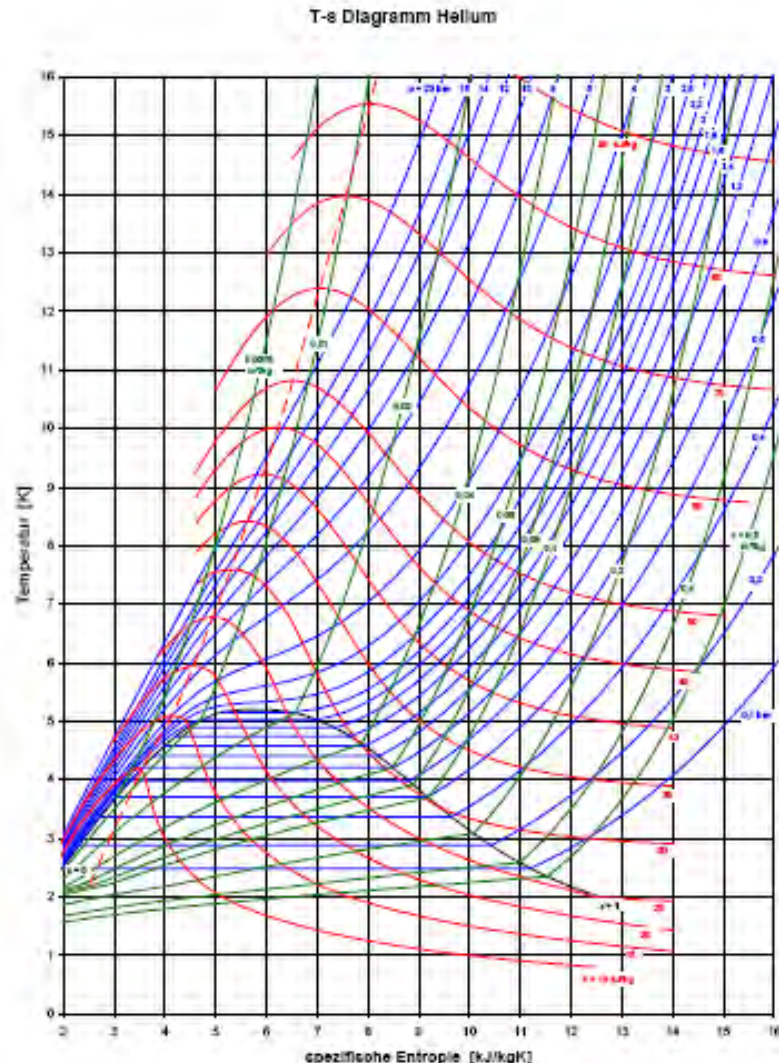


Heliumverflüssigung – Geschichte und Technologie

neues 'permanentes gas' gefunden (erst im Sonnen-Emissionspektrum, später auf der Erde)

⇒ erneuter Wettlauf um die erste Verflüssigung



irrtümlich falsch benannt in
hel-ium statt in *hel-on*

Abschätzung kritischer Punkt:

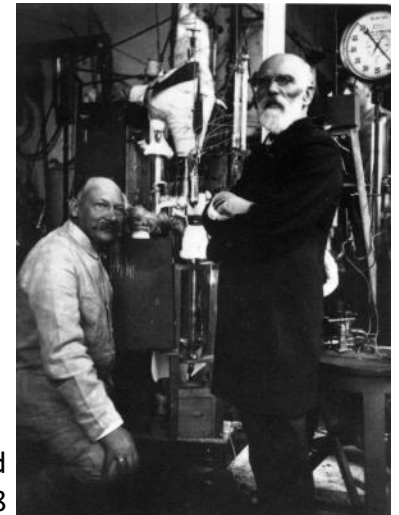
(Van der Waals, Theorie
korrespondierender Zustände)

1896 Olszewski (Krakau) $T_c < 9 \text{ K}$

1901 Dewar (London) $T_c < 9 \text{ K}$

1907 Van der Waals $T_c < 6 \text{ K}$

Kamerlingh Onnes und
Van der Waals, 1908



Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

Heike Kamerlingh Onnes

erste Heliumverflüssigung in Leiden am 10. Juli 1908

- lange, geduldige Vorarbeiten
 - eigens Aufbau und Ausbildung eines Stabs von Mitarbeitern
 - Gründung Glasbläser-/Instrumentenbauerschule
- ⇒ Heliumbeschaffung aus Monazitsand
(360 l gasf.)

folgende 15 Jahre:

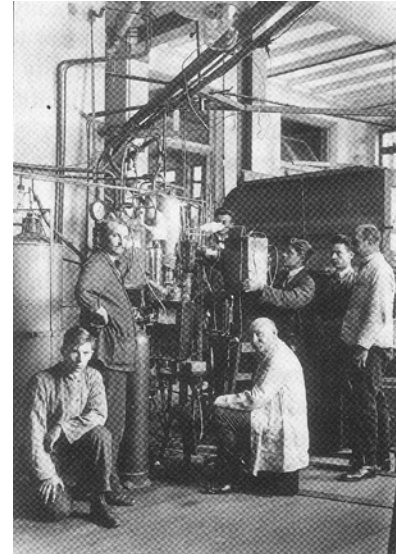
Univ. Leiden “Tieftemperatur-Monopol”

wiss. Publikat. / Einladung von Gastwissenschaftlern

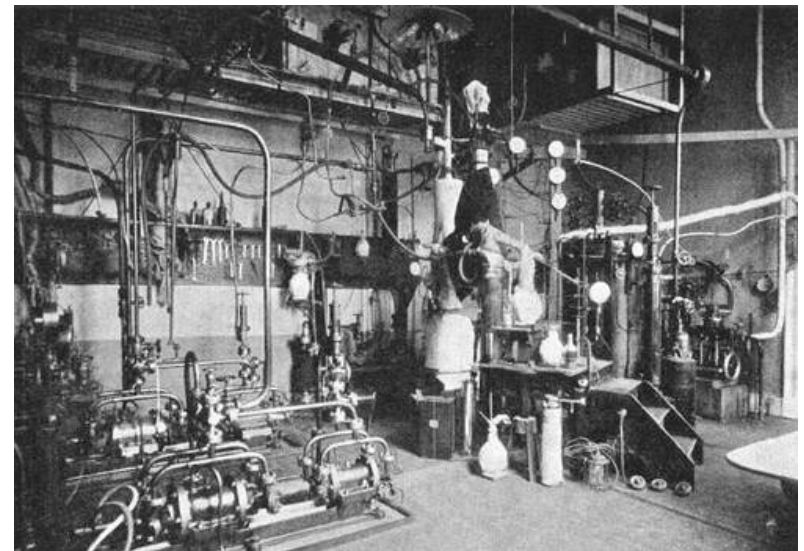
Entdeckung Supraleitung, Suprafluidität, ...



