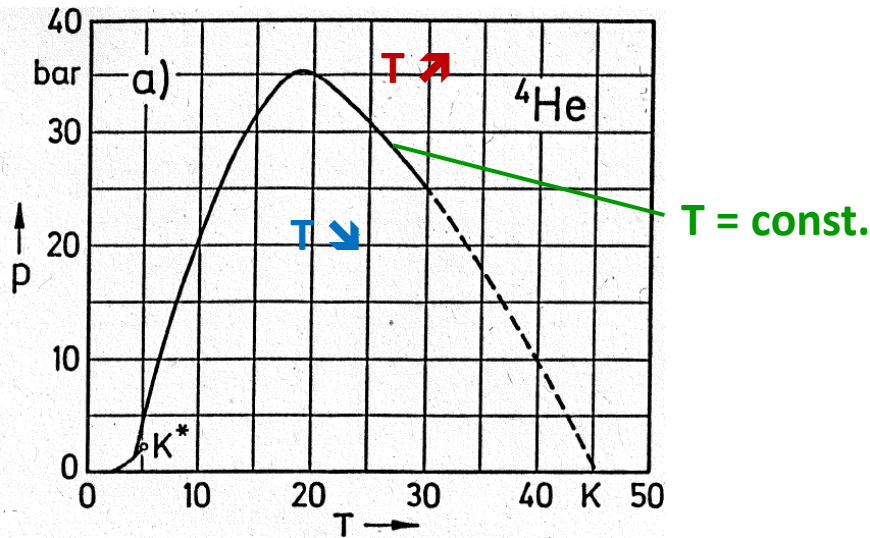
je nach Start-/Endpunkt:

$$\begin{aligned} T_2 &> T_1 \\ T_2 &= T_1 \\ T_2 &< T_1 \end{aligned}$$

Übertragung der Maxima
der Isenthalpen
in ein p, T - Diagramm
→ **Inversionskurve**

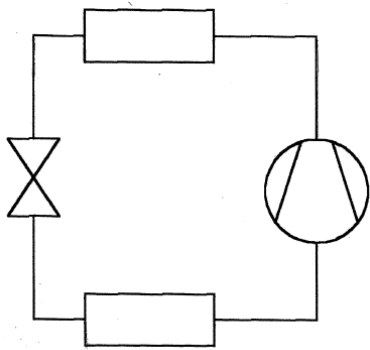


Inversionskurven ^4He , H_2 , N_2 / Joule-Thomson- (J-T-)Kreislauf

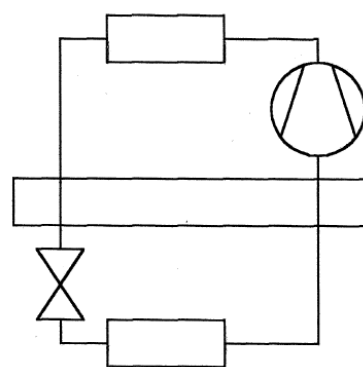


Quelle: G. Klipping, Kryotechnik und Kryopumpen

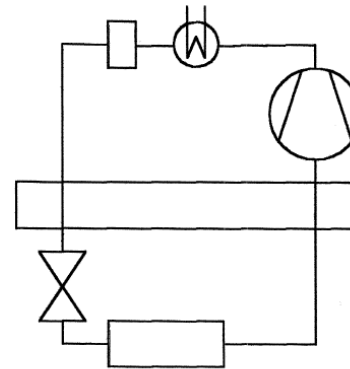
Kaltdampf- und Joule-Thomson-Kreisläufe



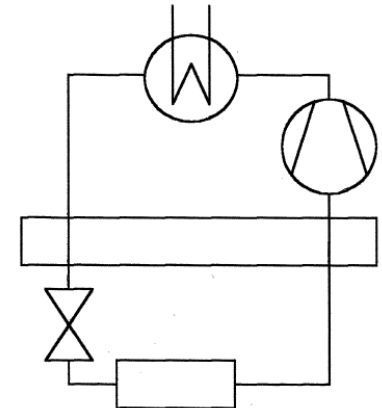
Kaltdampf
(Perkins)



