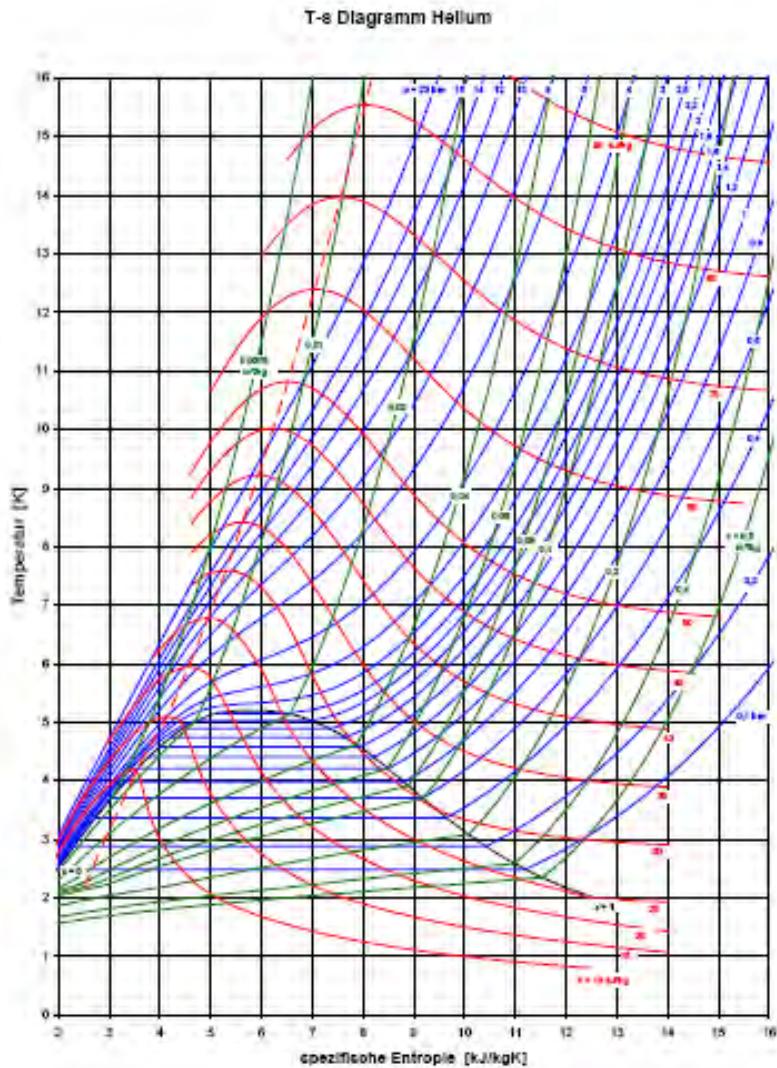


# Heliumverflüssigung – Geschichte und Technologie

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*

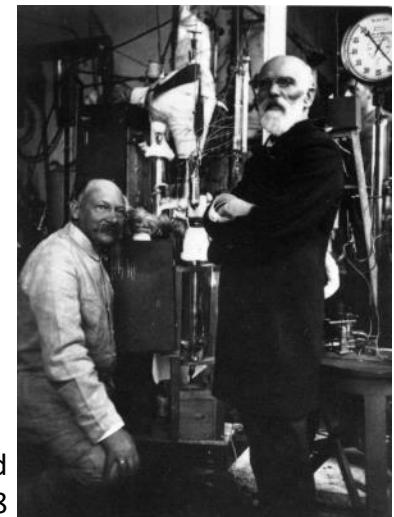
Abschätzung kritischer Punkt:

(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

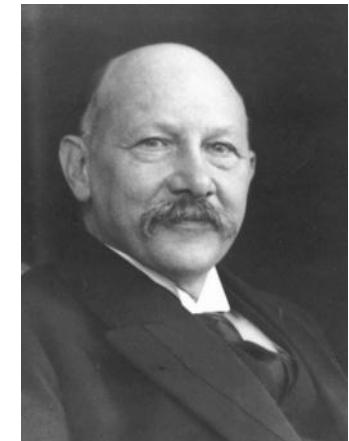
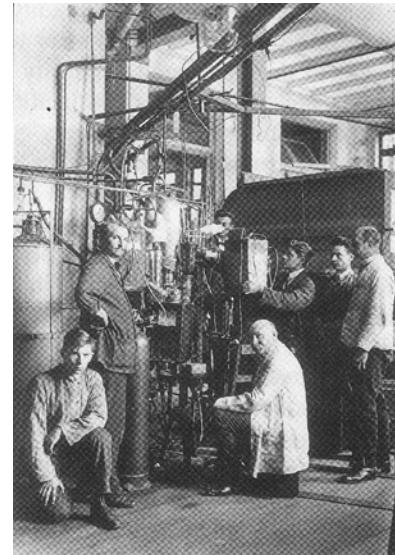
## Heike Kamerlingh Onnes

erste Heliumverflüssigung in Leiden am 10. Juli 1908

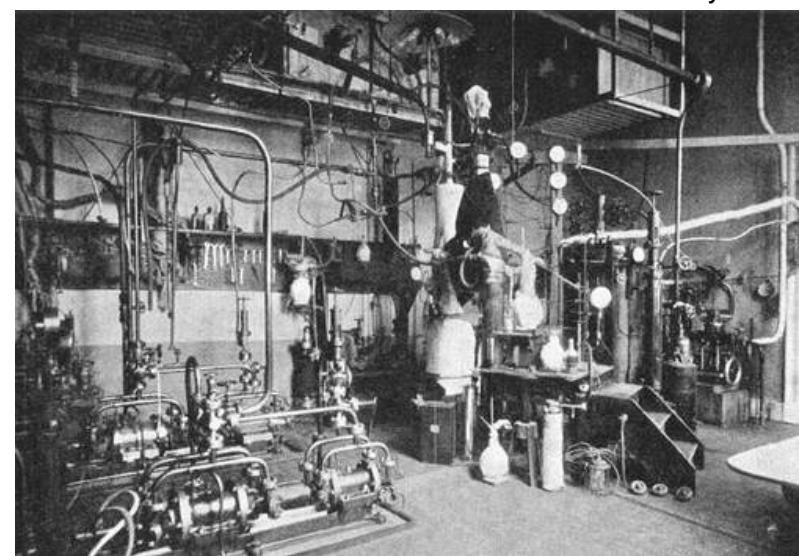
- lange, geduldige Vorarbeiten
- eigens Aufbau und Ausbildung eines Stabs von Mitarbeitern
- Gründung Glasbläser-/Instrumentenbauerschule  
⇒ Heliumbeschaffung aus Monazitsand  
(360 l gasf.)

folgende 15 Jahre:

Univ. Leiden “Tieftemperatur-Monopol”  
wiss. Publikat. / Einladung von Gastwissenschaftlern  
Entdeckung Supraleitung, Suprafluidität, ...