aus: Scurlock, History and Origin of Cryogenics



Cryogenic Laboratory of H.K. Onnes at Leyden



Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

Kopien Leiden-Anlage

1923 McLennan, Univ. Toronto

⇒ Helium aus militärischen Beständen

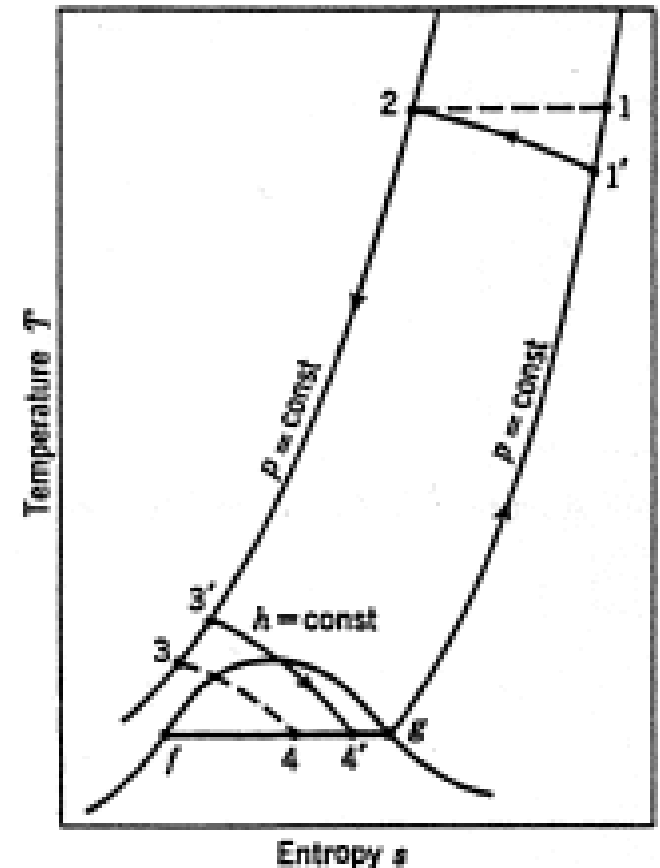
1925 W. Meißner, PTR Berlin

⇒ Helium aus Luftverflüssigung, C. v. Linde

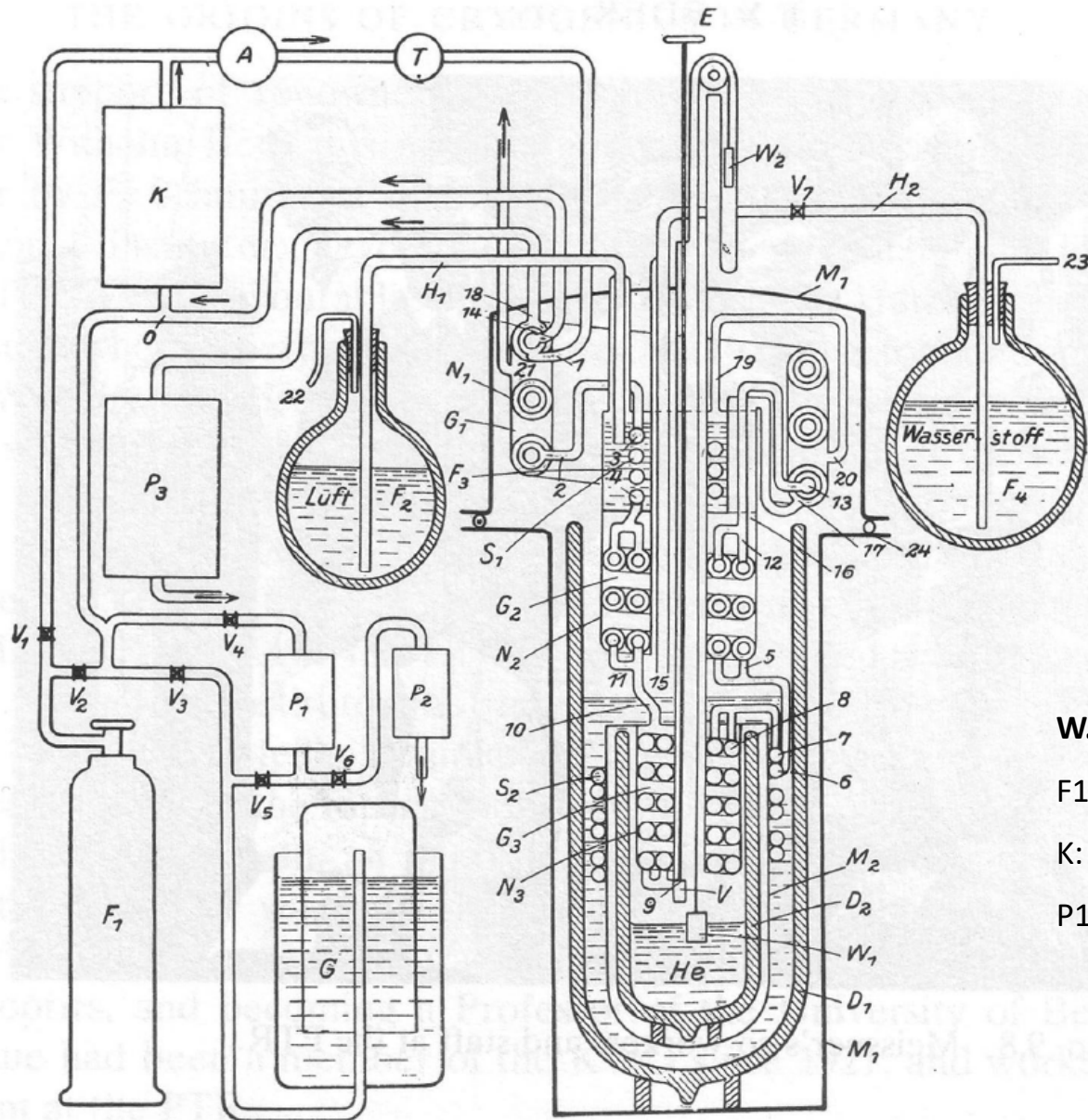
Verfahren: Vorkühlung mit fl. Luft / fl. Wasserstoff,

Gegenstrom-Wärmeübertrager,

dann Drosselung ins Zweiphasengebiet



Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere



W. Meißner, PTR Berlin (1925)

F1: Heliumvorrat;

K: Heliumkompressor;

P1 – P3: Vakuumpumpen

[F. Edescuty, 1992]

Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

Simon-Verflüssiger

Franz Simon (später Sir Francis Simon):

Student von Walter Nernst in Berlin,

seit 1930 Professor für Physikalische Chemie in Breslau

1933 Zwangs-Emigration nach Oxford

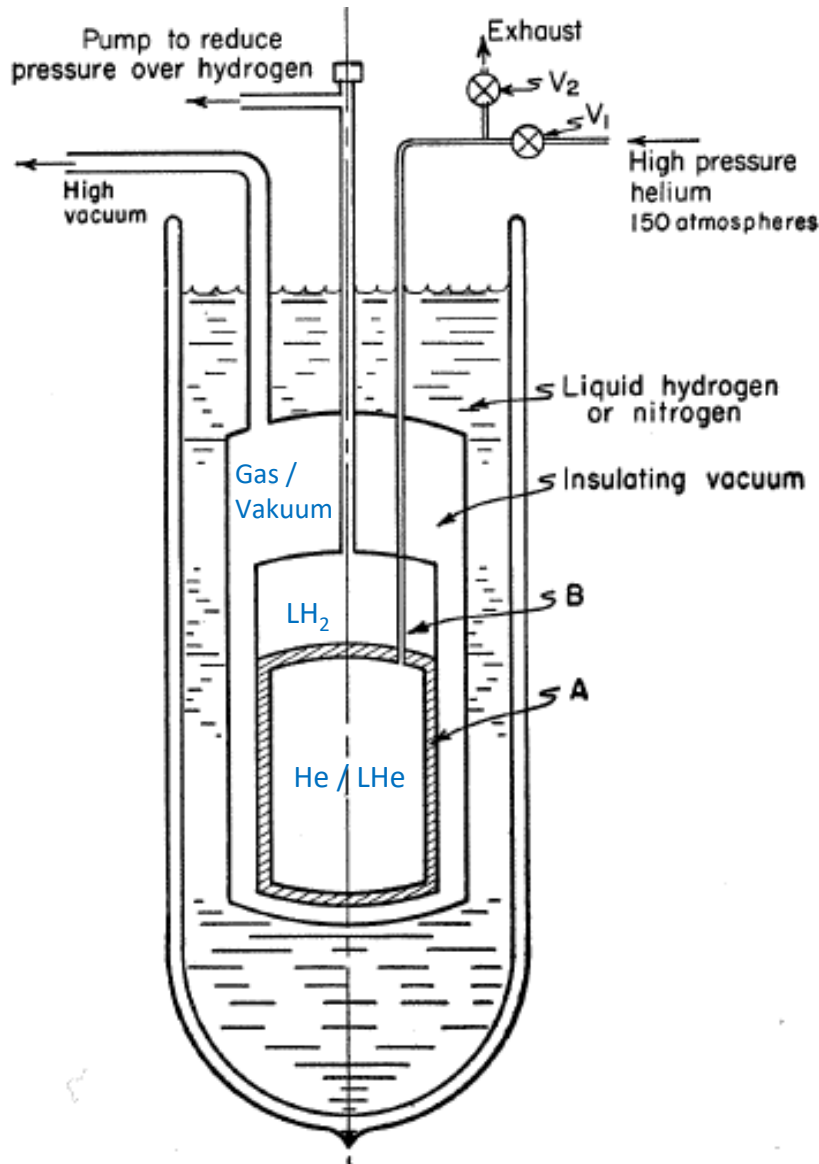


zwischen 1926 und 1932 wurde
von F. Simon ein neuartiger,
einfacher Heliumverflüssiger
entwickelt

Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

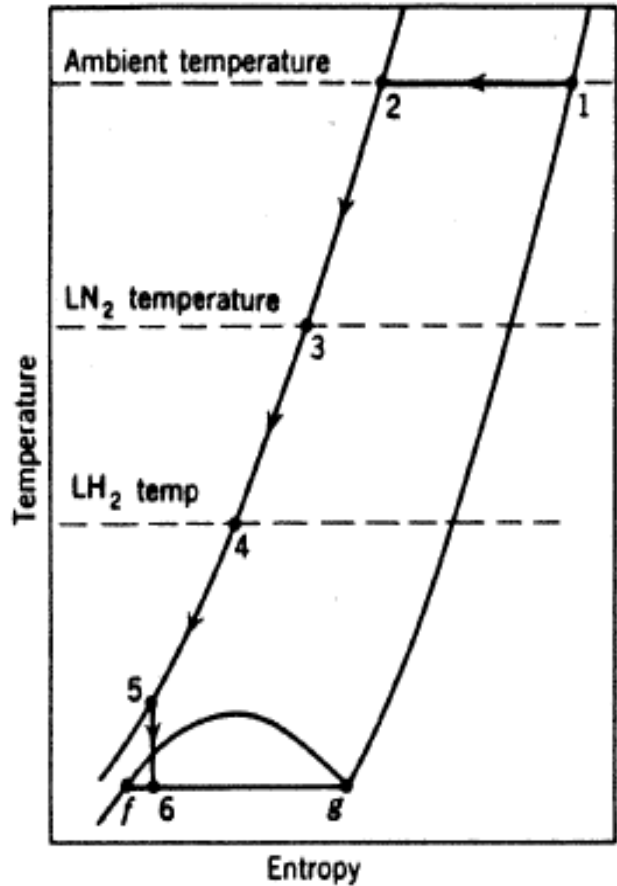
Simon-Verflüssiger

- 1) Kühlung des druckfesten Innenbehälters mit LN_2 / LH_2 , gleichzeitige Befüllung mit ~ 150 bar He
- 2) Abpumpen Kontaktgas (d.h., therm. Isolation)
- 3) Befüllung und anschließendes Abpumpen des LH_2 -Volumens ($T = 10 \dots 12$ K), dadurch weitere He-Einkondensation
- 4) isentrope Entspannung des vorgekühlten He via $V_2 \Rightarrow$ Innenbehälter zu 80 ... 100 % mit LHe gefüllt