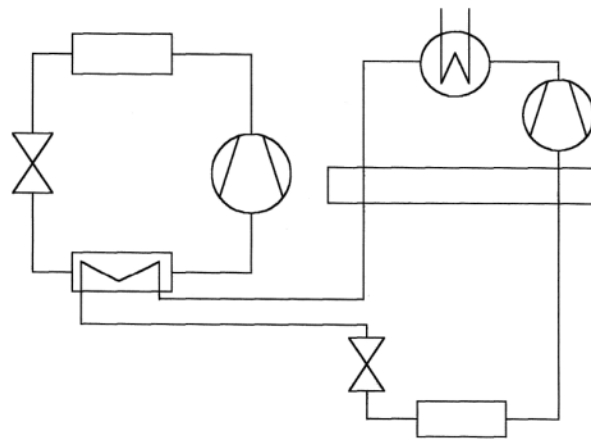
Kaltdampf mit
innerem WÜ



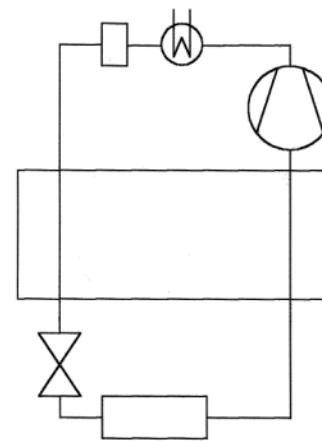
Überkritischer
Kaltdampf-Prozess



Joule-Thomson-Prozess



Kaskade



Gemisch - Joule - Thomson

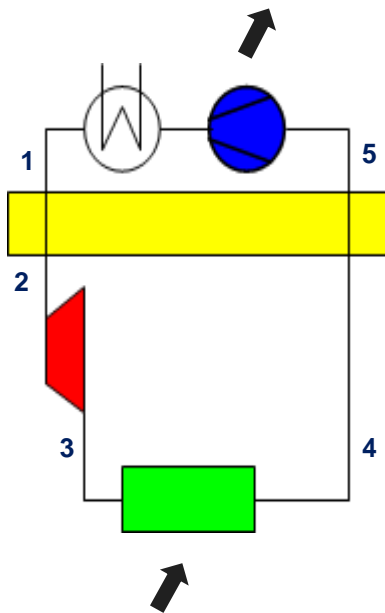
kryogene J-T-Kreisläufe:
+ einfach zu realisieren
- aber: geringe Effizienz

Kreisläufe mit arbeitsleistender Expansion

isentrop (arbeitsleistende) Entspannung; $\Delta S_{\text{ideal}} = 0$
(reversibel)

\dot{m} klein: Expansionskolben
 \dot{m} groß: Turbinen

Brayton – Prozess



idealisiert:

isotherme Kompression
und Wärmeabgabe

isobare
Abkühlung/Erwärmung

isentropie Expansion

isobare Wärmeaufnahme

- + funktioniert immer (Idealgasverhalten)
- + viel größere Kälteleistung
- mechanisch aufwändig

