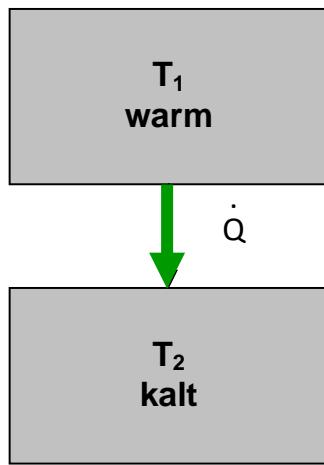


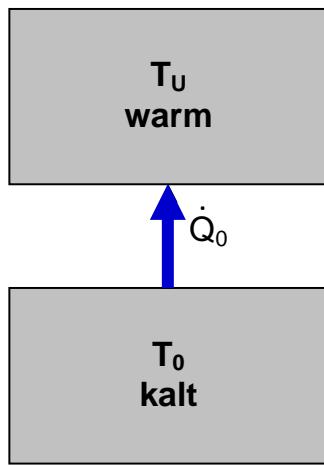
Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



natürlich ablaufender Prozess
(Temperaturausgleich)



Eis-Ernte im Winter / Auslieferung / „Kühlschrank“



Kältemaschine



Kältetechnik:
Kälteprozess
mit nötiger Energiezufuhr

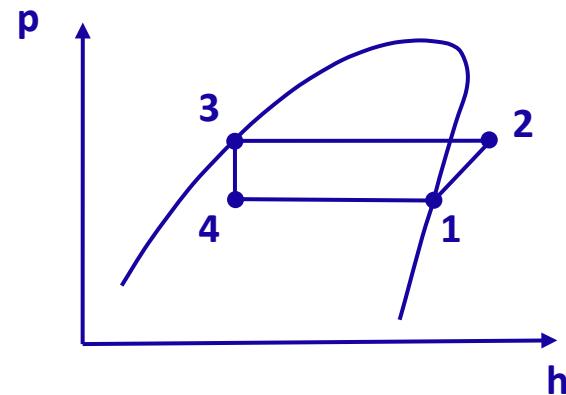
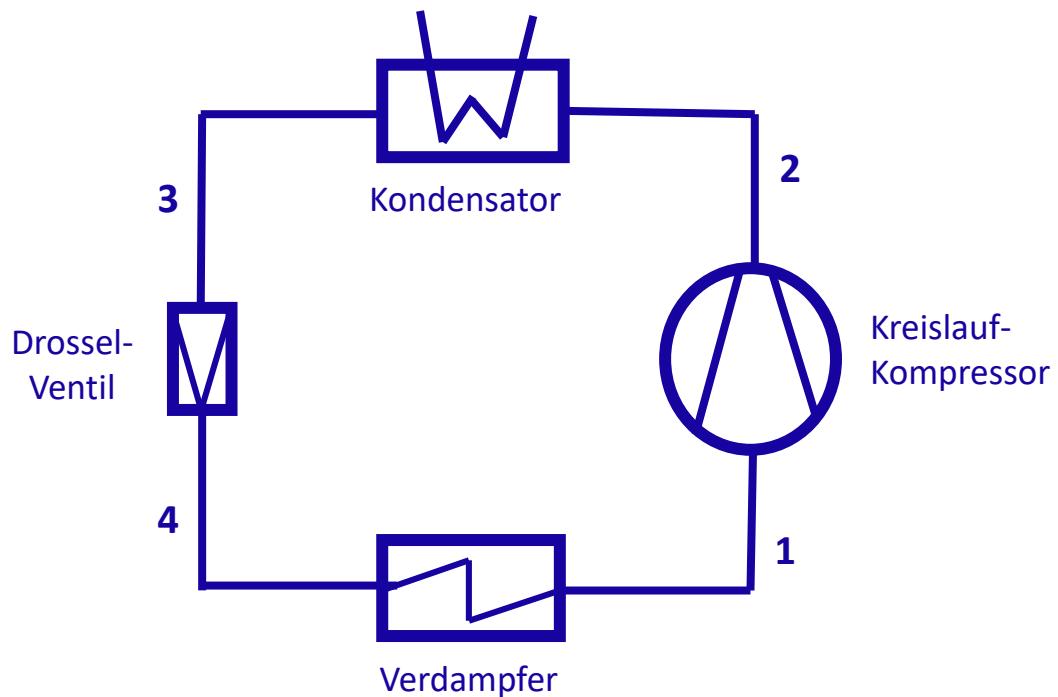


USA (1922)
 NH_3 - Kühlschrank
Preis: \$ 714

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

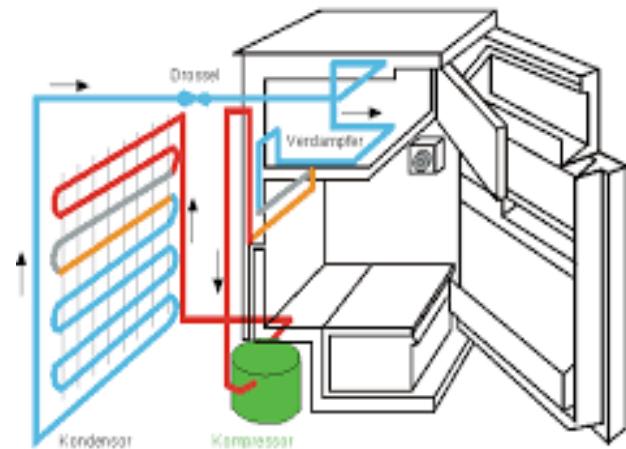
Einführung Europa:
→ erst ab 50er Jahre
(u.a. DKV Scharfenstein, nahe Dresden)

Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



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

R11, R600a, R134a, CO₂, NH₃, ...

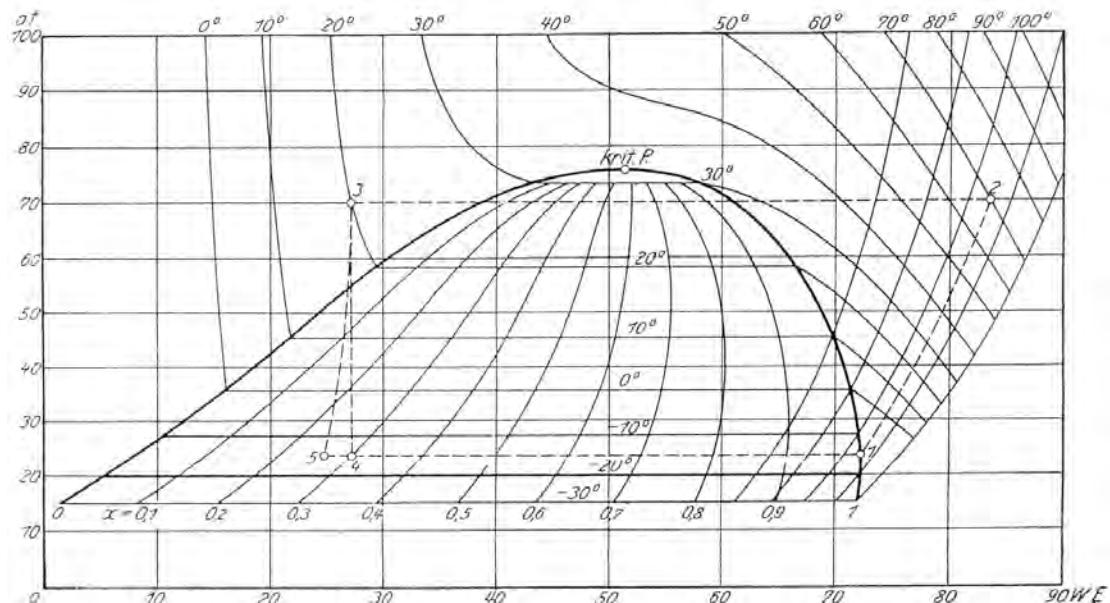


Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung

p, h - Diagramm



Fig. 3. J-P-Diagramm für Kohlensäure.