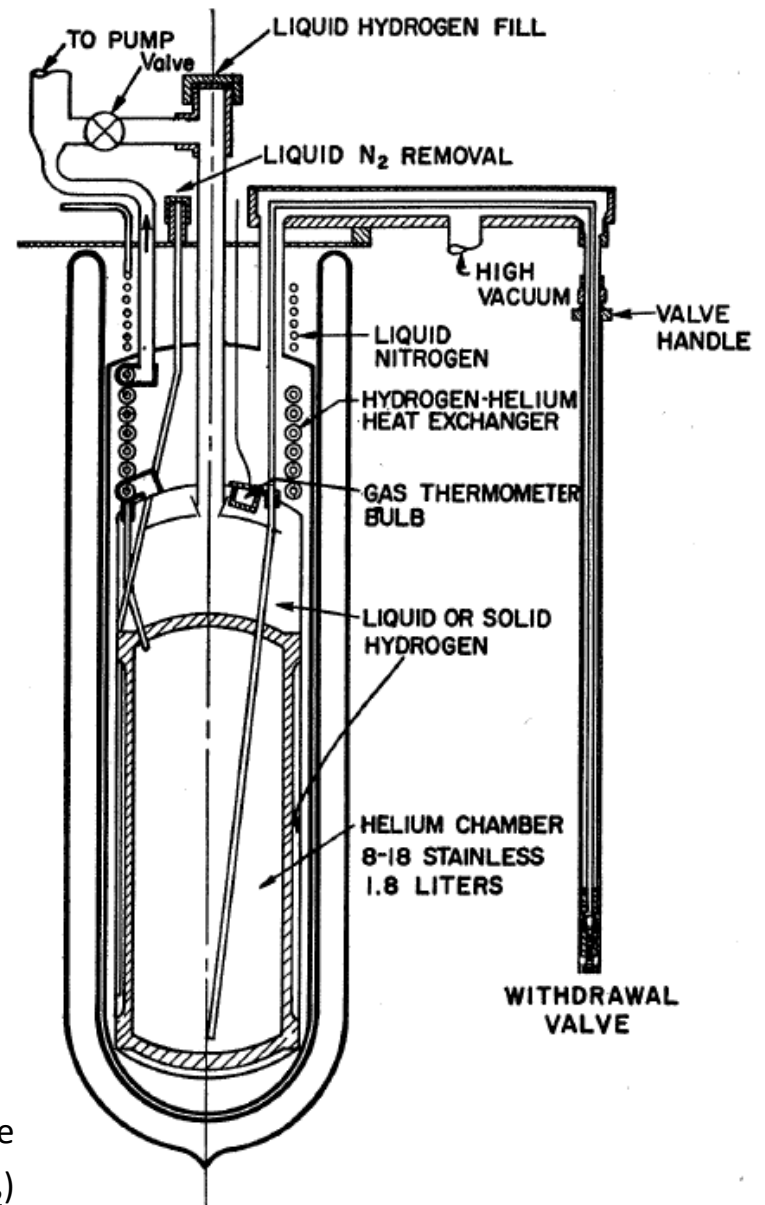


Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

Simon-Verflüssiger



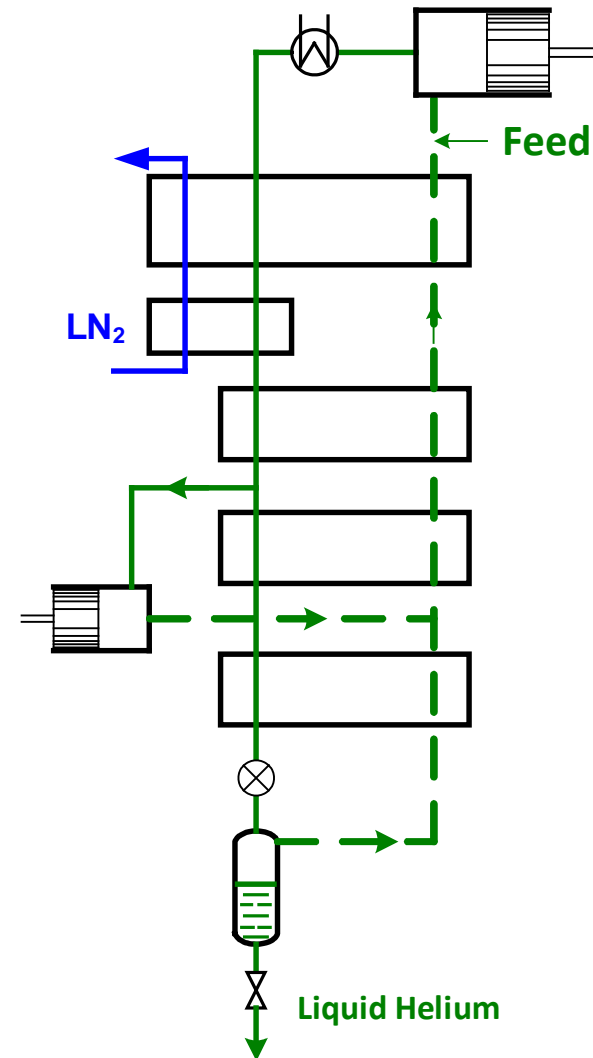
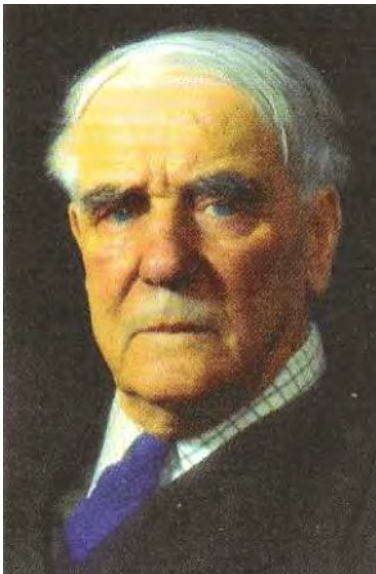
verbesserte Apparatur mit Nutzung H₂-Kaltgasenthalpie
(1,5 l LHe/Zyklus bei Verbrauch 3 l LH₂)



Heliumverflüssigung: Kolbenexpander-Anlagen

Kolbenexpander

P. L. Kapitza, Cambridge (UK):
Einführung Kolbenexpander



Heliumverflüssigung: Kolbenexpander-Anlagen

Kolbenexpander

arbeitsleistende Entspannung zur Kälteerzeugung

Nächster Technologieschritt:

W. Meißner, TH München, 1937

durch Fa. Linde ab 1956

serienmäßig gefertigt

Kapazität 3 ... 8 l/h



Photo: Ch. Haberstroh

Heliumverflüssigung: Kolbenexpander-Anlagen

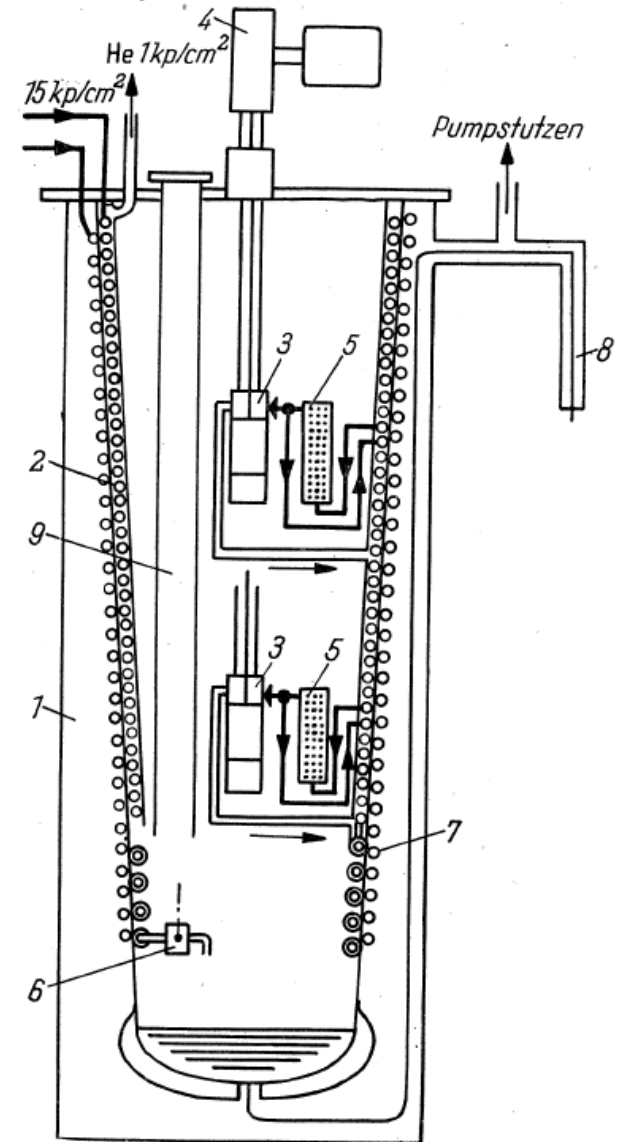
Durchbruch zum kommerziellen Verflüssiger



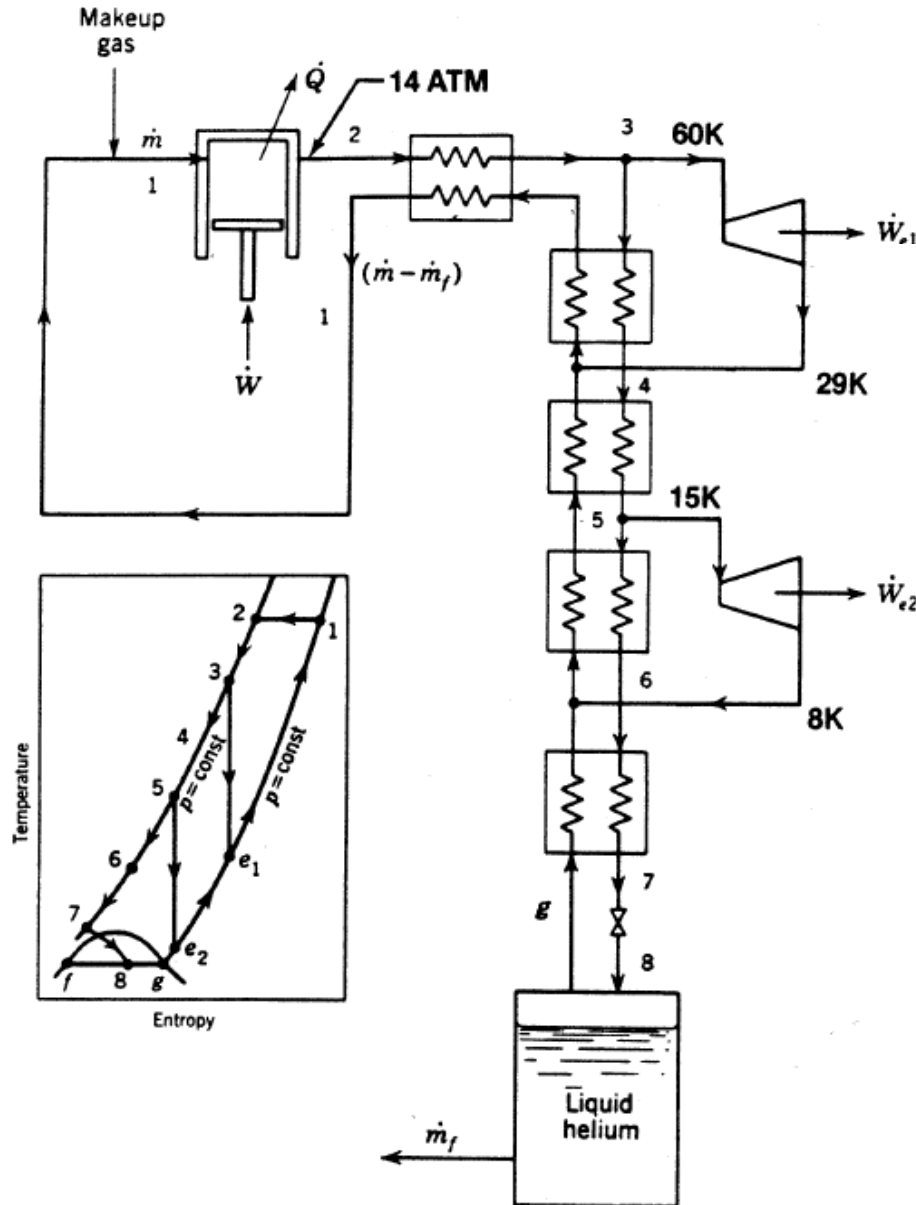
Prof. Sam Collins,
MIT/Boston
1946

- 1, 2: Coldbox mit Gegenstrom-WÜ
- 3, 4: Kolbenexpander zweistufig
- 5: Adsorber
- 6: J-T - Ventil

Kapazität ca. 10 l/h



Heliumverflüssigung: Kolbenexpander-Anlagen



Verfahren

arbeitsleistende Entspannung
(isentrop)

+

J-T-Stufe (isenthalp)

= Claude Cycle

Heliumverflüssigung: Kolbenexpander-Anlagen

Bedeutung

von 1946 – 1964 etwa 250 Stk. verkauft;

“Revolution” in der Tieftemperaturforschung

Hersteller:

A.D. Little Company \Rightarrow 500 Inc. \Rightarrow CTi

\Rightarrow HPS \Rightarrow KPS \Rightarrow PSI \Rightarrow CPS/Linde

Anlage bis heute im Kern unverändert;

Verflüssigungsleistung:

5 ... 50 l/h ohne LN₂

12 ... 70 l/h mit LN₂-Vorkühlung



Heliumverflüssigung: J-T-Kreislauf mit Stirling-Kältemaschinen

Fa. Philips, Eindhoven

Heliumverflüssiger auf Basis zweier
Stirling-Kältemaschinen

Kapazität $\sim 10 \text{ l/h}$

etwa 70 Anlagen gebaut (70er Jahre)

Verfahren:

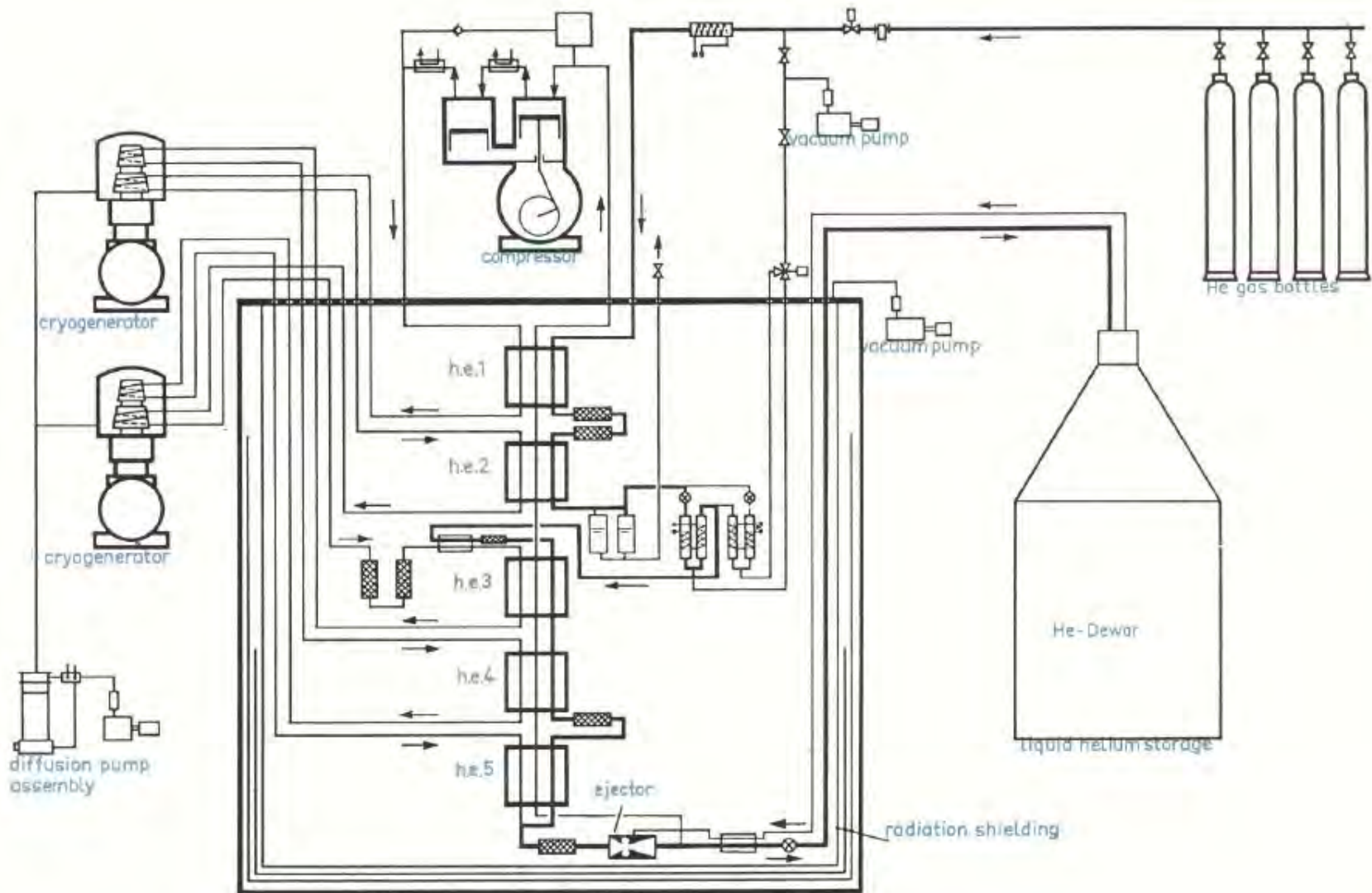
1.: Vorkühlung an Stirling-Kalkopf;
(110 K / 65 K / 30 K / 15 K)

2.: J-T-Entspannung



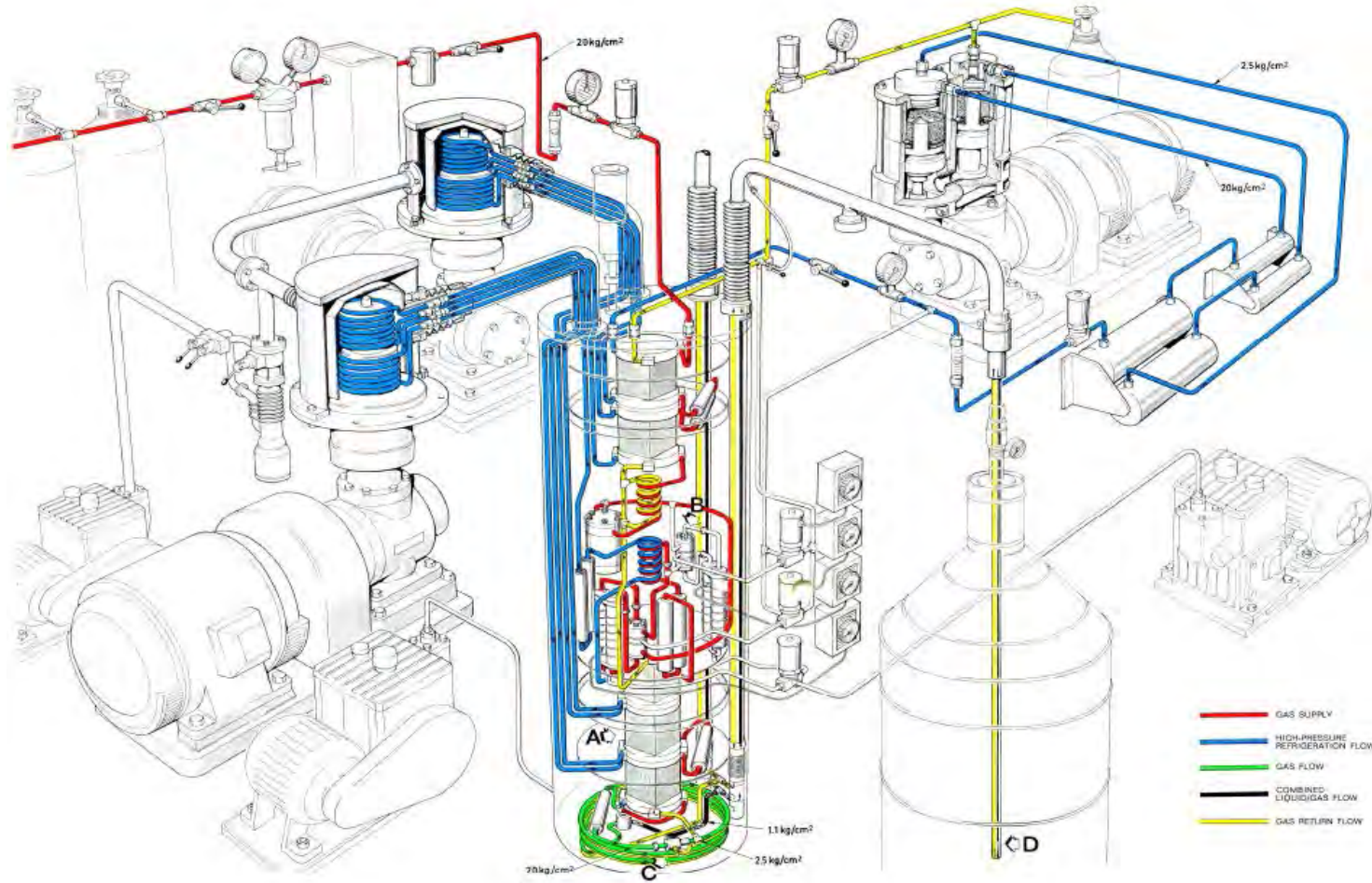
Philips, Eindhoven

Heliumverflüssigung: J-T-Kreislauf mit Stirling-Kältemaschinen



Philips, Eindhoven

Heliumverflüssigung: J-T-Kreislauf mit Stirling-Kältemaschinen



Philips, Eindhoven

Philips-Verflüssigers PLHe 209, Schaubild mit Verflüssiger-Coldbox (zentral), Stirling-Kältemaschinen (links) und Kreislaufkompressor (links) und Nebenaggregaten

markiert: Heliumzufuhr und -reinigung (rot), Helium-Kältekreislauf (blau), Helium tiefkalt (grün), Ausgangsstrom zweiphasig (schwarz), Rückgasstrom aus Vorlagedewar bzw. Verbindung zum Pufferbehälter (gelb)

Expansionsturbinen

Motivation:

isentropische Expansion ohne
mech. aufwändige
Kolbenmaschine

Schwierigkeiten:

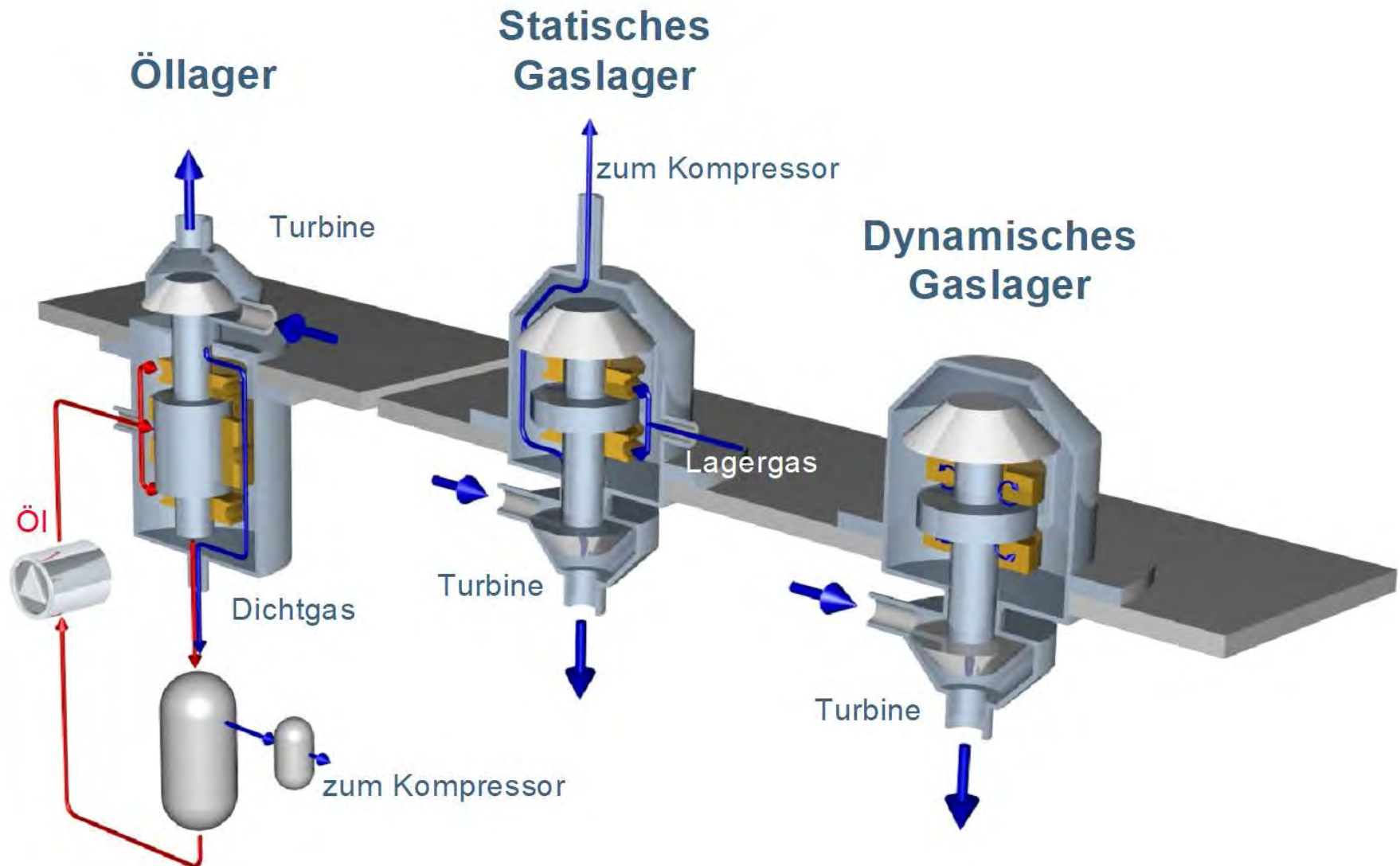
- geringe Massenströme
- hohe Umfangsgeschwindigkeiten
- benötigte hohe isentrope Wirkungsgrade



Drehzahlen bis zu 5400 s^{-1}

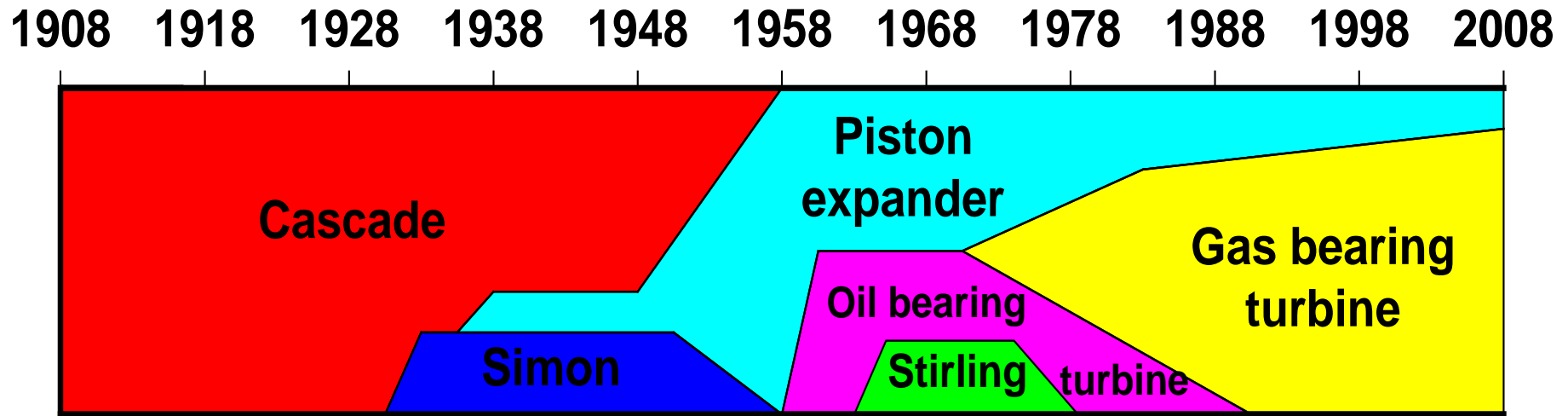
↙ Öl- bzw. Gaslager

Heliumverflüssigung: Turbinenanlagen



Heliumverflüssigung: zeitliche Entwicklung

“Evolution” Prozesse / Komponenten



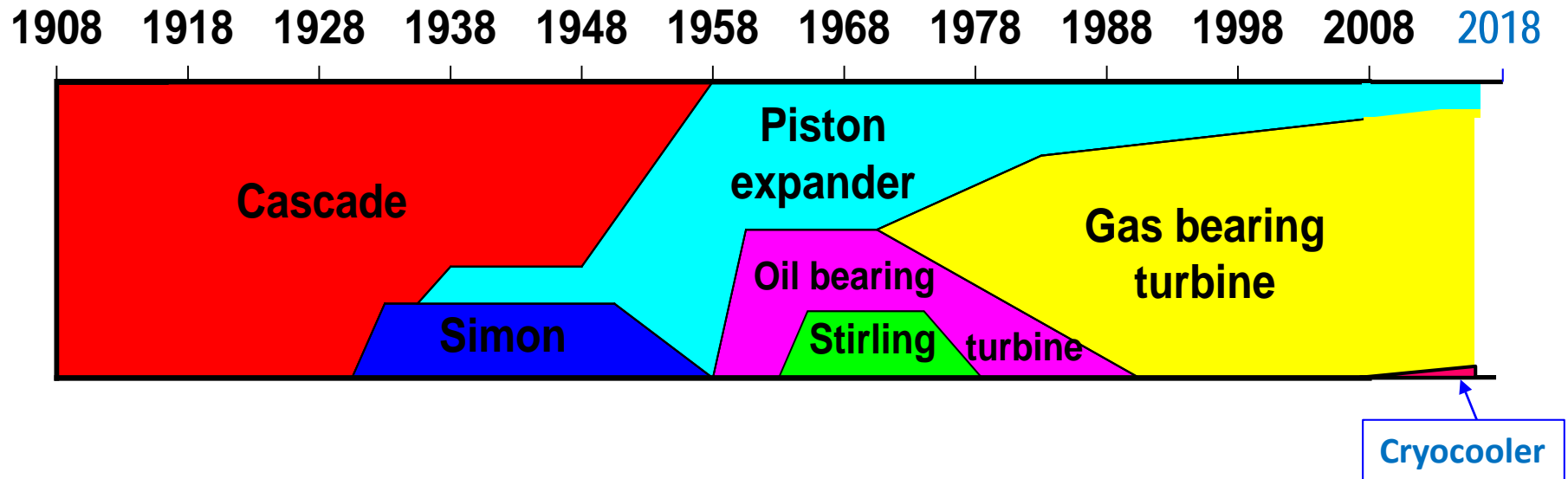
Darstellung: H. Quack

⇒ klarer Trend in Richtung Turbinenanlagen mit Gaslager;
konstanter “Restanteil” Collins-Kolbenexpanderanlagen

Konzentration auf Hersteller mit entsprechender Eigenentwicklung

Heliumverflüssigung: zeitliche Entwicklung

“Evolution” Prozesse / Komponenten



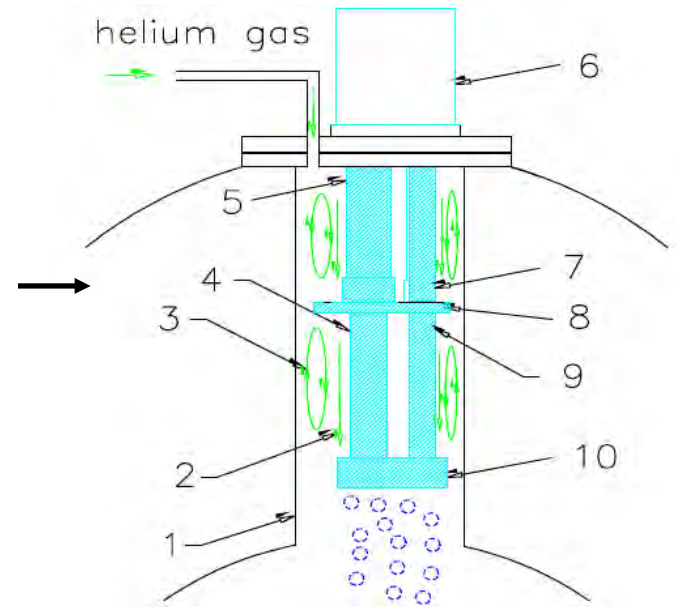
neu: Helium-Rückverflüssigung mittels **Cryocooler**

Gifford-McMahon oder Pulse Tube
2-stufig (45 K / 3.9 K)

Heliumverflüssigung: Cryocooler



Cryocooler platziert
im Halsrohr des
Dewarbehälters



Chao WANG, www.cryomech.com

HeRL15: > 15 l/Tag 1,5 W @ 4,2 K, $P_{el} = 9,2$ kW

HeRL60: > 60 l/Tag 3 x 2 W @ 4,2 K, $P_{el} = 34,2$ kW

ca. 14 kWh / l_{LHe}

LOT Quantum Design, www.lot-qd.com

ALT - 80: ~ 12 l/Tag SHI cooler, $P_{el} = 3,8 - 5,4$ kW

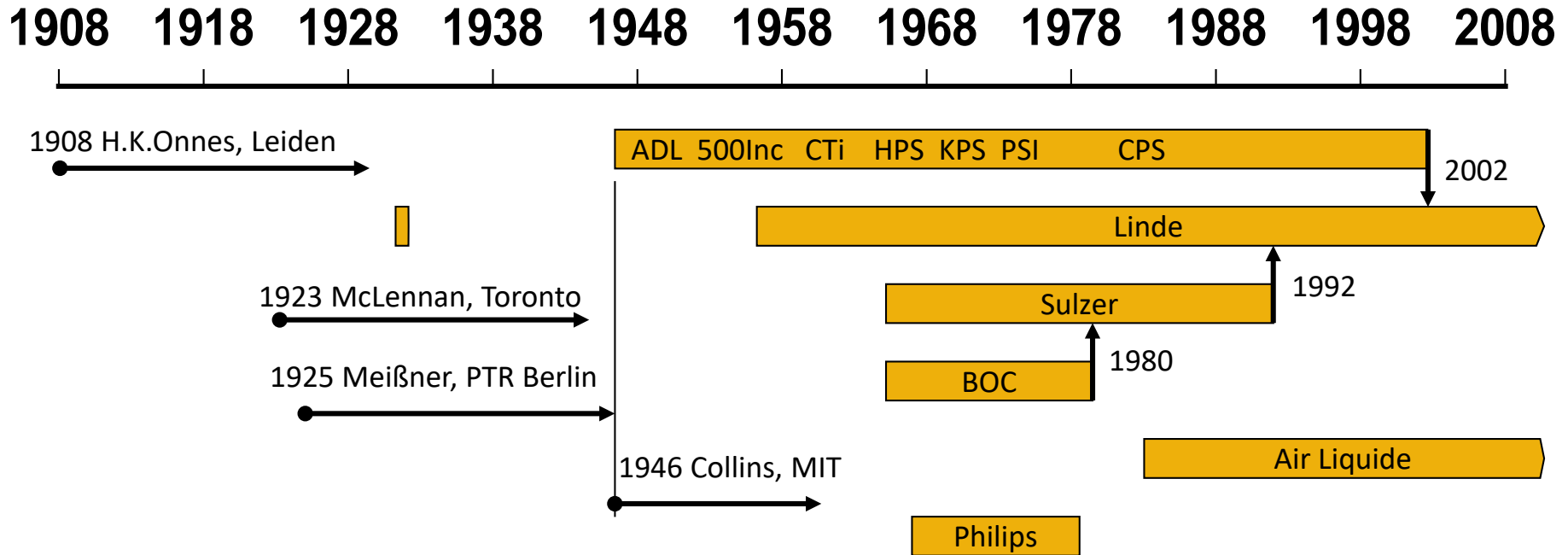
ALT-160: ~ 30 l/Tag SHI cooler, $P_{el} = 6,5 - 7,5$ kW