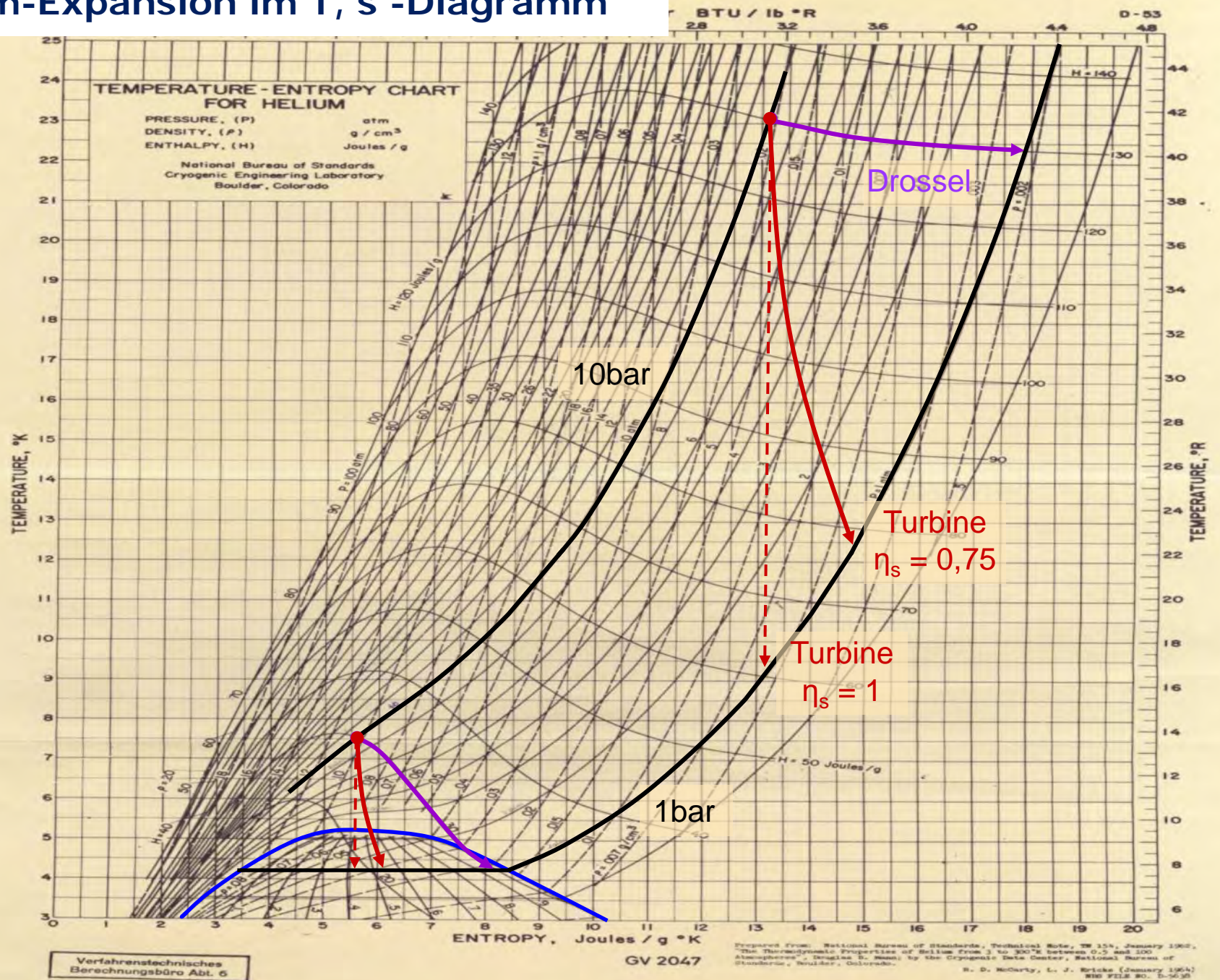
real: isentroper Wirkungsgrad η_s

$$\eta_s = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_{3s}}$$

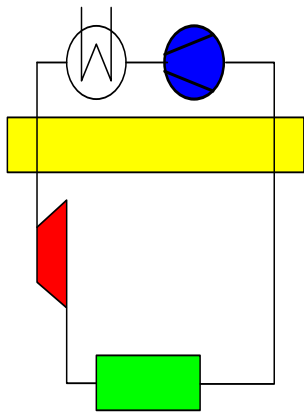
dt: „erzeugte Kälte“; „Kälteleistung“
korrekter: „aufgenommene Wärme“

engl.: „heat load“

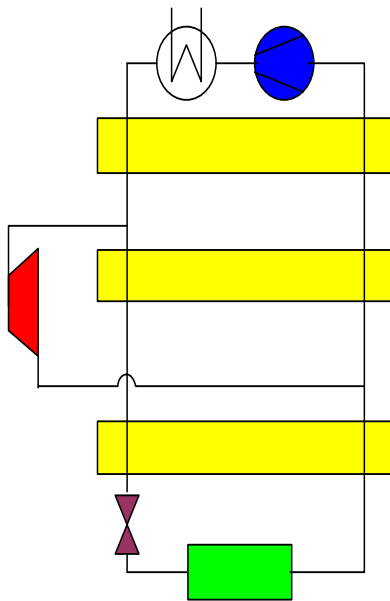
Helium-Expansion im T, s -Diagramm



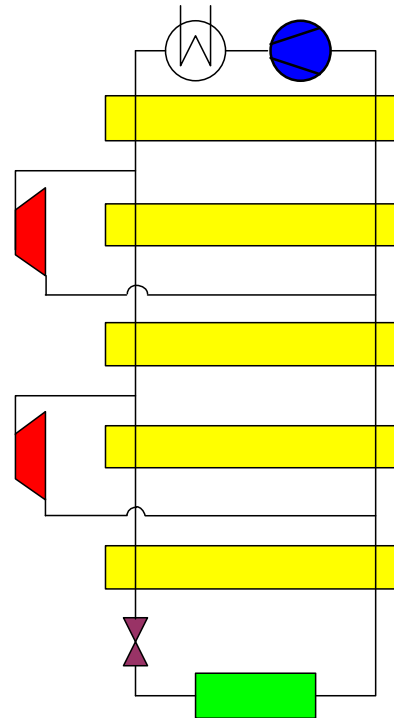
Kreisläufe mit arbeitsleistender Expansion