aus: Scurlock, History and Origin of Cryogenics



# Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

## Kopien Leiden-Anlage

1923 McLennan, Univ. Toronto

⇒ Helium aus militärischen Beständen

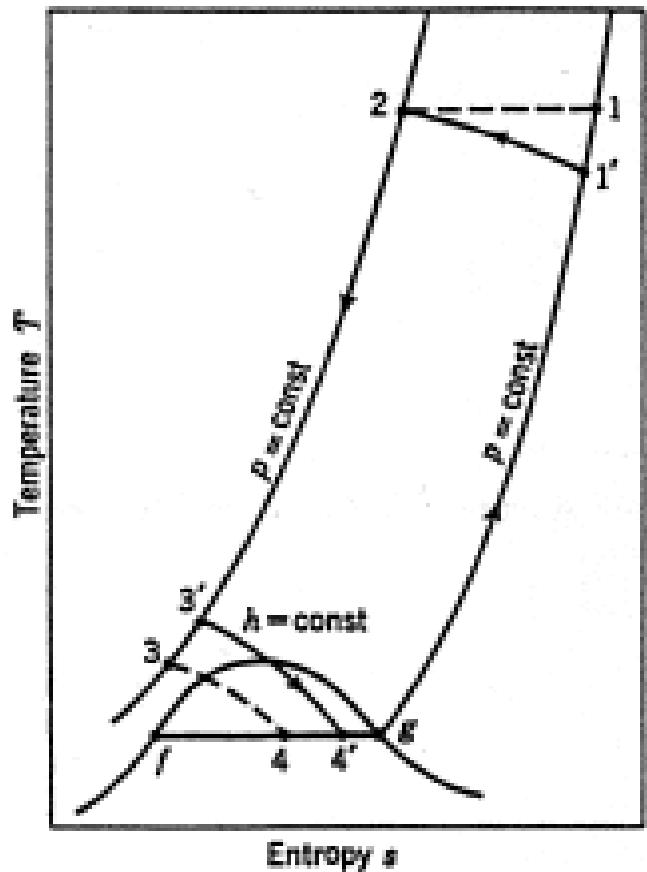
1925 W. Meißner, PTR Berlin

⇒ Helium aus Luftverflüssigung, C. v. Linde

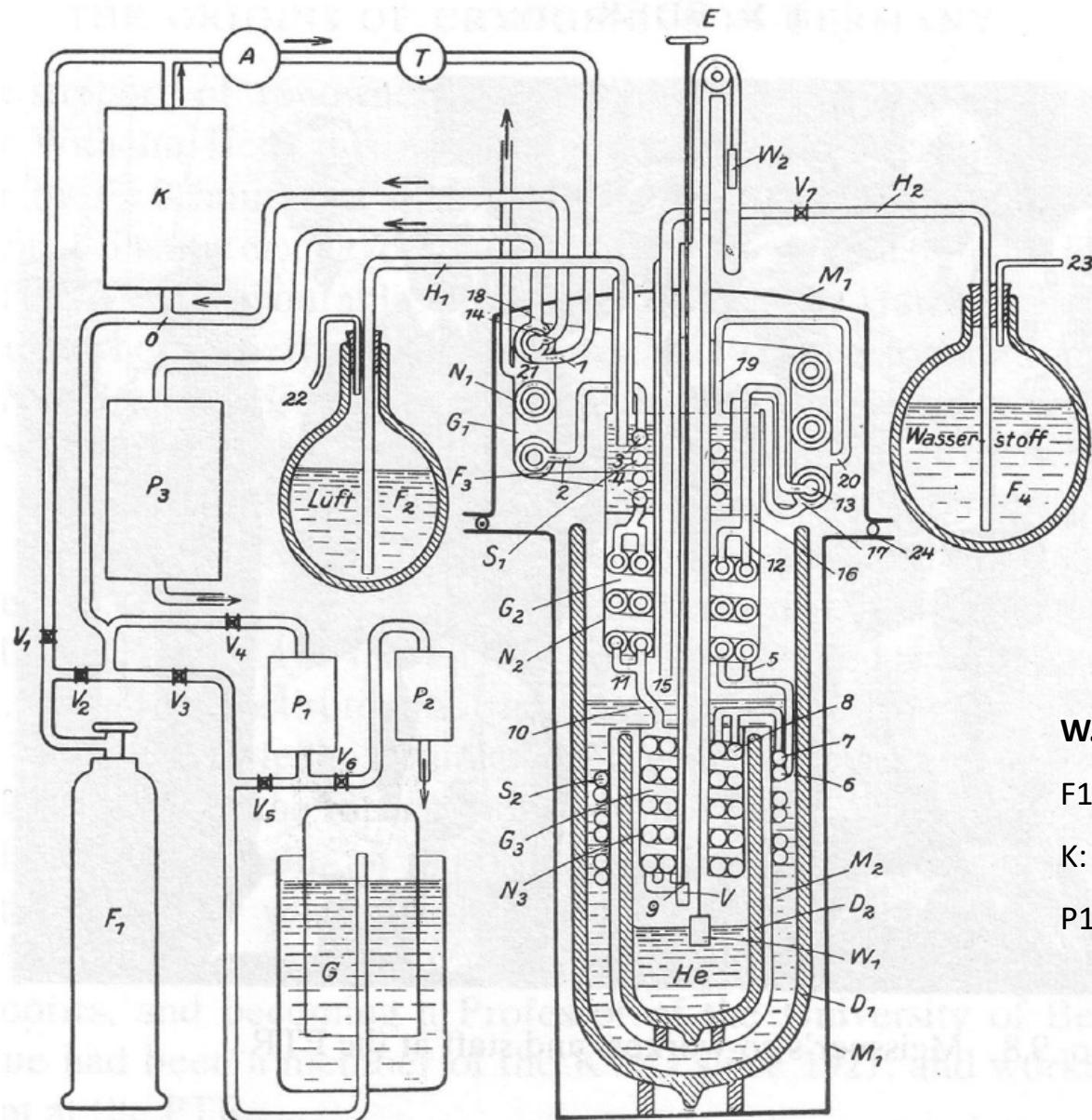
Verfahren: Vorkühlung mit fl. Luft / fl. Wasserstoff,