Gerätekosten: ca. 100 000 300 000 € + Service jährlich



Heliumverflüssigung: zeitliche Entwicklung

“Evolution” Herstellerfirmen



Musterbeispiel für exzellente Kooperation zwischen Forschung und Industrie;

Fortschritte

a) durch anspruchsvolle Kunden / Großforschung (CERN, DESY, ESS, ...)

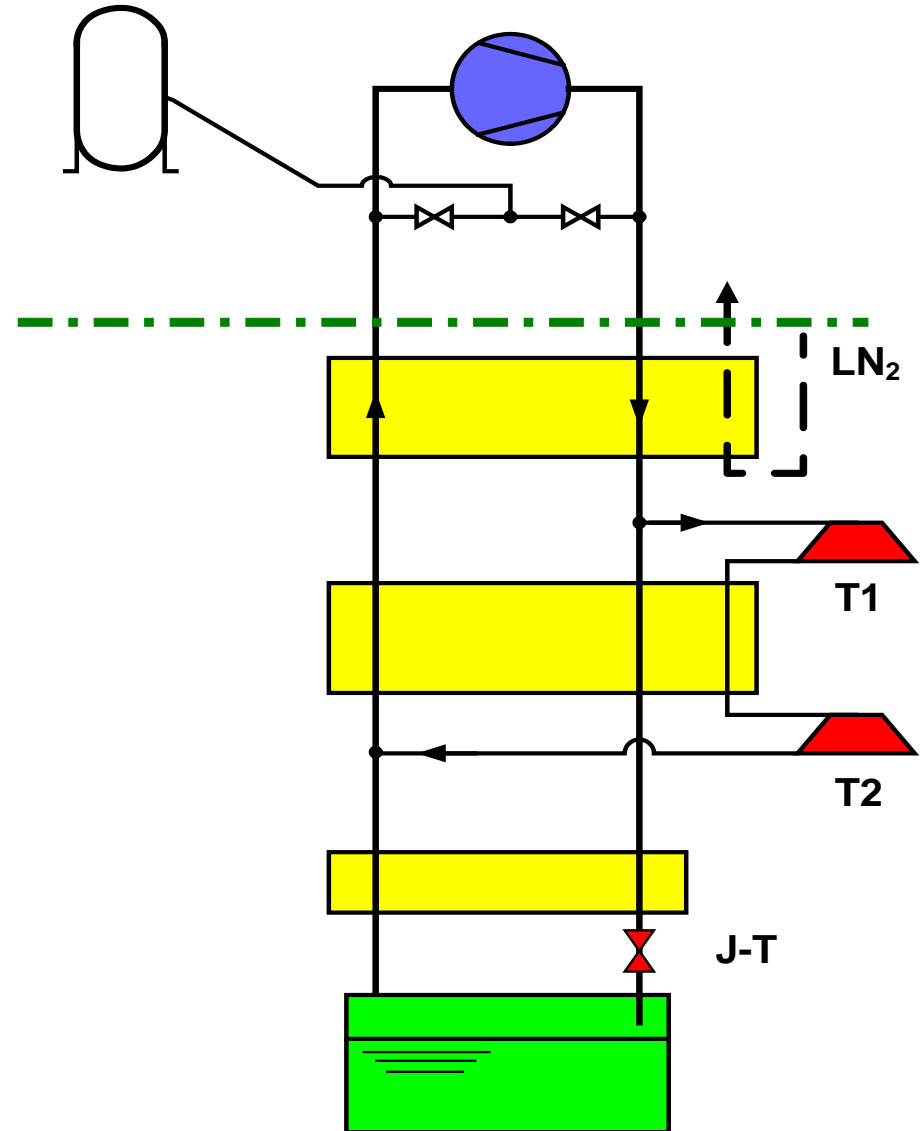
b) durch universitäre Begleitung

Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

typisches Fließbild

(modifizierter Claude-Prozess)

- warmer Kreislaufverdichter
- Puffertank (Helium hochrein)
- Gegenstrom-WÜ
- optional LN₂-Vorkühlung
- 2 Expansionsturbinen
- J-T-Ventil



Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

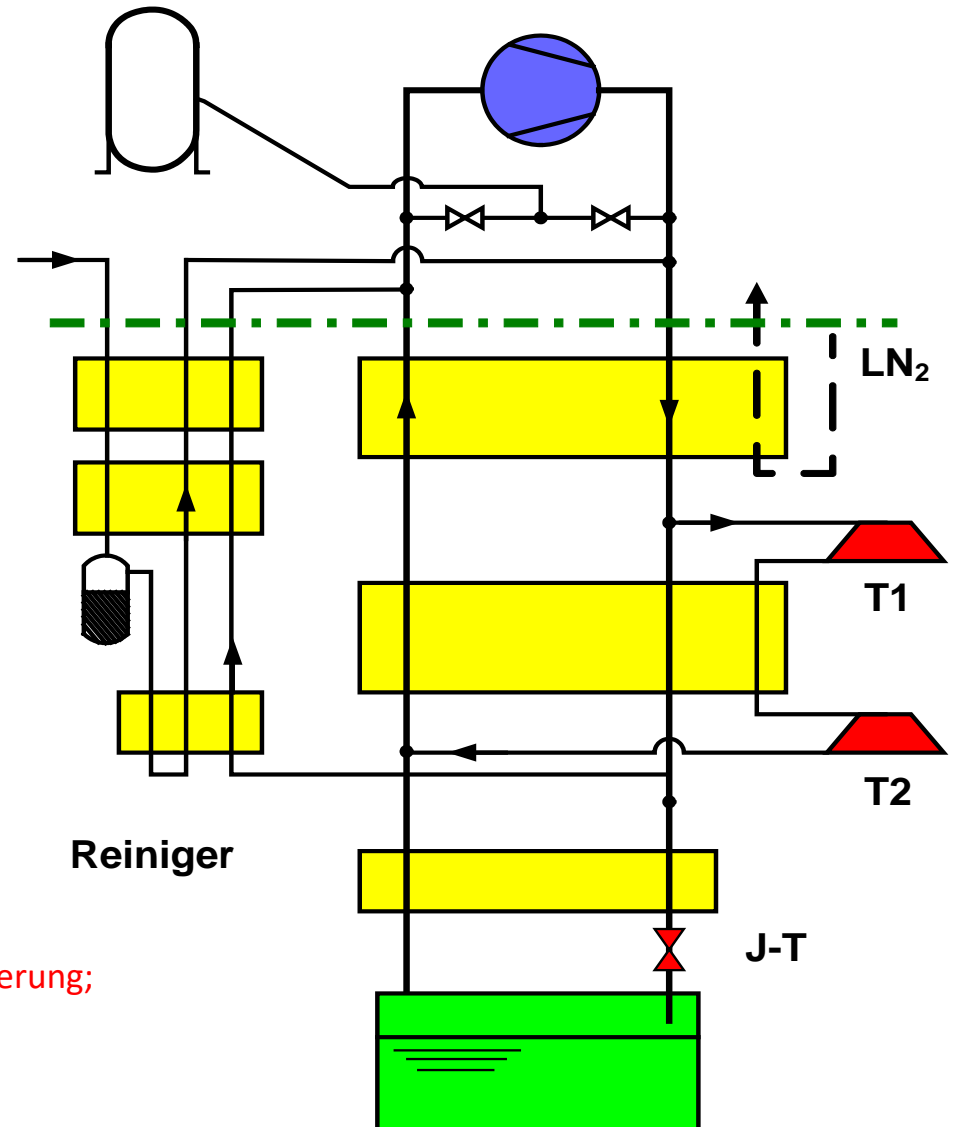
typisches Fließbild

(modifizierter Claude-Prozess)

- warmer Kreislaufverdichter
- Puffertank (Helium hochrein)
- Gegenstrom-WÜ
- optional LN₂-Vorkühlung
- 2 Expansionsturbinen
- J-T-Ventil
- integrierter Reiniger
Ausfrieren von
Verunreinigungen,
max. ca. 3 vol-%

- spezifischer Leistungsbedarf:
4 2 kWh / l_{LHe}

aufwändige Steuerung;
störungsanfällig



Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Kreislaufverdichter

Schraubenverdichter einstufig

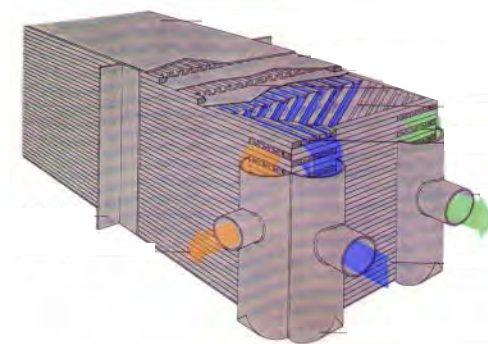
1,05 bar → ca. 14 bar

ölgeschmiert



Wärmeübertrager

Aluminium-Plattenwärmeübertrager
vakuumgelötet



Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Aluminum Platten-Wärmeübertrager:

- sehr zuverlässig
- exzellente Effektivität ($\Delta T_{\text{ein/aus}} \approx 3 \text{ K}$)