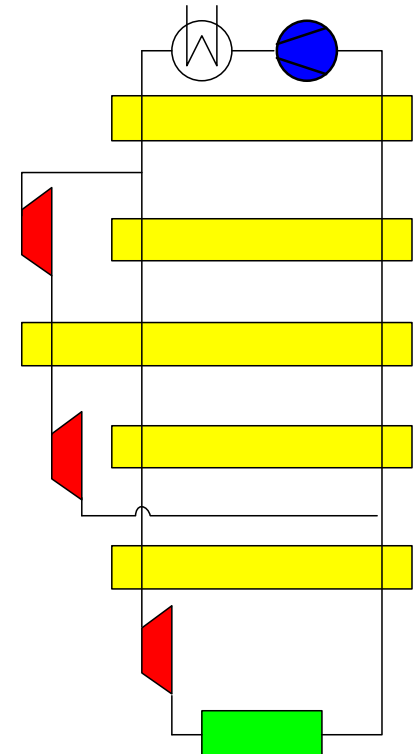
Brayton



Claude

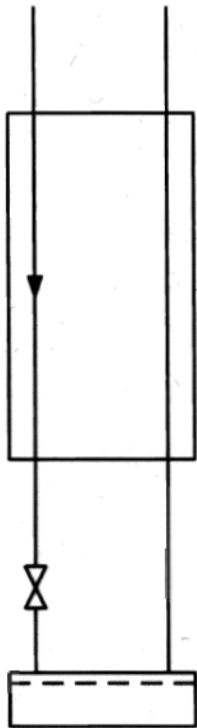


Expanders in parallel
(Collins)

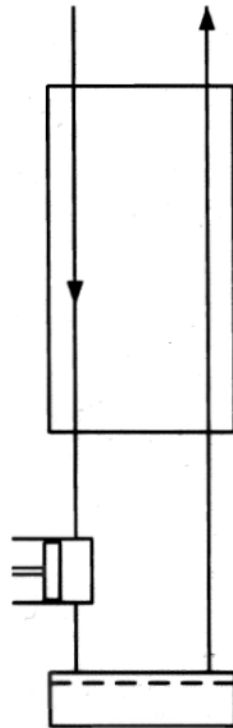


Expanders in series
plus wet expander

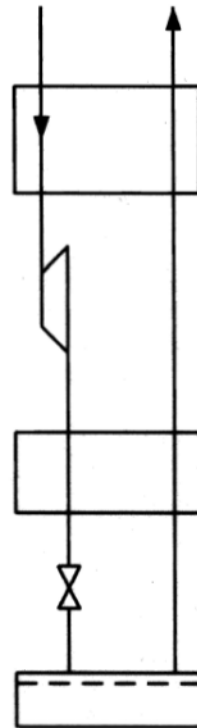
Effizienzvergleich versch. Ausformung J-T-Stufe Heliumanlagen



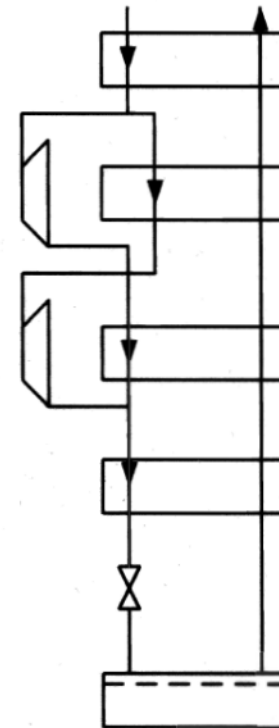
Joule-Thomson



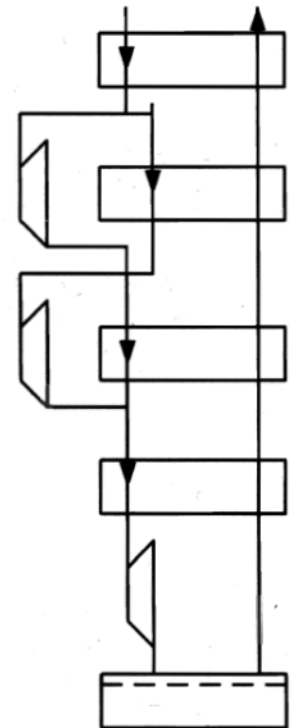
**Wet Expander
Collins (ca. 1965)**



**JT - Turbine
FNAL 1975**



**Double JT - Turbine
DESY HERA 1985**



**Triple JT -Turbine
CERN LEP 1990**

Carnot Efficiency [%]	18	23	23	28	30
COP ($W_{el} / W_{refr.}$)	370	290	290	240	224