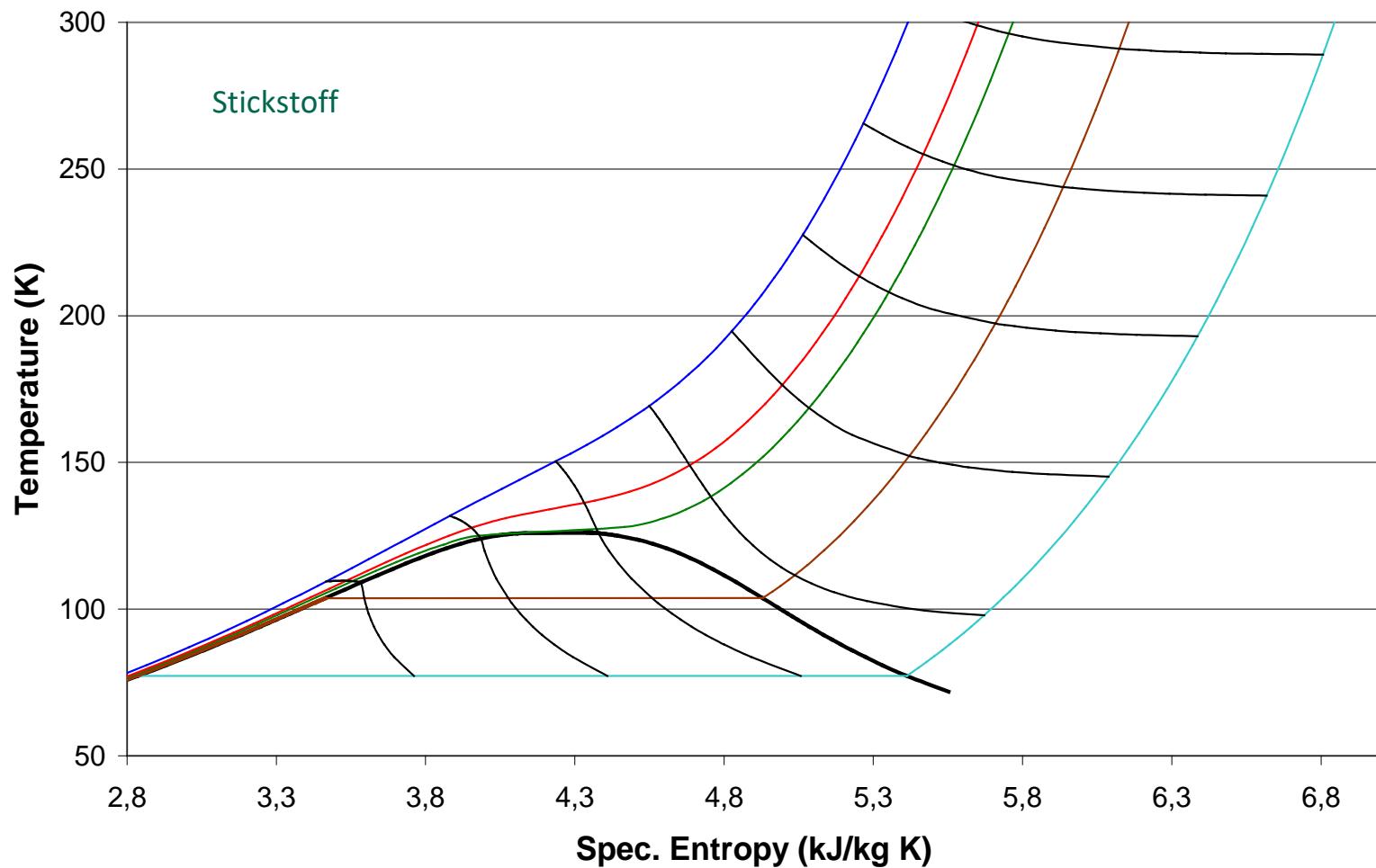
Richard Mollier, Professor für Thermodynamik in Dresden

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

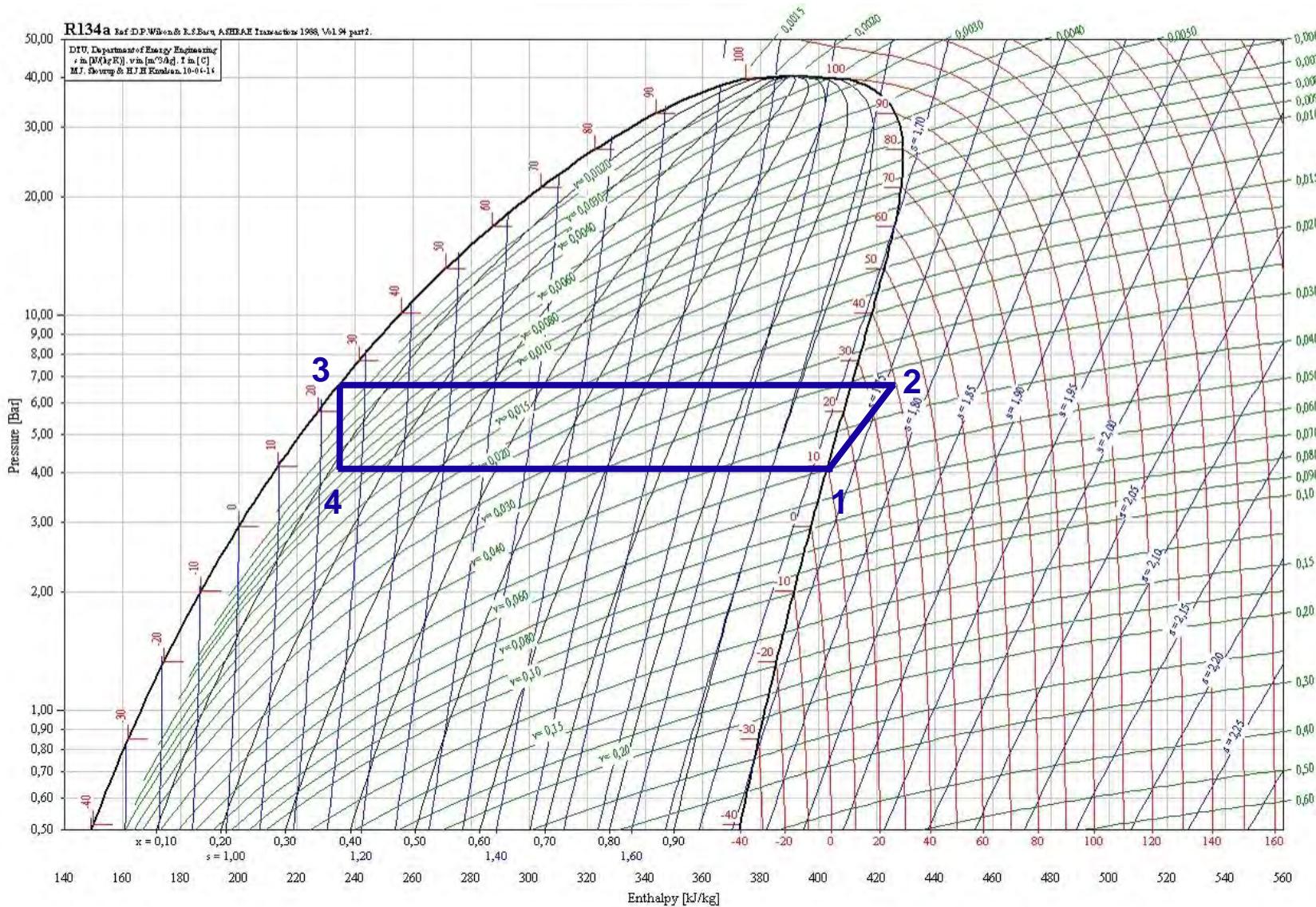
Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung

T, s - Diagramm

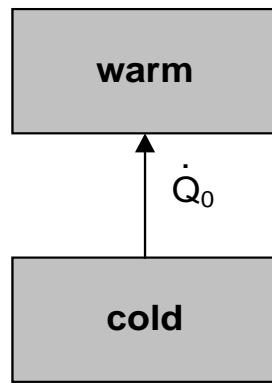
mit Isobaren, Isenthalpen und Zweiphasengebiet eingezeichnet



Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



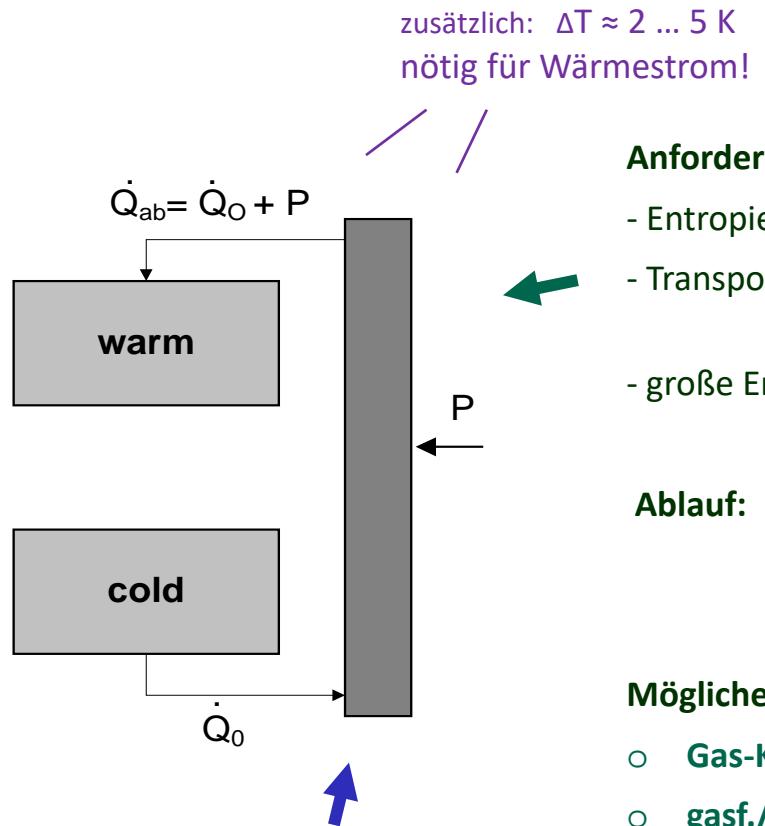
Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



Nicht erlaubt

wg. 2. Hauptsatz
der Wärmelehre

(obwohl
Energieerhaltung
gewahrt)



irgendwie geartete
Kältemaschine

- Kältemittel
- Wärmetransport

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

Anforderungen:

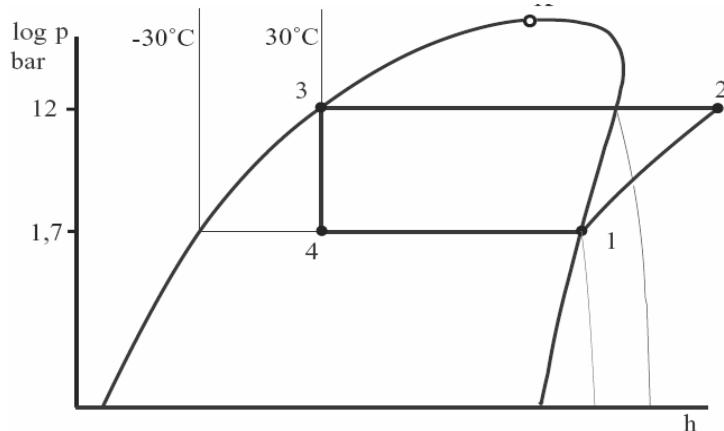
- Entropieaufnahme / Abgabe
- Transport (ohne weitere Entropieproduktion!)
- große Entropie-Breite ΔS

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

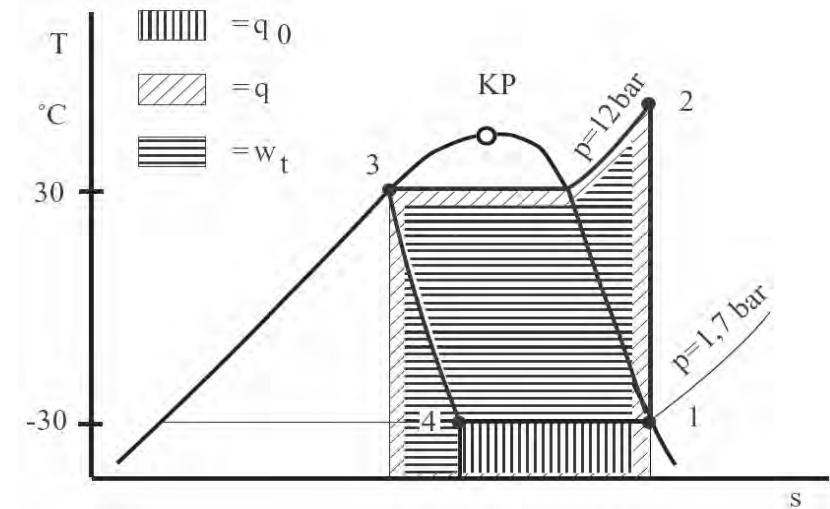
Mögliche physikalische Effekte:

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

Theorie der (kryogenen) Kälteerzeugung



log p, h - Diagramm

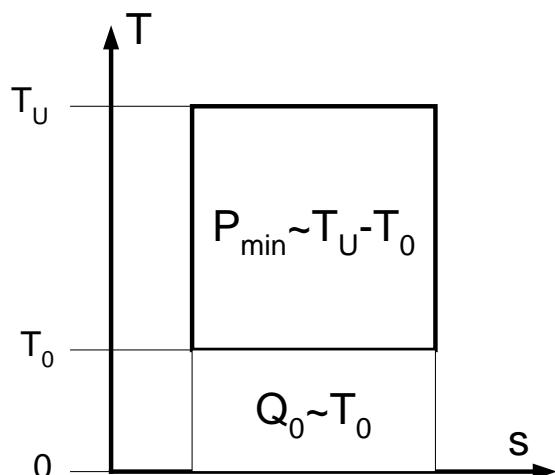


T, s - Diagramm

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

$$\Delta h = 0$$

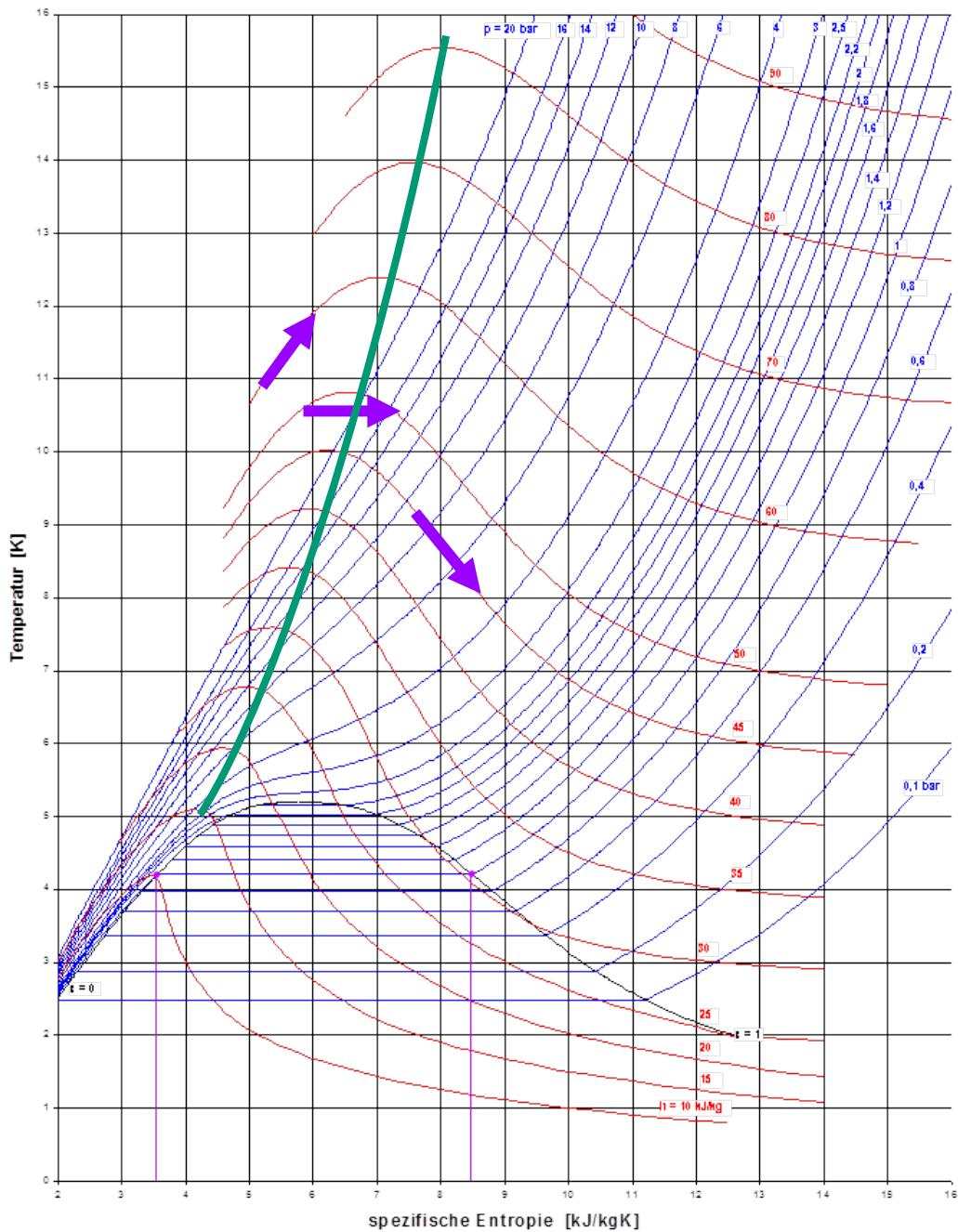
$$\delta W = 0$$

$$\delta Q = 0$$

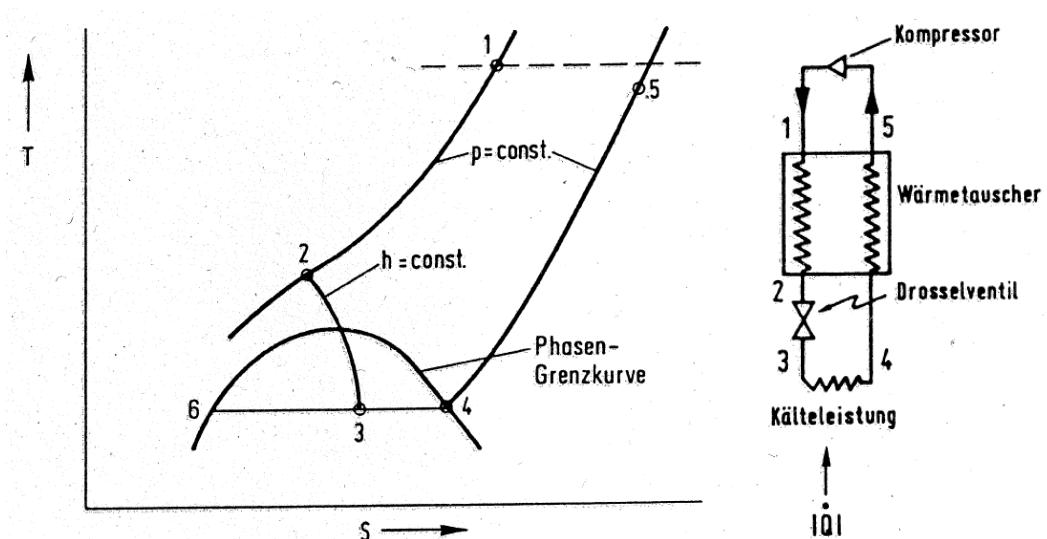
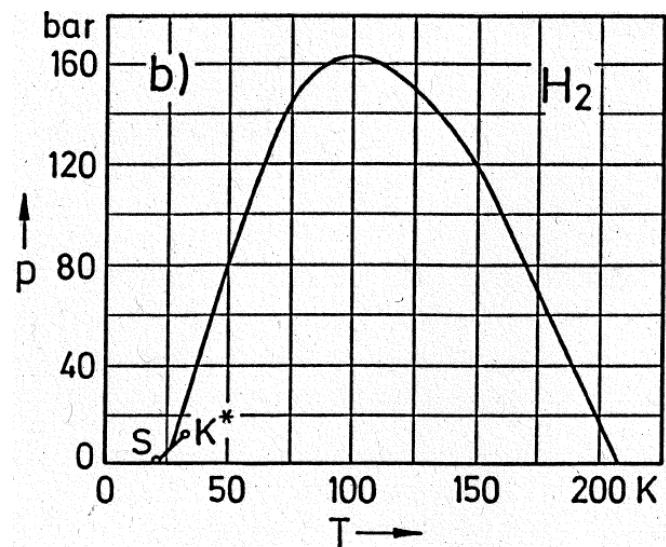
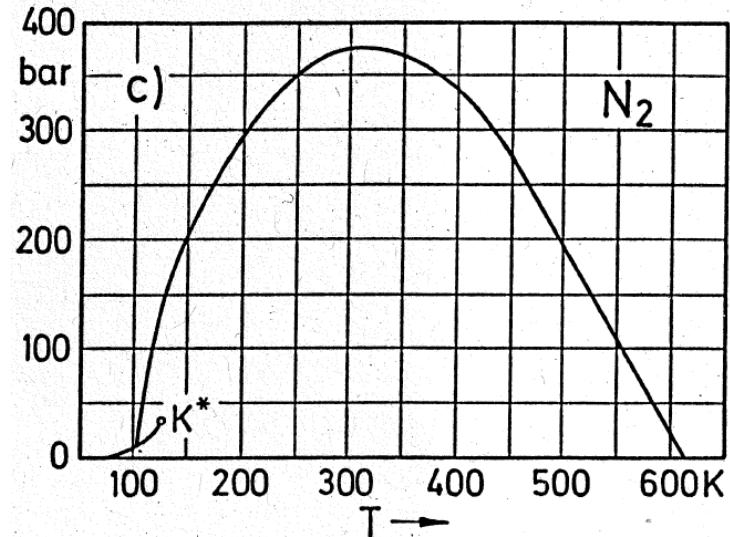
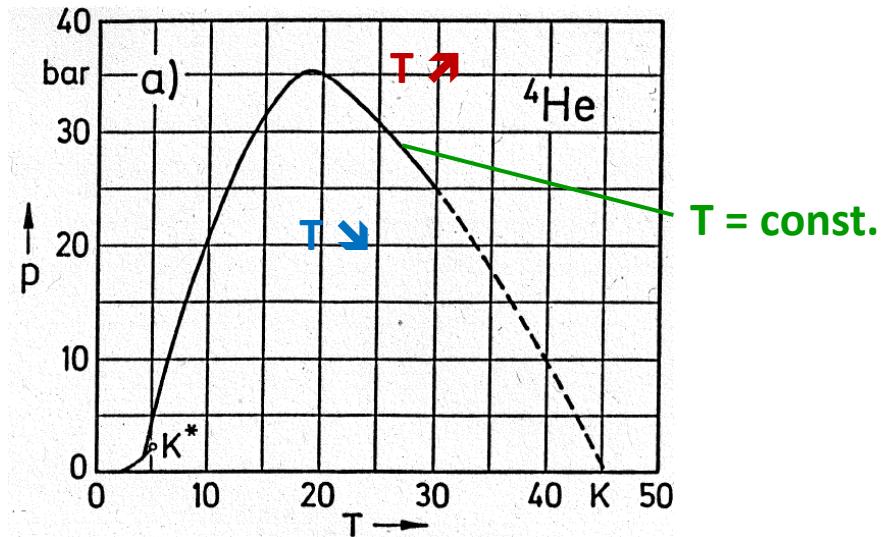
adiabat