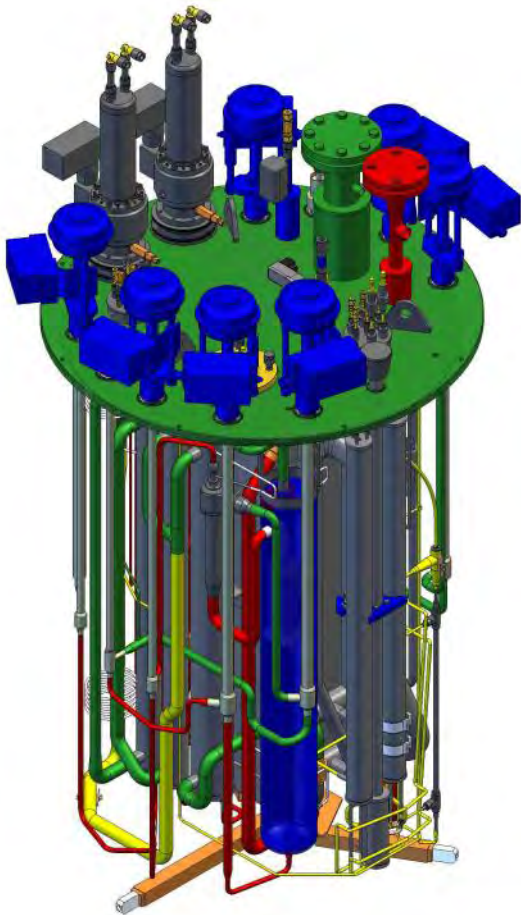


Quelle: Linde Schalchen

Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

Coldbox

- vakuumisoliert
- alle Komponenten an Deckelflansch montiert
(minimale Wärmebrücken; leicht demontierbar)



Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

Expansionsturbinen

axiale und radiale Gaslager; Drehzahl typ. 4500 s^{-1}



Optimierung hinsichtlich

- Geometrie Lauf- / Leiträder
- Spaltverluste
- Wärmeeinträge

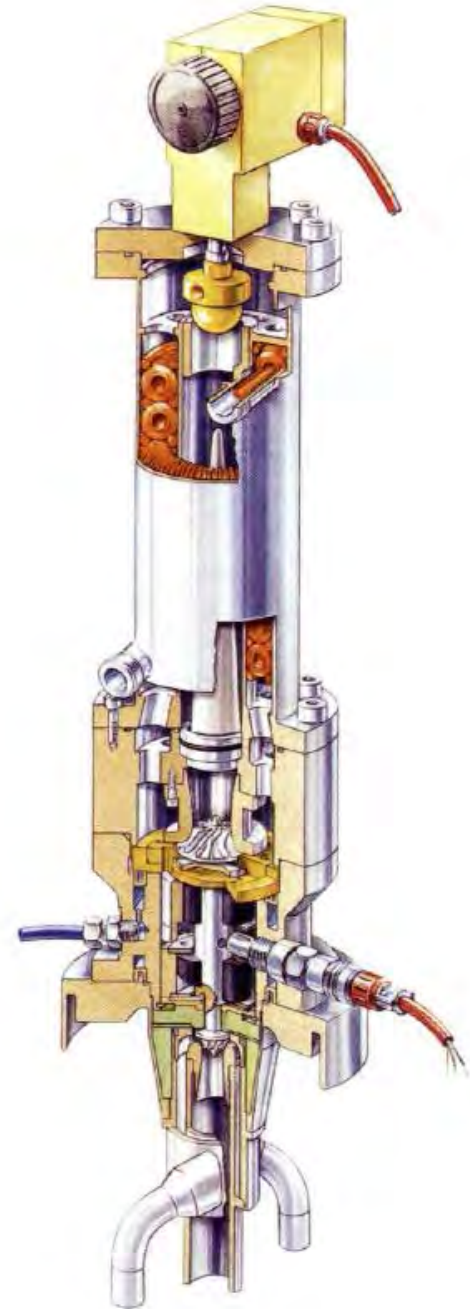
isentropischer Wirkungsgrad

früher: $\eta_s \approx 65 \%$

heute: $\eta_s \approx 75 \dots 80 \%$

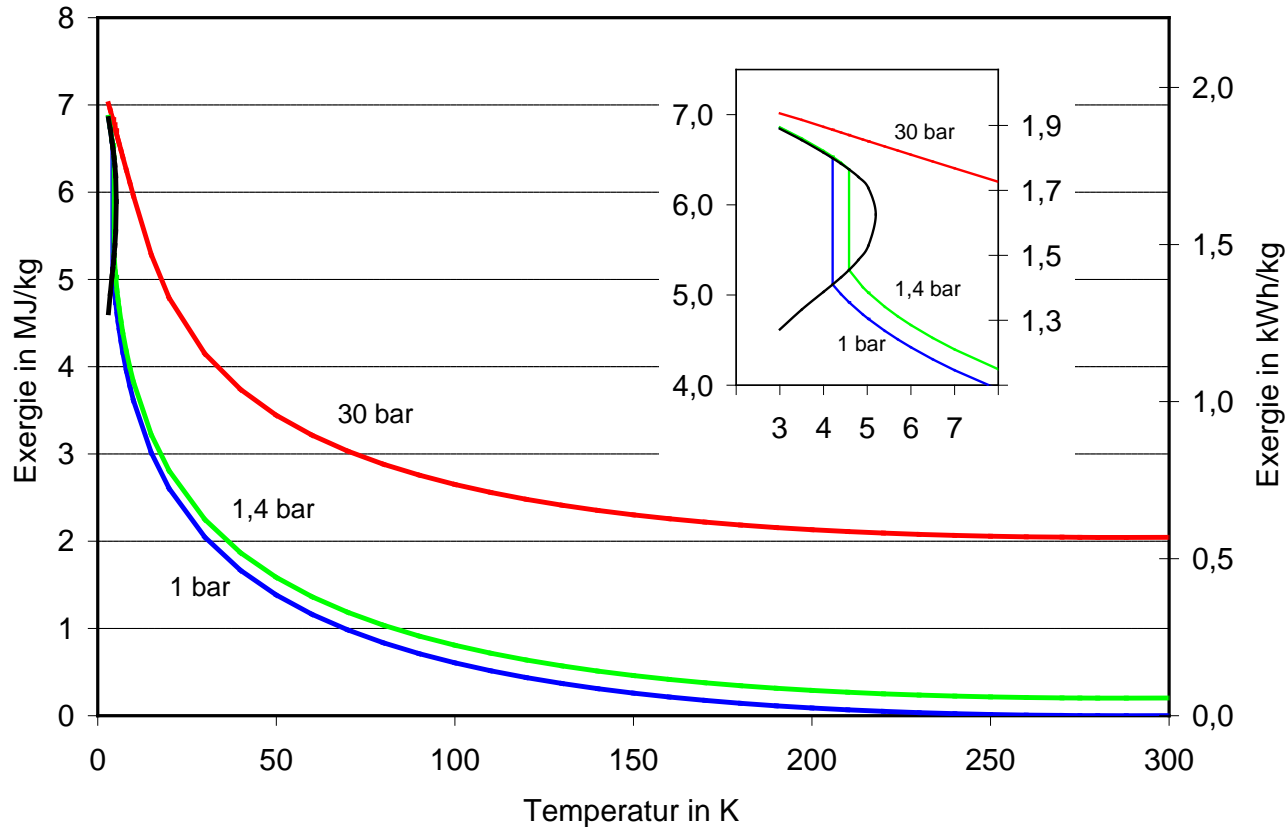
⇒ Steigerung Verflüssigungs- bzw.
Kälteleistung um Faktor 1,5 ... 2

heutige Maximalwerte: $\eta_s \approx 85 \dots 86 \%$



Heliumverflüssigung: maximal erreichbare Effizienz

Exergieanalyse

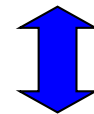


$$E_{\min} = m \cdot [h_o - h_u - T_u \cdot (s_o - s_u)] = m \cdot (e_o - e_u)$$

vollständige Verflüssigung

(ab 1 bar/300 K):

min. 1,81 kWh/kg



Bestwert heutige Verflüssiger

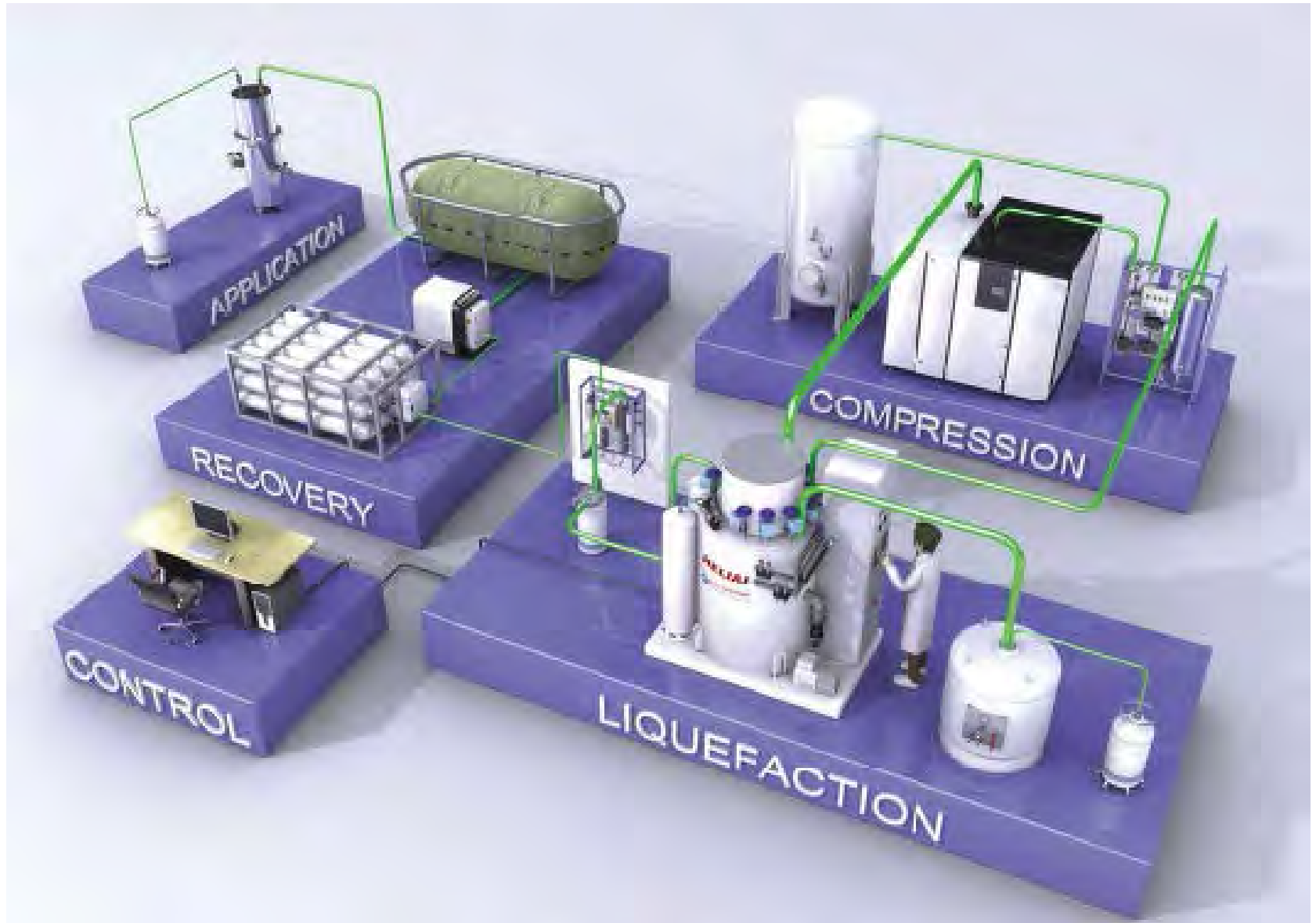
(Kapazitätsklasse

20 ... 100 l/h):