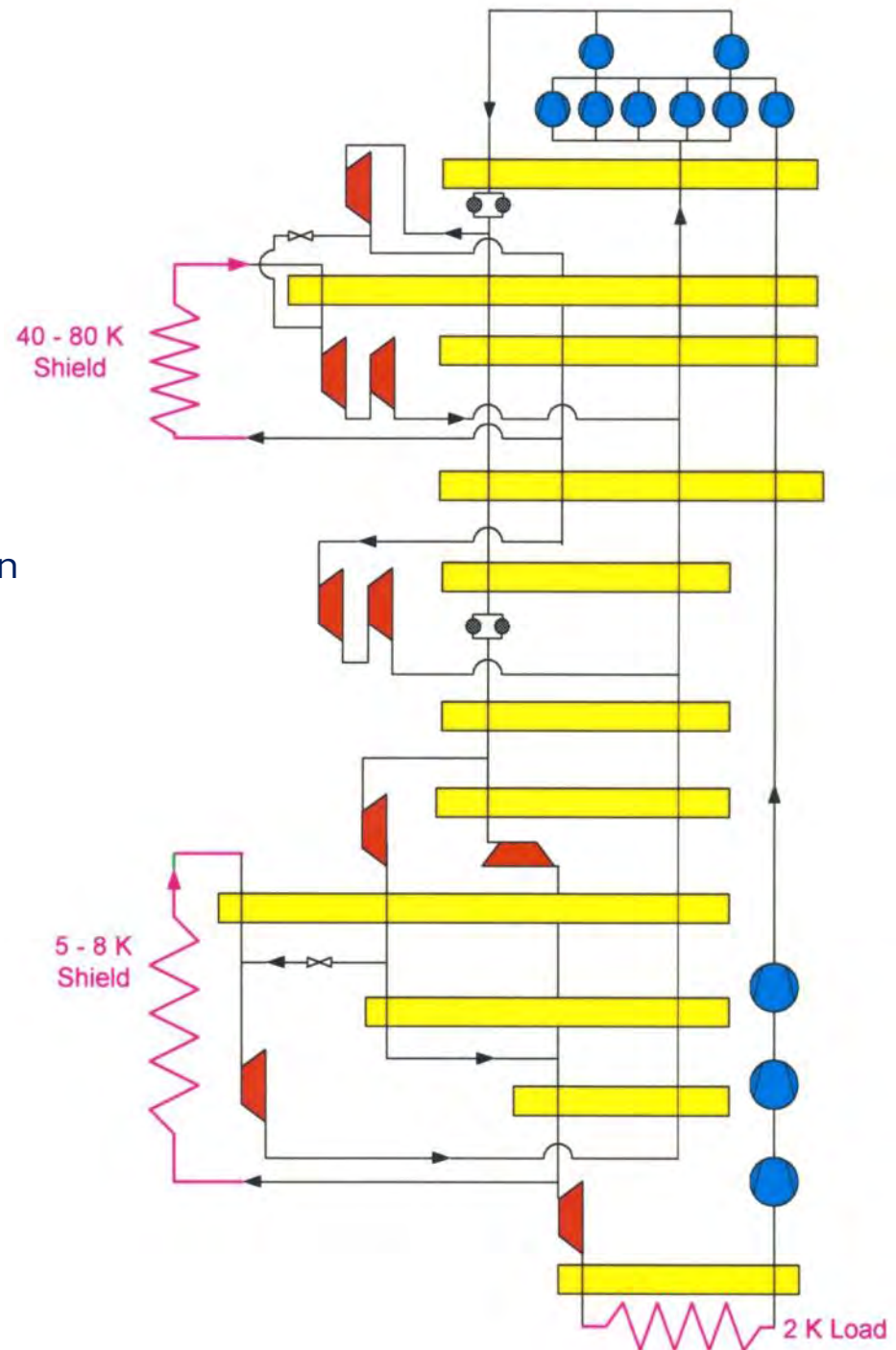
Quelle: MT 17, Geneva (2001)

„high-end“ – Helium-Kälteanlage

Konzeptauslegung für TESLA- Beschleuniger, DESY:

- 8 Kreislaufverdichter in zwei Stufen
- 9 Expansionsturbinen
- 3 Kalte Kompressoren
- Wärmelasten auf drei unterschiedlichen Temperaturniveaus