je nach Start-/Endpunkt:
 $T_2 > T_1$
 $T_2 = T_1$
 $T_2 < T_1$

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

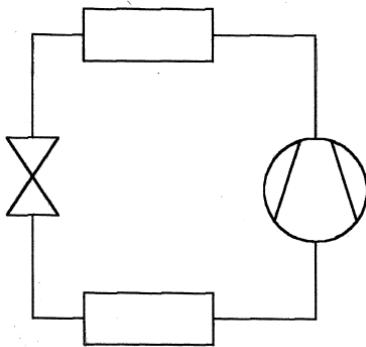


Inversionskurven ${}^4\text{He}$, H_2 , N_2 / Joule-Thomson- (J-T-)Kreislauf

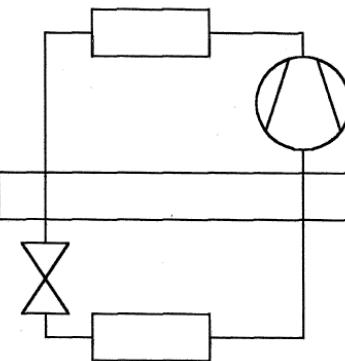


Quelle: G. Klipping, Kryotechnik und Kryopumpen

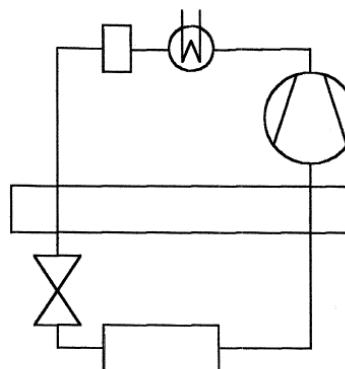
Kaltdampf- und Joule-Thomson-Kreisläufe



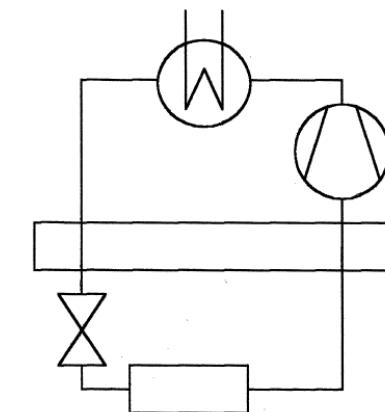
Kaltdampf
(Perkins)



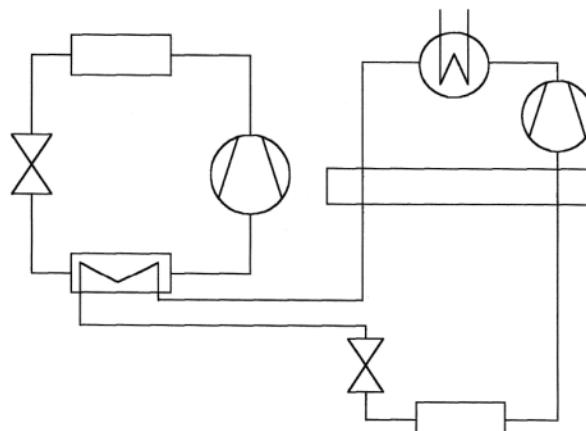
Kaltdampf mit
innerem WÜ



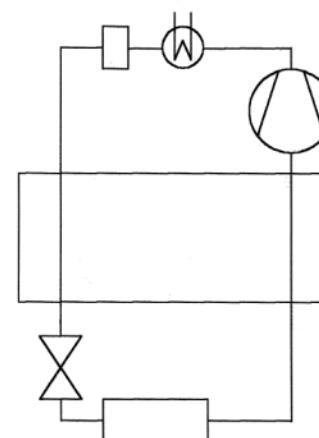
Überkritischer
Kaltdampf-Prozess



Joule-Thomson-Prozess



Kaskade



Gemisch - Joule - Thomson

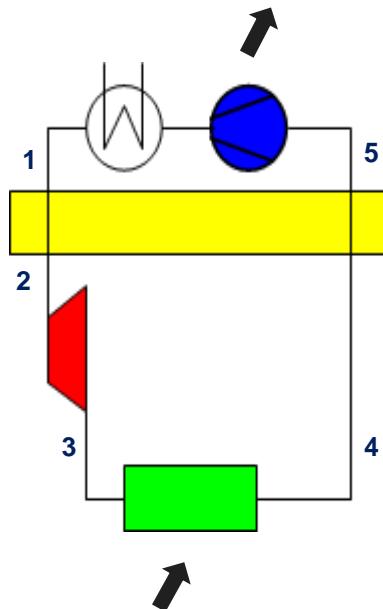
kryogene J-T-Kreisläufe:
+ einfach zu realisieren
- aber: geringe Effizienz

Kreisläufe mit arbeitsleistender Expansion

isentrope (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

isentrope Expansion

isobare Wärmeaufnahme

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

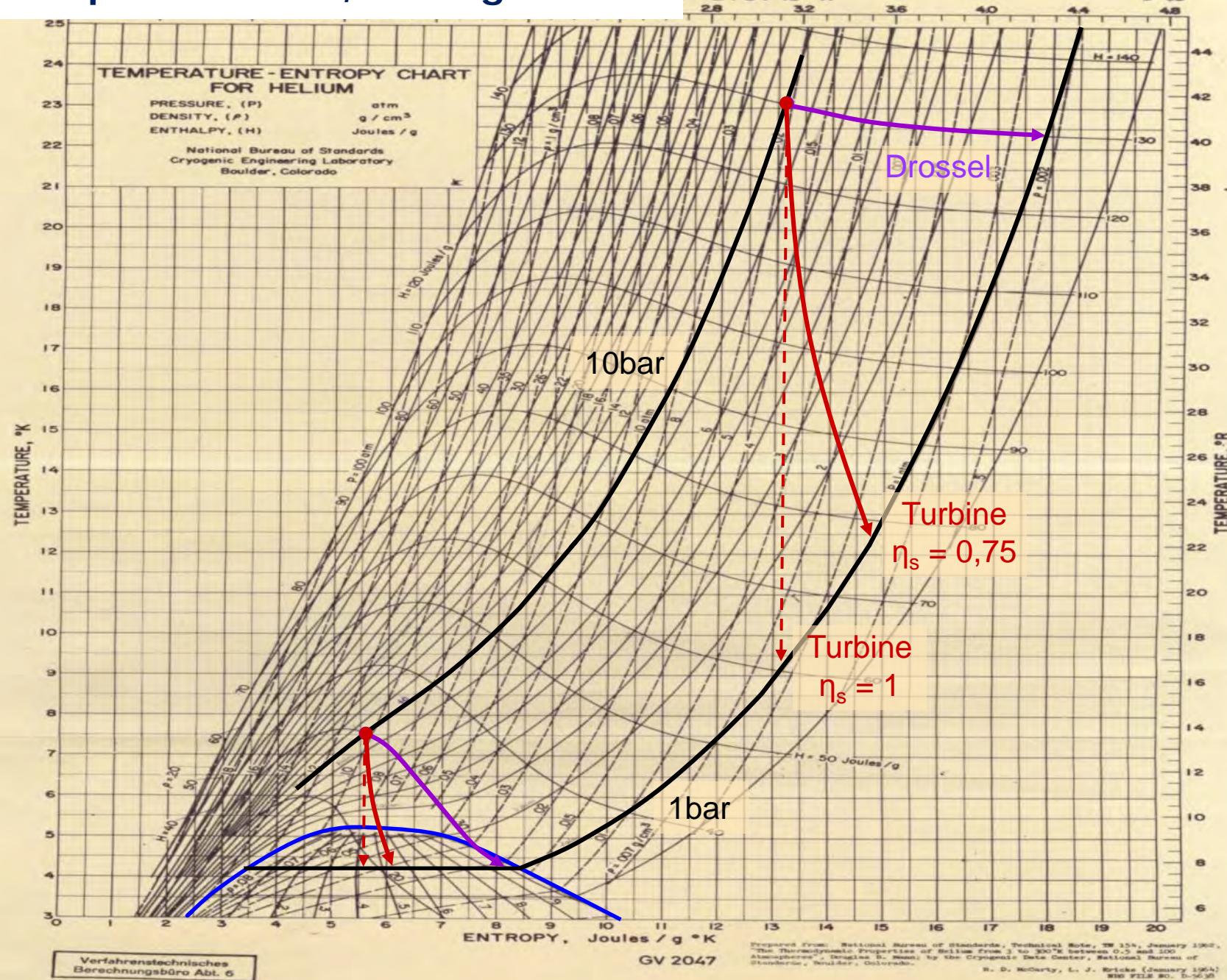
real: isentroper Wirkungsgrad η_s

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

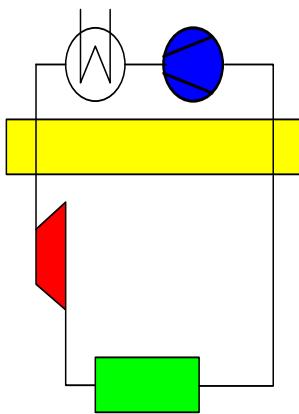
dt: „erzeugte Kälte“; „Kälteleistung“
korrekter: „aufgenommene Wärme“