Gegenstrom-Wärmeübertrager,

dann Drosselung ins Zweiphasengebiet



# Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere



**W. Meißner, PTR Berlin (1925)**

F1: Heliumvorrat;

K: Heliumkompressor;

P1 – P3: Vakuumpumpen

[F. Edescutty, 1992]

# Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

## Simon-Verflüssiger

Franz Simon (später Sir Francis Simon):

Student von Walter Nernst in Berlin,

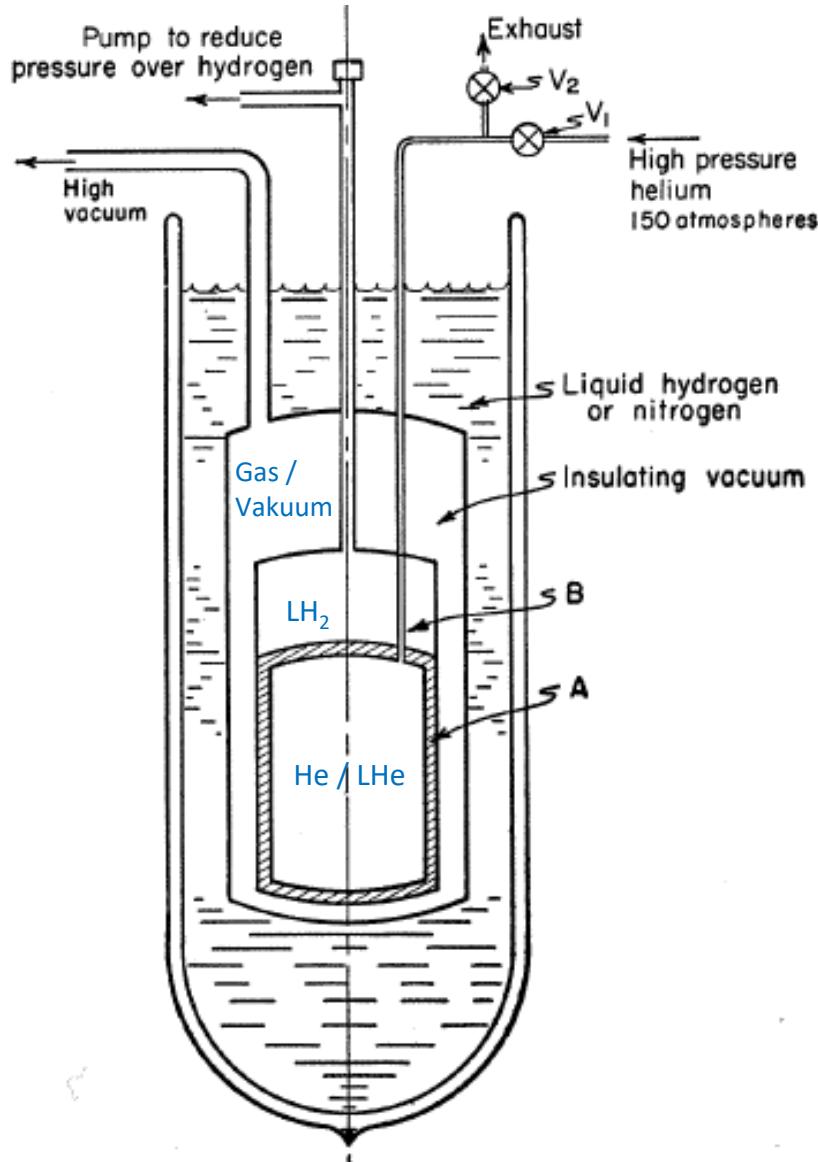
seit 1930 Professor für Physikalische Chemie in Breslau