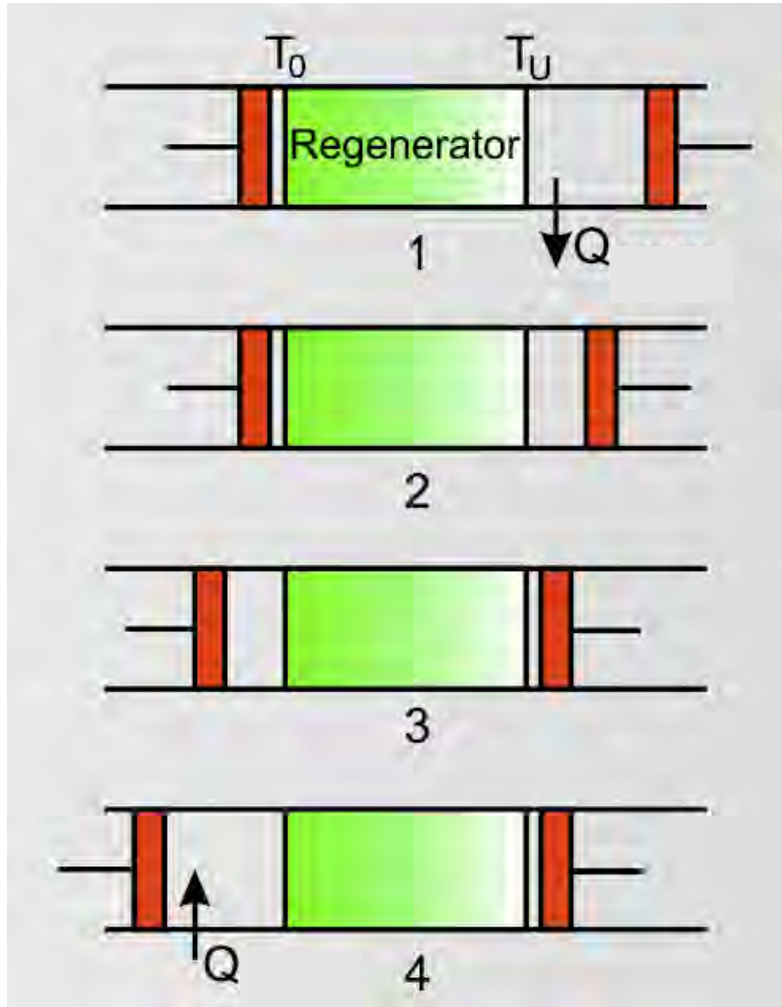
LS für Kälte- und
Kryotechnik,
TU Dresden



Stirling-Kältemaschinen

Grundaufbau: kalter Kolben; kalter WÜ; Regenerator; warmer WÜ; warmer Kolben

↑ großes c ; kleines Totvolumen



Funktionsprinzip:

1 → 2:

isotherme Kompression

$$Q_{ab} = m \cdot T_1 (s_2 - s_1)$$

2 → 3:

isochore Abkühlung

$$p \propto$$

3 → 4:

isotherme Expansion

$$Q_o = m \cdot T_3 (s_4 - s_3)$$

4 → 1:

isochore Erwärmung

$$p \propto$$

ideales Gas:

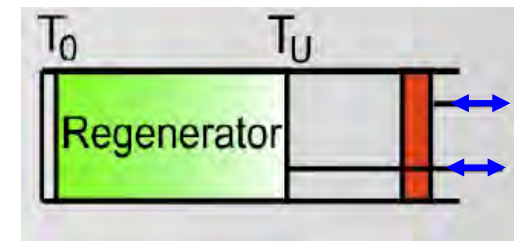
$$s_1 - s_2 = s_4 - s_3$$

$$\Rightarrow \text{COP} = T_3 / (T_1 - T_3)$$

theoretisch Carnot-Wirkungsgrad erreichbar

technisch besser zu realisieren:

nur warmer Kolben +
beweglicher Regenerator



Stirling-Kältemaschinen

Wirkungsgrad realer Stirling-Kühler sind deutlich schlechter

relevante Verlustfaktoren:

- 1) mechan. Reibung
alle bewegten Teile (Kolben, Regenerator)
- 2) Druckverluste
(bei Durchströmen Regenerator; ggf. in Verbindungsleitungen bei Split-Stirling-Konfiguration); geringe Gasviskosität
- 3) Längswärmeleitung warm-kalt (entlang Außenzylinder, Regenerator)
- 4) parasitäre Wärmelasten (auf Kaltteil)
- 5) begrenzte Wärmeleitung kalter/warmer WÜ
- 6) Bypassverluste (Leckagen zw. Regenerator und Zylinder)
- 7) Shuttleverluste
(Wärmeübergang zw. Regeneratoraußenseite und Zylinderwand)
- 8) Antriebsverluste (Elektromotor, Lager, Kurbeltrieb)