engl.: „heat load“

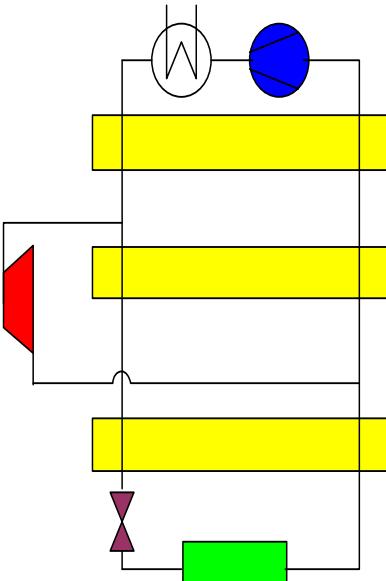
Helium-Expansion im T, s -Diagramm



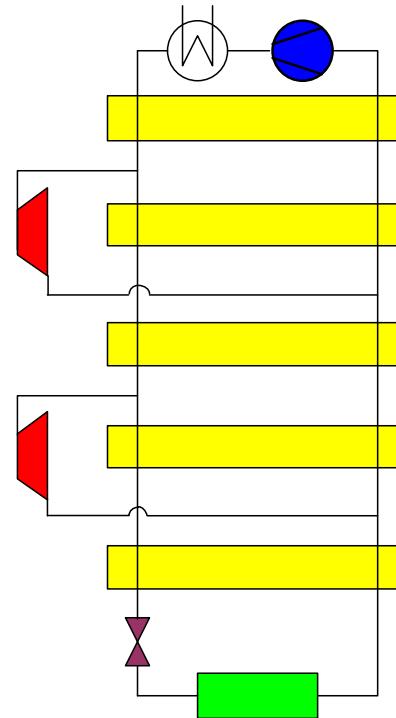
Kreisläufe mit arbeitsleistender Expansion



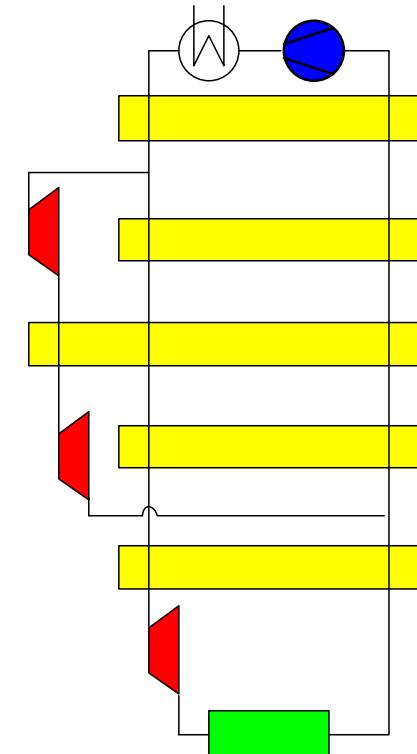
Brayton



Claude

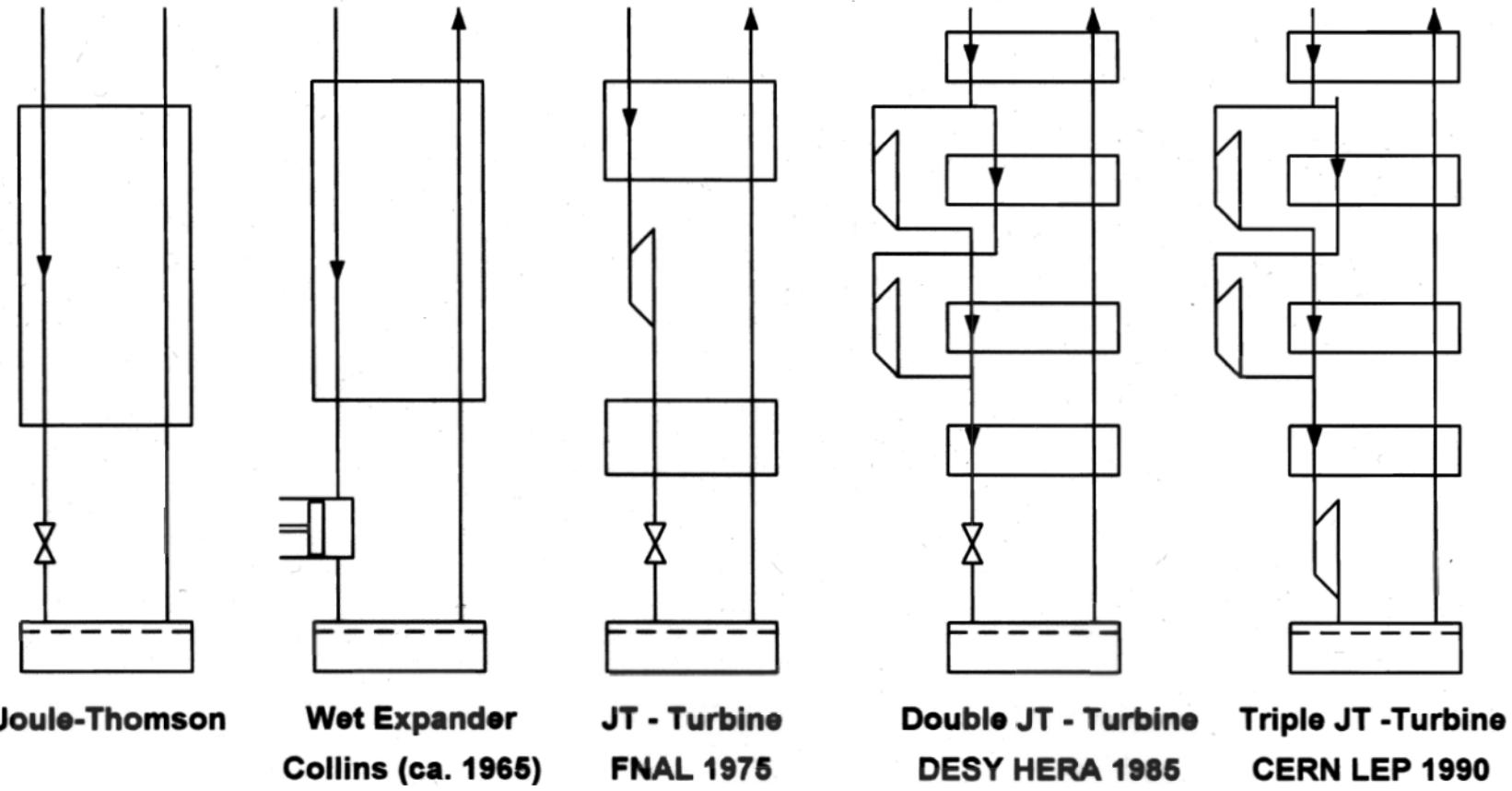


Expanders in parallel
(Collins)