1933 Zwangs-Emigration nach Oxford



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

# Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

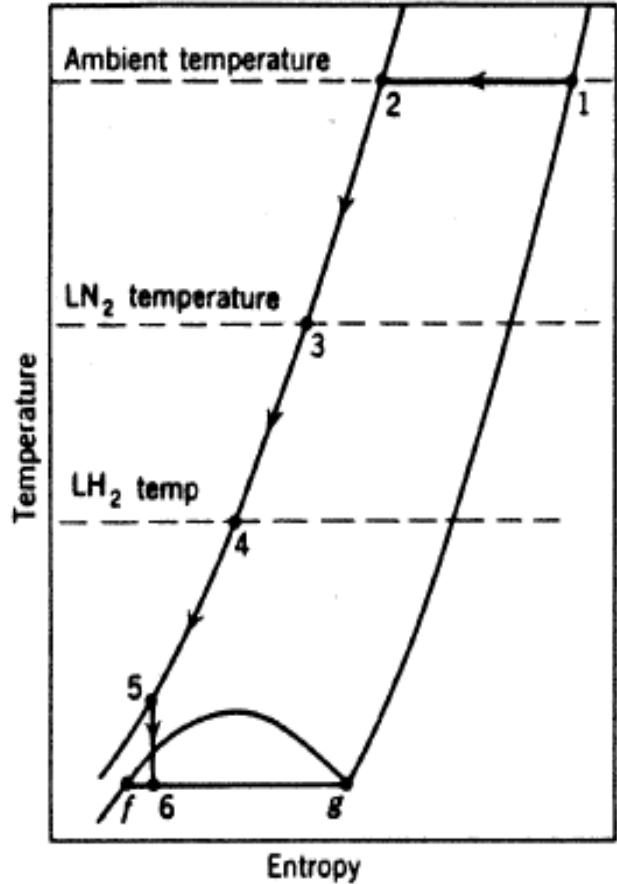


## Simon-Verflüssiger

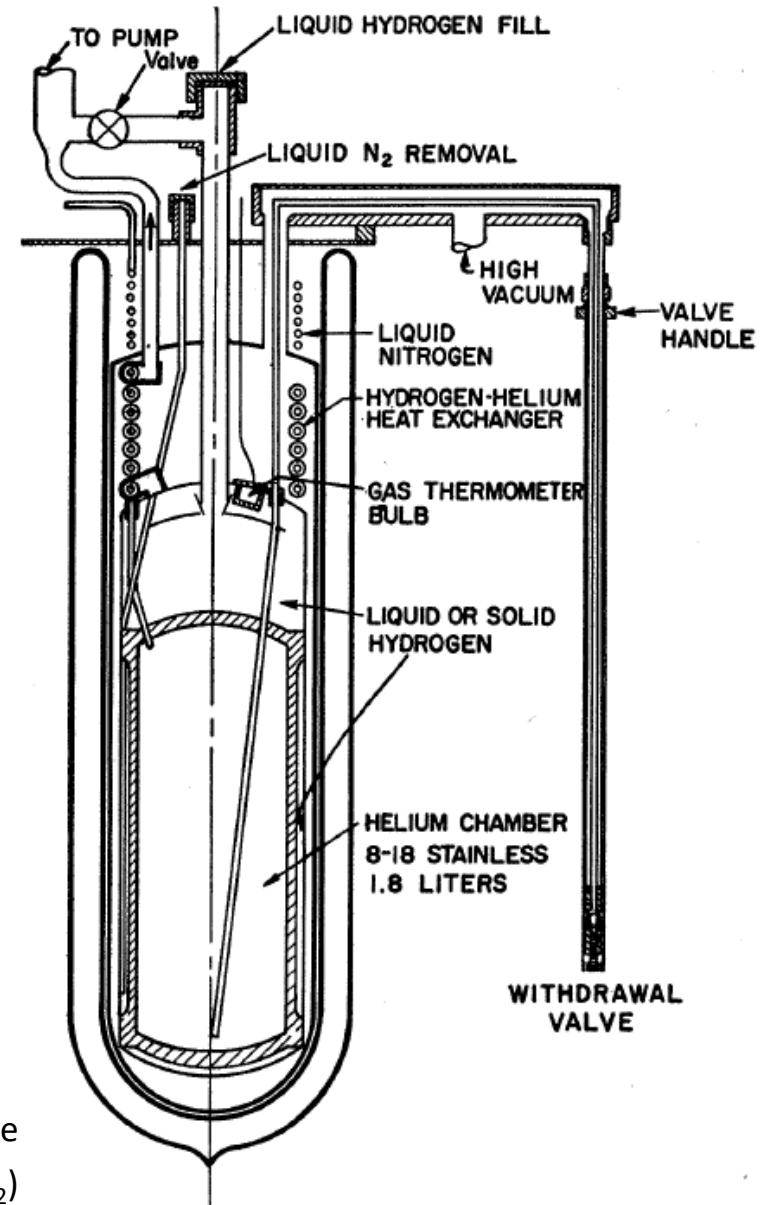
- 1) Kühlung des druckfesten Innenbehälters mit  $\text{LN}_2 / \text{LH}_2$ , gleichzeitige Befüllung mit  $\sim 150$  bar He
- 2) Abpumpen Kontaktgas (d.h., therm. Isolation)
- 3) Befüllung und anschließendes Abpumpen des  $\text{LH}_2$ -Volumens ( $T = 10 \dots 12$  K), dadurch weitere He-Einkondensation
- 4) isentrope Entspannung des vorgekühlten He via  $V_2 \Rightarrow$  Innenbehälter zu 80 ... 100 % mit LHe gefüllt