ca. 16 kWh/kg

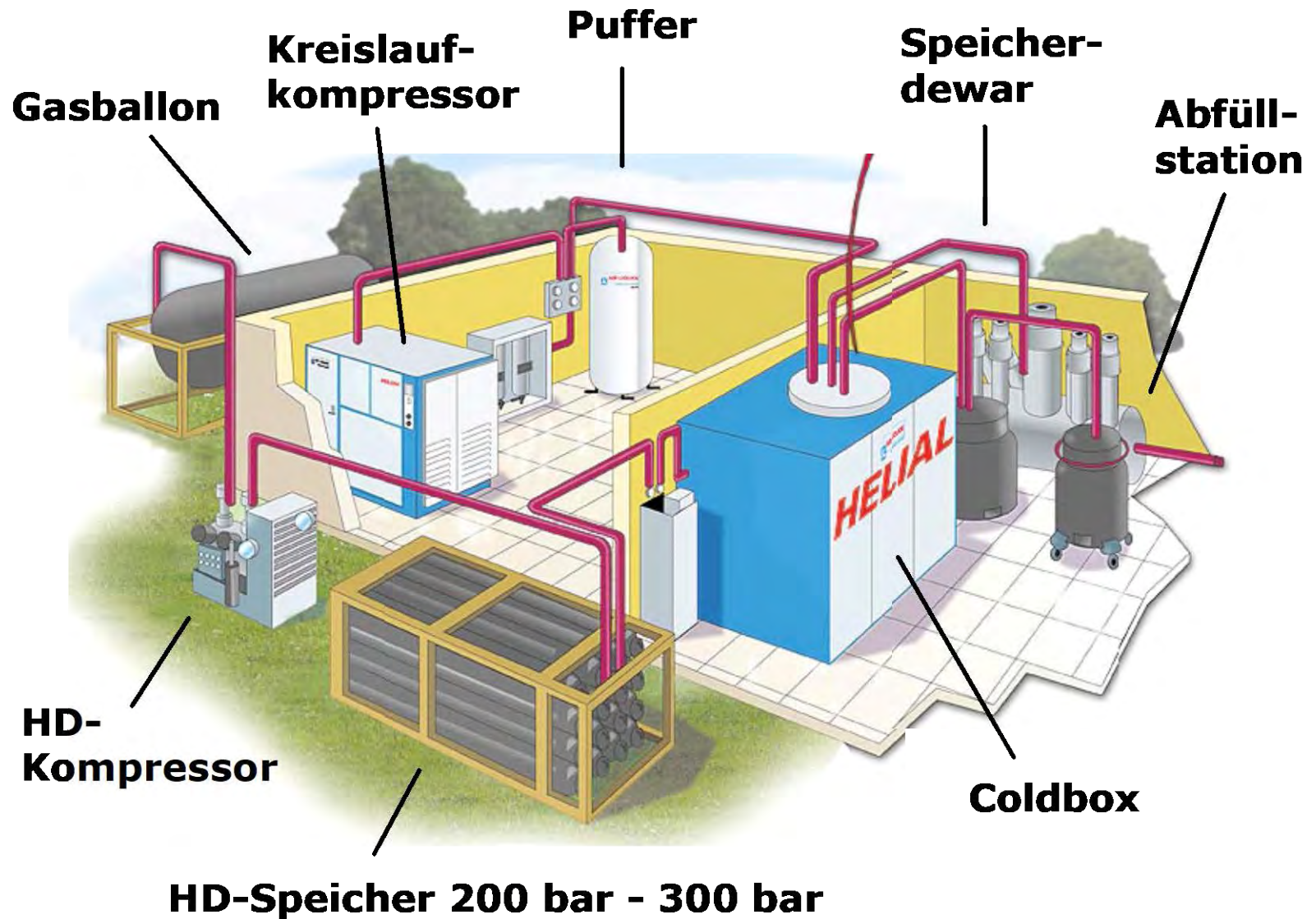
= 2 kWh/l_{LHe}

Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Graphik: Air Liquide

Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Graphik: Air Liquide

Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Heliumverflüssiger TU Dresden (MOL 110)
technischer Stand: ~ 80er Jahre

ca. 28 l/h
 $P_{el} = 127 \text{ kW}$

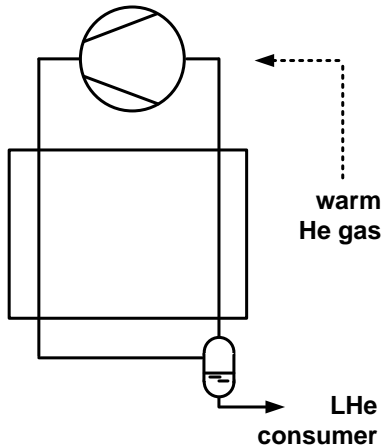
Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Heliumverflüssiger IFW Dresden
technischer Stand: ~ 2005

ca. 44 l/h
 $P_{el} = 90 \text{ kW}$

Unterschied Verflüssiger - Refrigerator



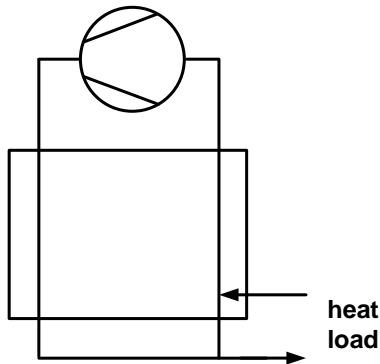
Verflüssiger

meist nur Verdampfungsenthalpie genutzt (20,4 kJ/kg)

(Aufwärmung Kaltgas: 1500 kJ/kg)

Standard-Verflüssiger: 10 ... 200 l/h

Industrieverflüssiger: ~ 1000 ... 4000 l/h



Refrigerator

Kühllast (z.B. Beschleunigerkryostat) mittels Transferleitung
fest angeschlossen inkl. Kaltgas-Rücklauf

0.1 ... 20 kW @ 1,8 ... 5 K

Helium-Großanlagen



CERN,
LHC Cold Box
18 kW @ 4,5 K

33 kW @ 50 K ... 75 K
(Schildkühlung, refriger.)

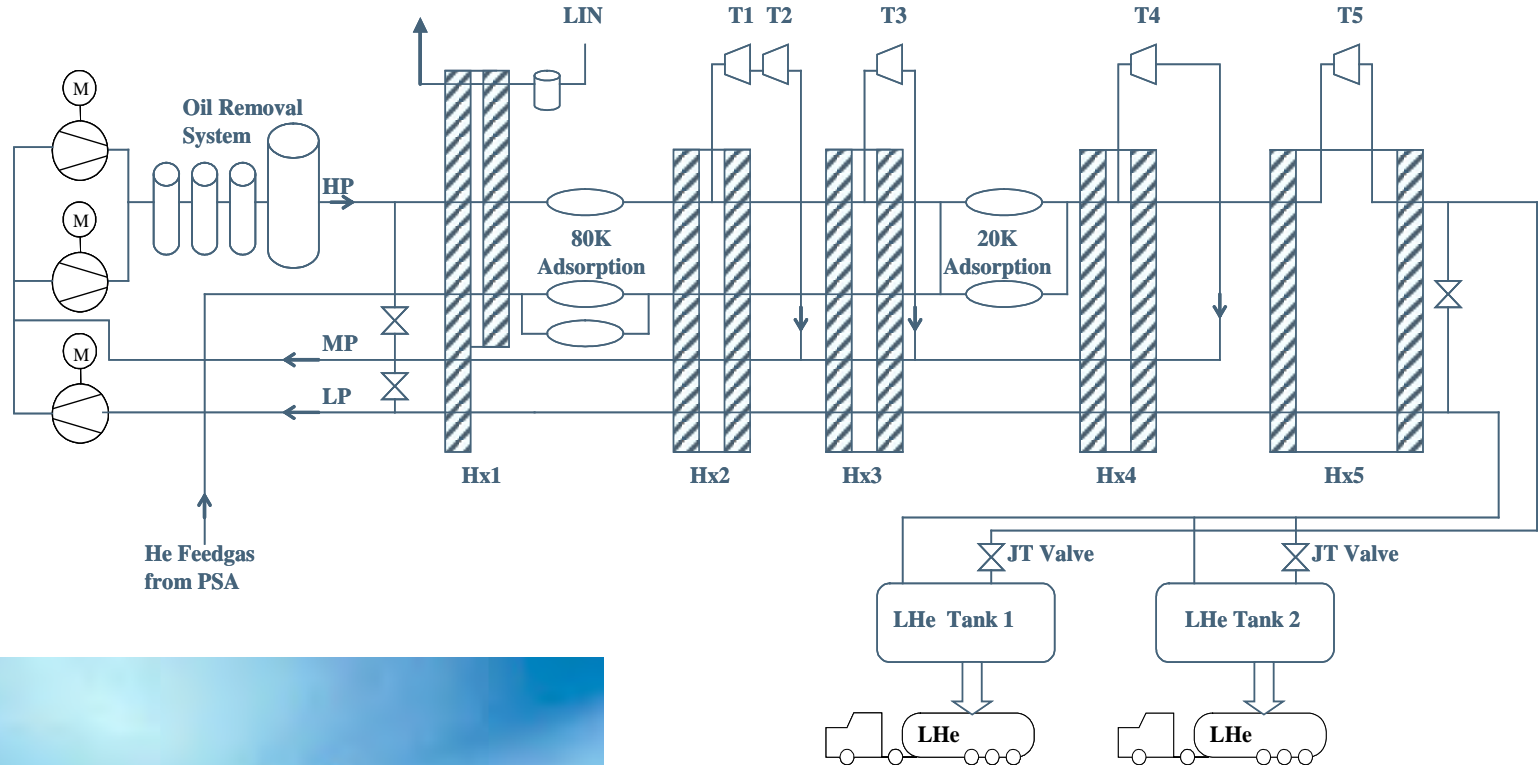
+

23 kW @ 4.6 K ... 20 K
(Schildkühlung, refriger.)

+

41 g/s Verflüssiger-
entnahme

Helium-Großanlagen



Skikda, Algerien: in Betrieb seit 2006

Erdgas-Verflüssigung inkl. Heliumabtrennung und Verflüssigung ($3000 \text{ l}_{\text{LHe}}/\text{h}$);

11 000 gal LHe-Trailer

Quelle: Linde Kryotechnik, Pfungen