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

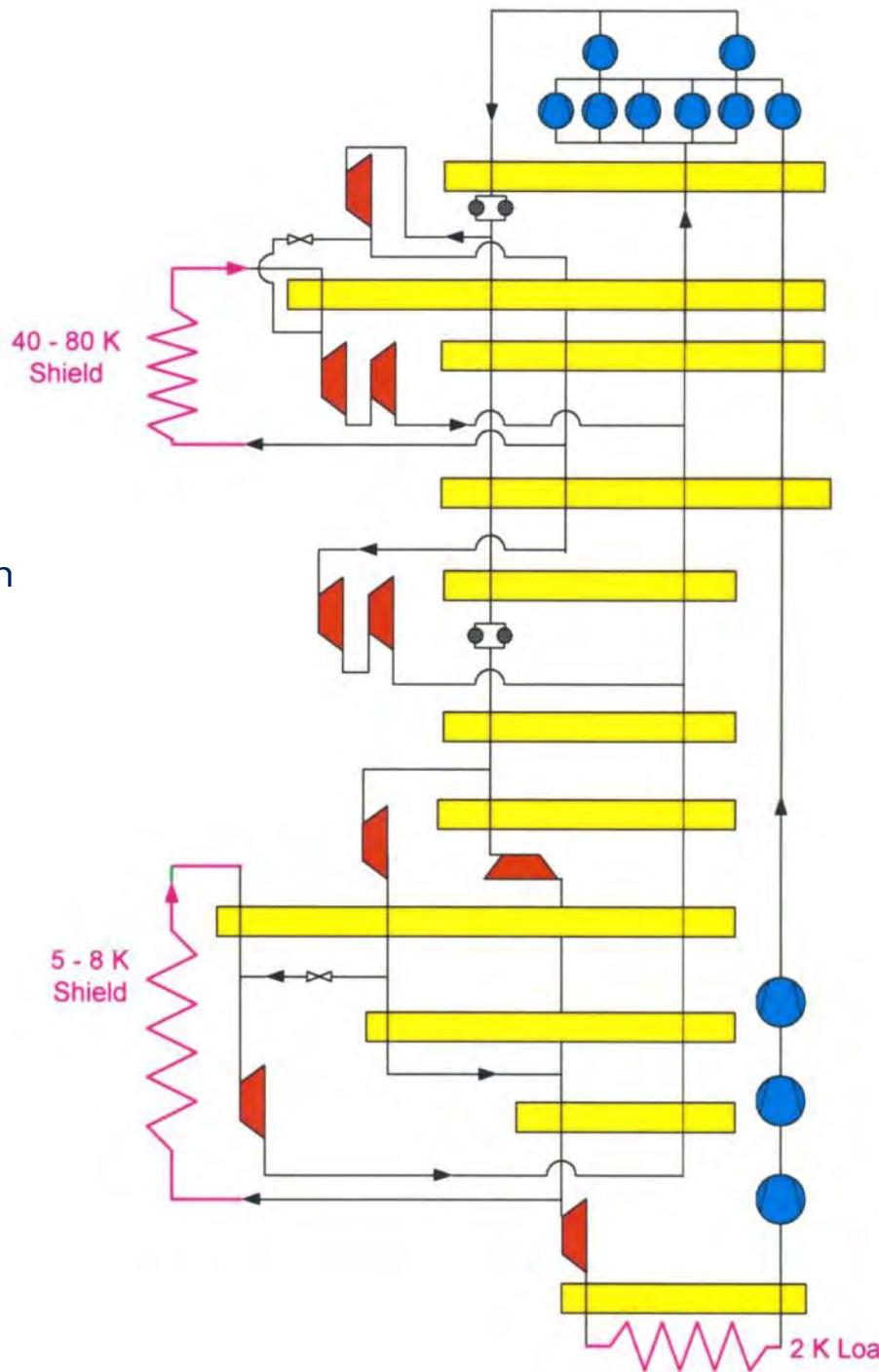
Triple JT - Turbine

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:

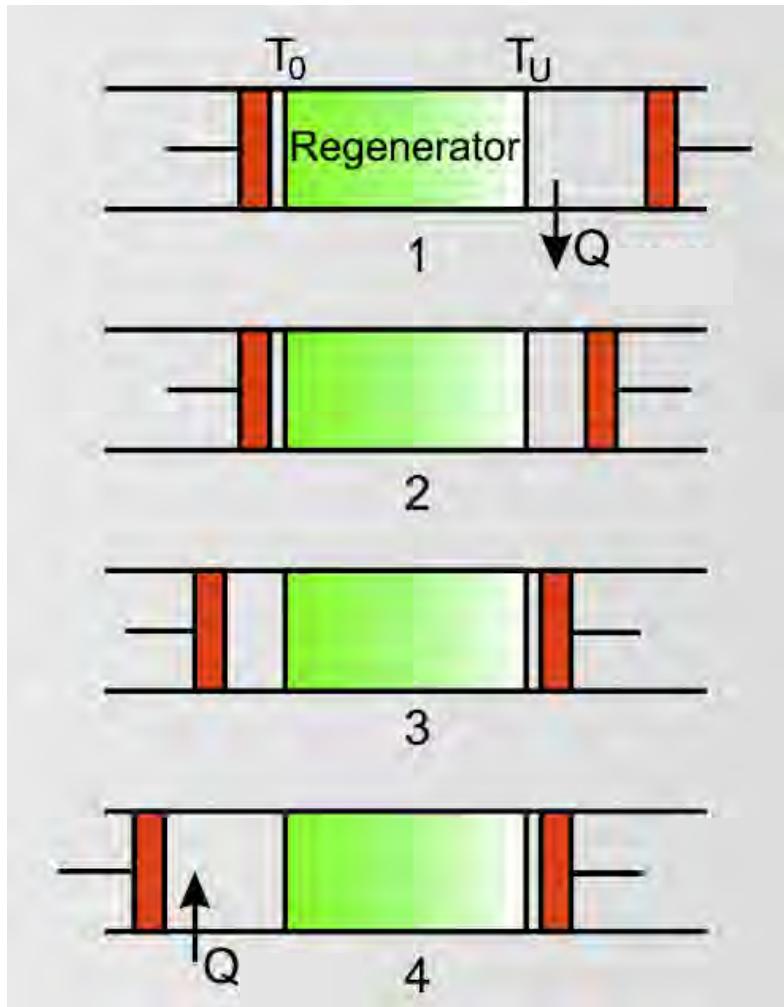
- 8 Kreislaufverdichter in zwei Stufen
- 9 Expansionsturbinen
- 3 Kalte Kompressoren
- Wärmelasten auf drei unterschiedlichen Temperaturniveaus

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

$$p \Downarrow$$

3 → 4:

isotherme Expansion

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

4 → 1:

isochore Erwärmung

$$p \Updownarrow$$

ideales Gas:

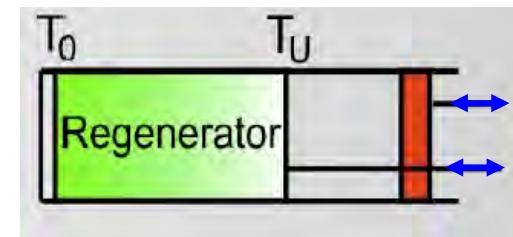
$$S_1 - S_2 = S_4 - S_3$$

$$\Rightarrow COP = T_3 / (T_1 - T_3)$$

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. Regeneratioraußenseite und Zylinderwand)
- 8) Antriebsverluste (Elektromotor, Lager, Kurbeltrieb)



ideales Gas:

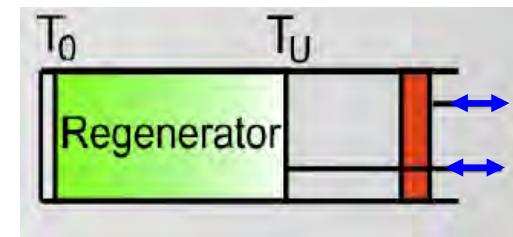
$$S_1 - S_2 = S_4 - S_3$$

$$\Rightarrow COP = T_3 / (T_1 - T_3)$$

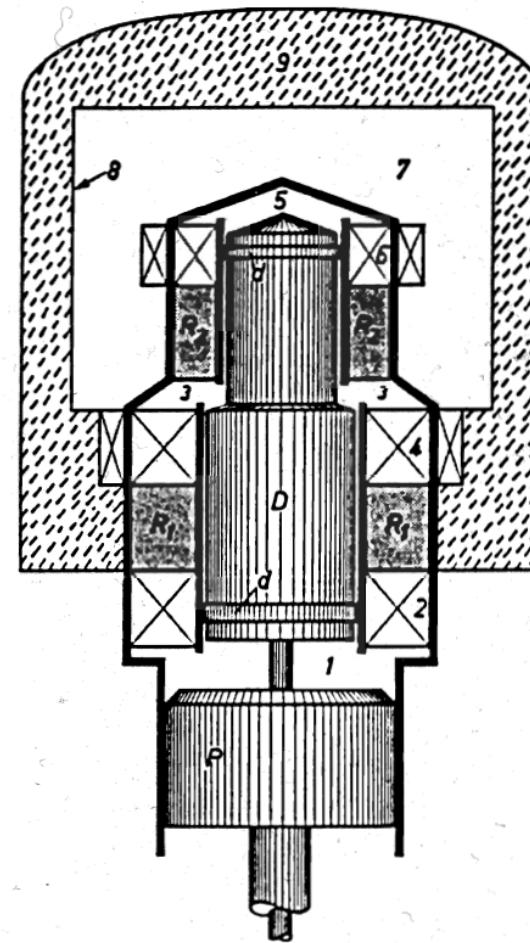
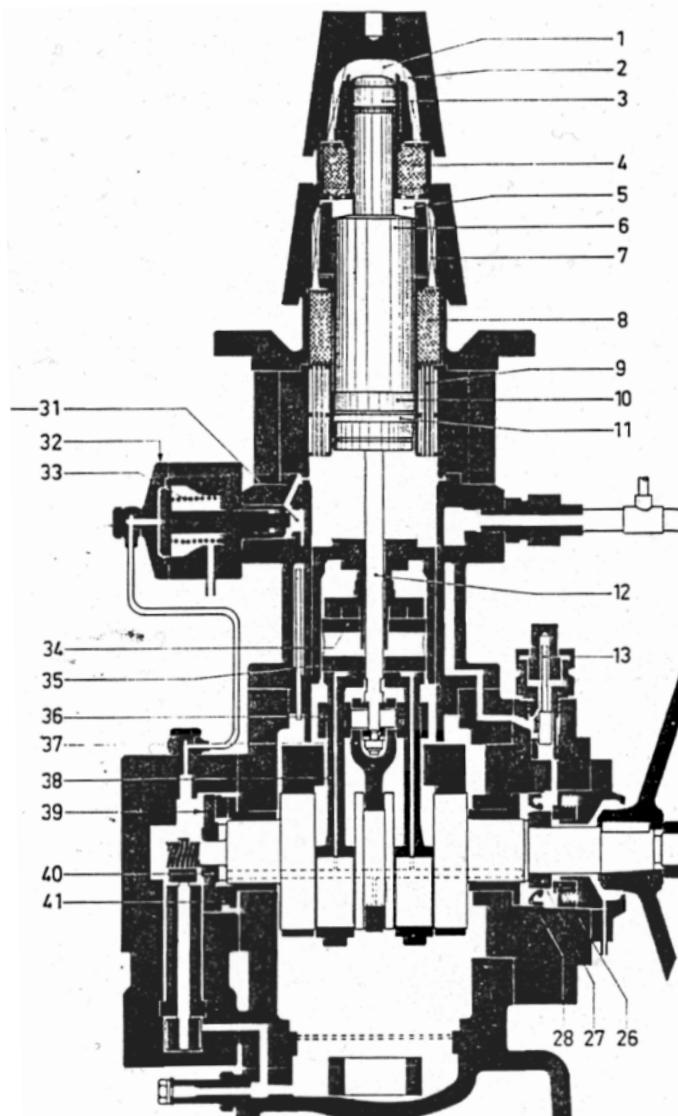
theoretisch Carnot-Wirkungsgrad erreichbar

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

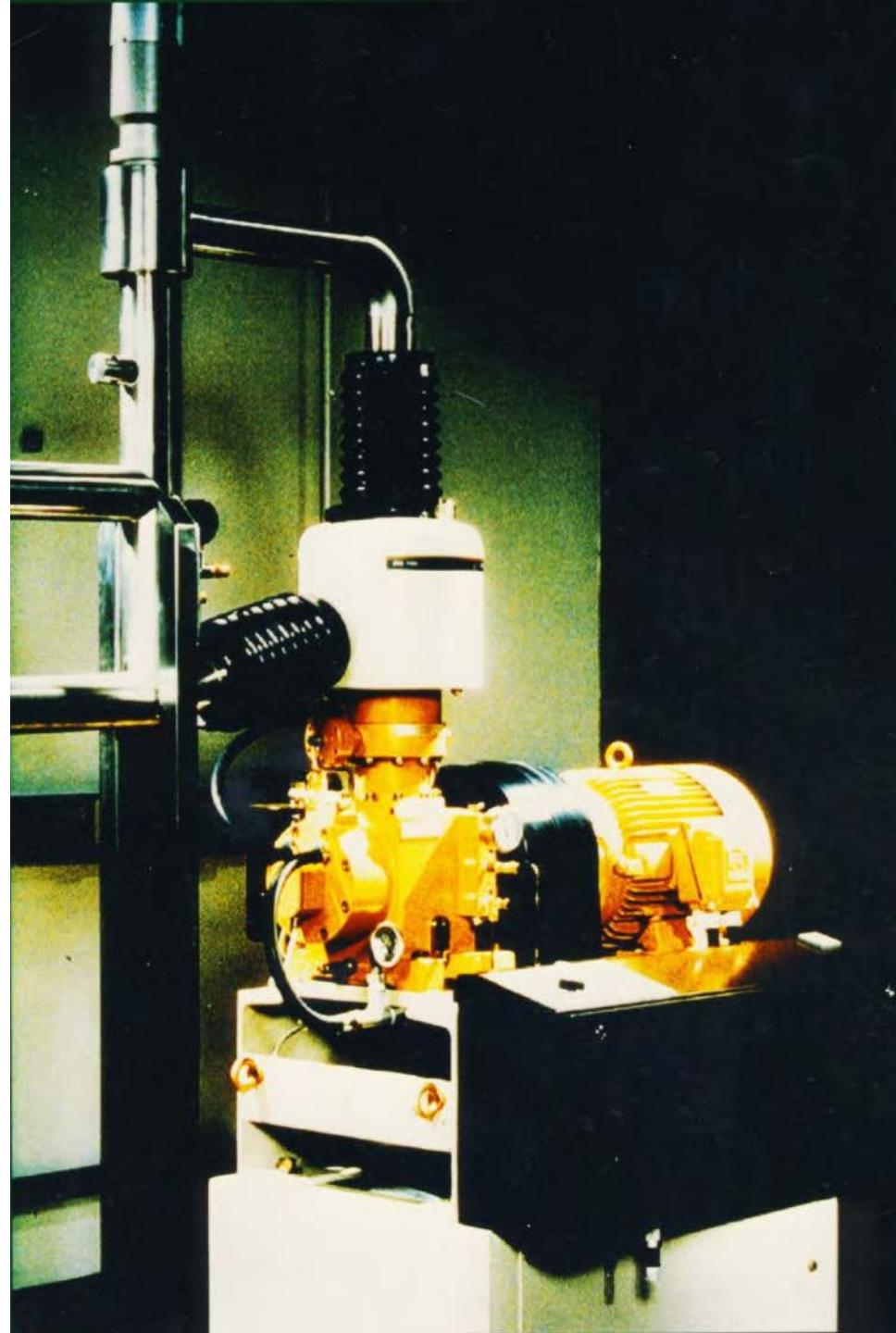
P: Kolben

Stirling-Kältemaschine

Schwungrad:

Wiederverwendung
Expansionsleistung!

Luftverflüssiger
Fa. Stirling BV,
Eindhoven / NL



Flüssigstickstoff-Versorgung



Stirling - Kälteanlage

zur dezentralen LN₂ - Herstellung
oder Kältebereitstellung

$P_{el} = 12 \text{ kW}$
700 W @ 80 K
bzw.
500 W @ 65 K

← entspricht
15 % 'Carnot'

Stirling BV, Eindhoven