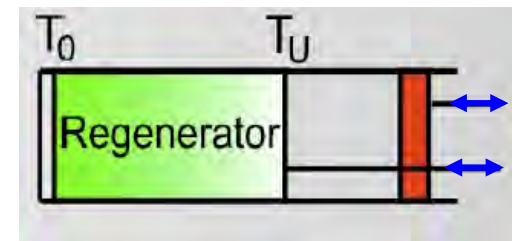
ideales Gas:

$$s_1 - s_2 = s_4 - s_3$$

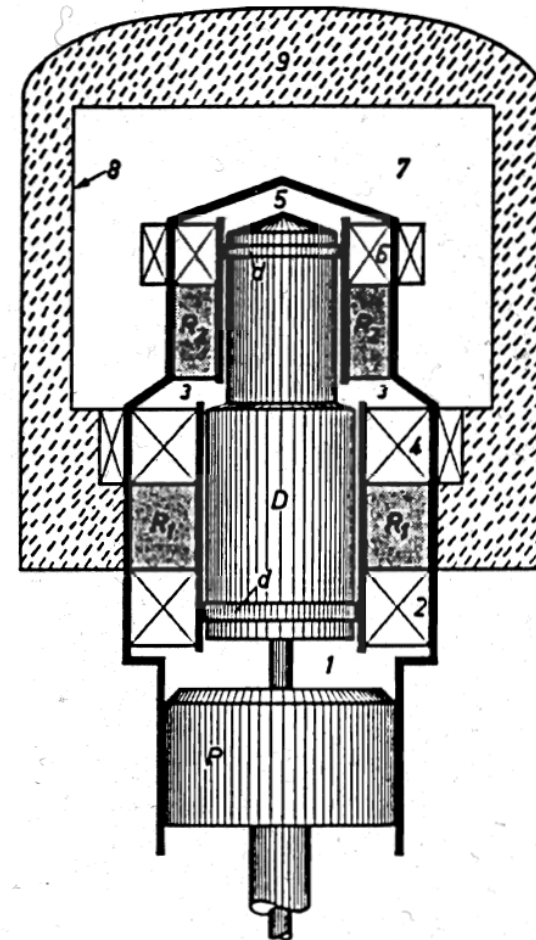
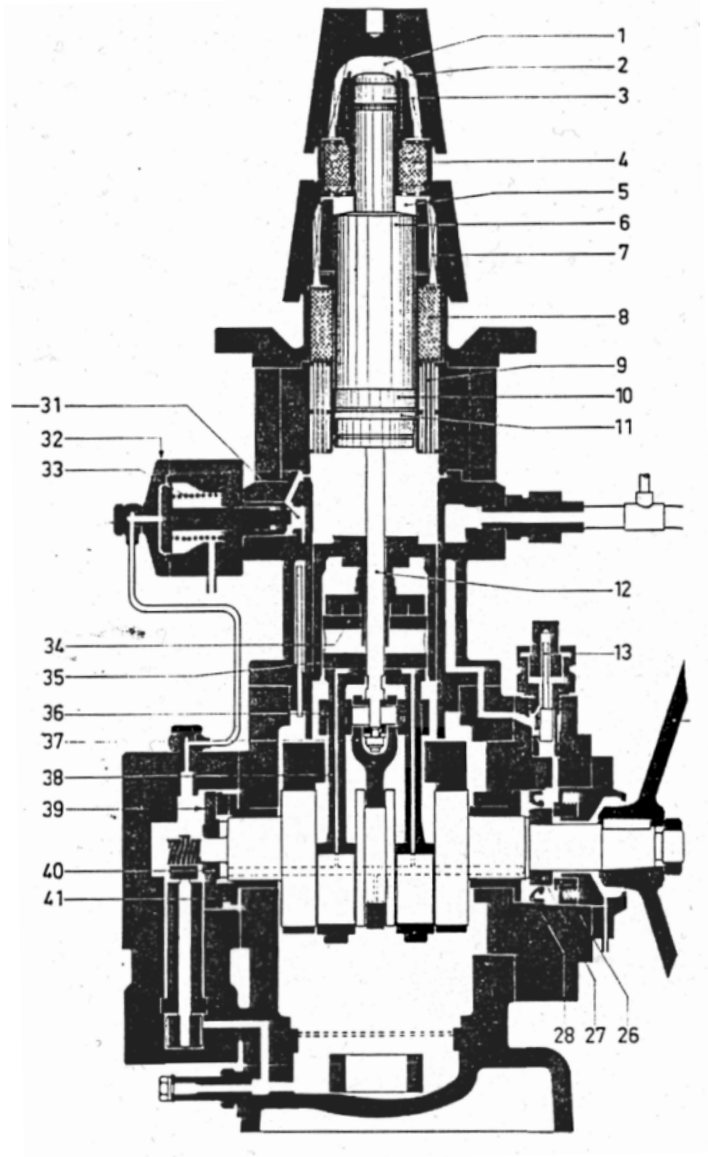
$$\Rightarrow \text{COP} = T_3 / (T_1 - T_3)$$

theoretisch Carnot-Wirkungsgrad erreichbar

technisch besser zu realisieren:
nur warmer Kolben +
beweglicher Regenerator



Stirling-Kältemaschine zweistufig Fa. Philips (60er Jahre)



R₁, R₂:
Regenerator I, II

D: Verdränger I, II
d: Dichtung trocken

2, 4, 6:
Wärmeübertrager

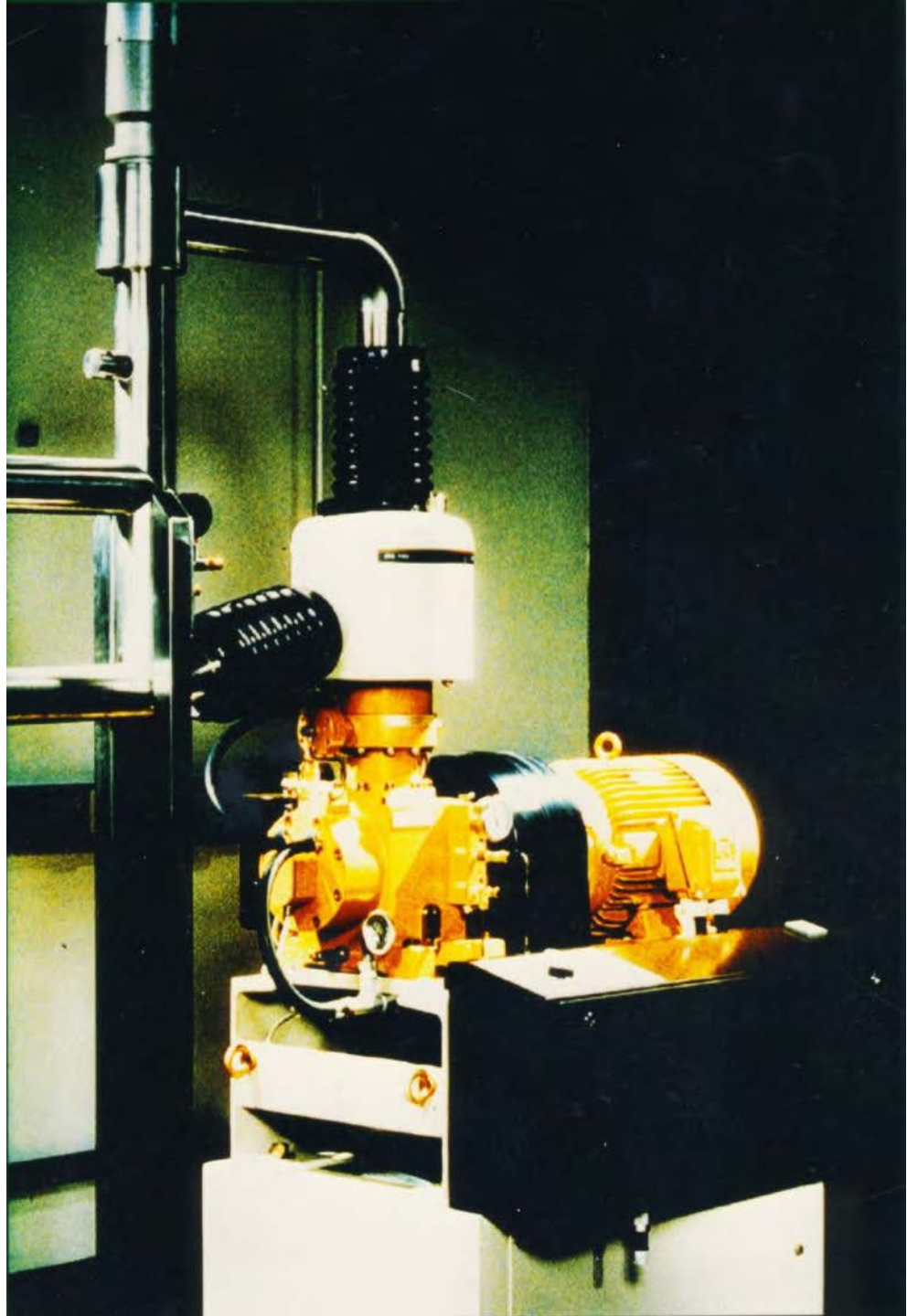
P: Kolben

Stirling-Kältemaschine

Schwungrad:

Wiederverwendung
Expansionsleistung!

Luftverflüssiger
Fa. Stirling BV,
Eindhoven / NL



Flüssigstickstoff-Versorgung



Stirling - Kälteanlage

zur dezentralen LN_2 - Herstellung
oder Kältebereitstellung

$P_{\text{el}} = 12 \text{ kW}$

700 W @ 80 K

bzw.

500 W @ 65 K



entspricht
15 % 'Carnot'

Stirling BV, Eindhoven