# Heliumverflüssigung: Anfänge und Pioniere

## Simon-Verflüssiger



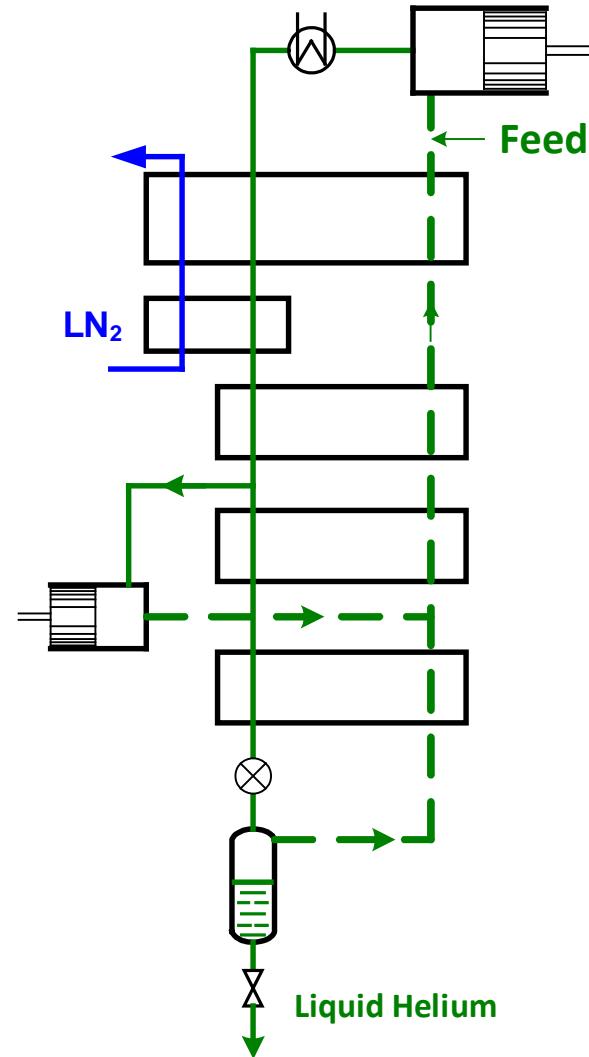
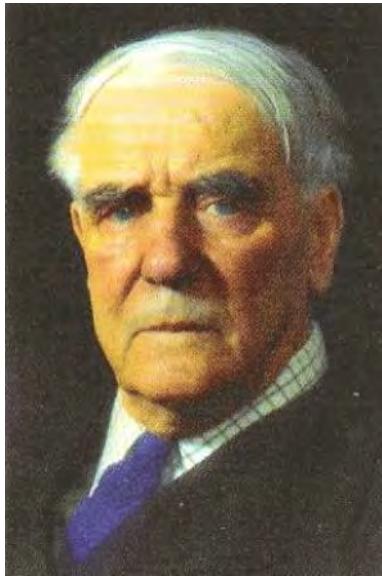
verbesserte Apparatur mit Nutzung H<sub>2</sub>-Kaltgasenthalpie  
(1,5 l LHe/Zyklus bei Verbrauch 3 l LH<sub>2</sub>)



# 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

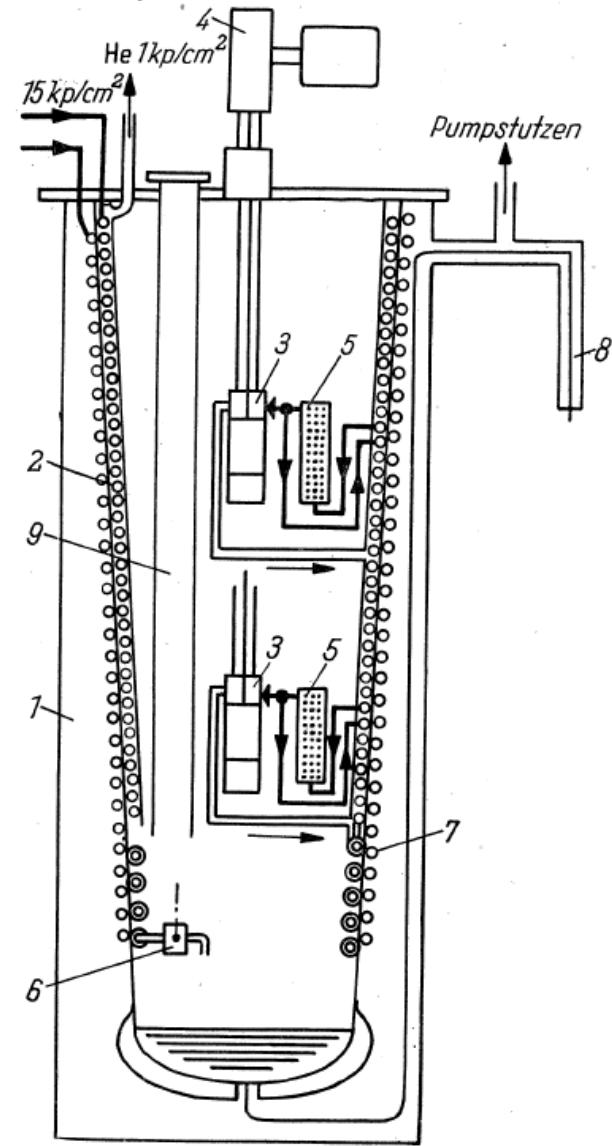
Durchbruch zum kommerziellen  
Verflüssiger



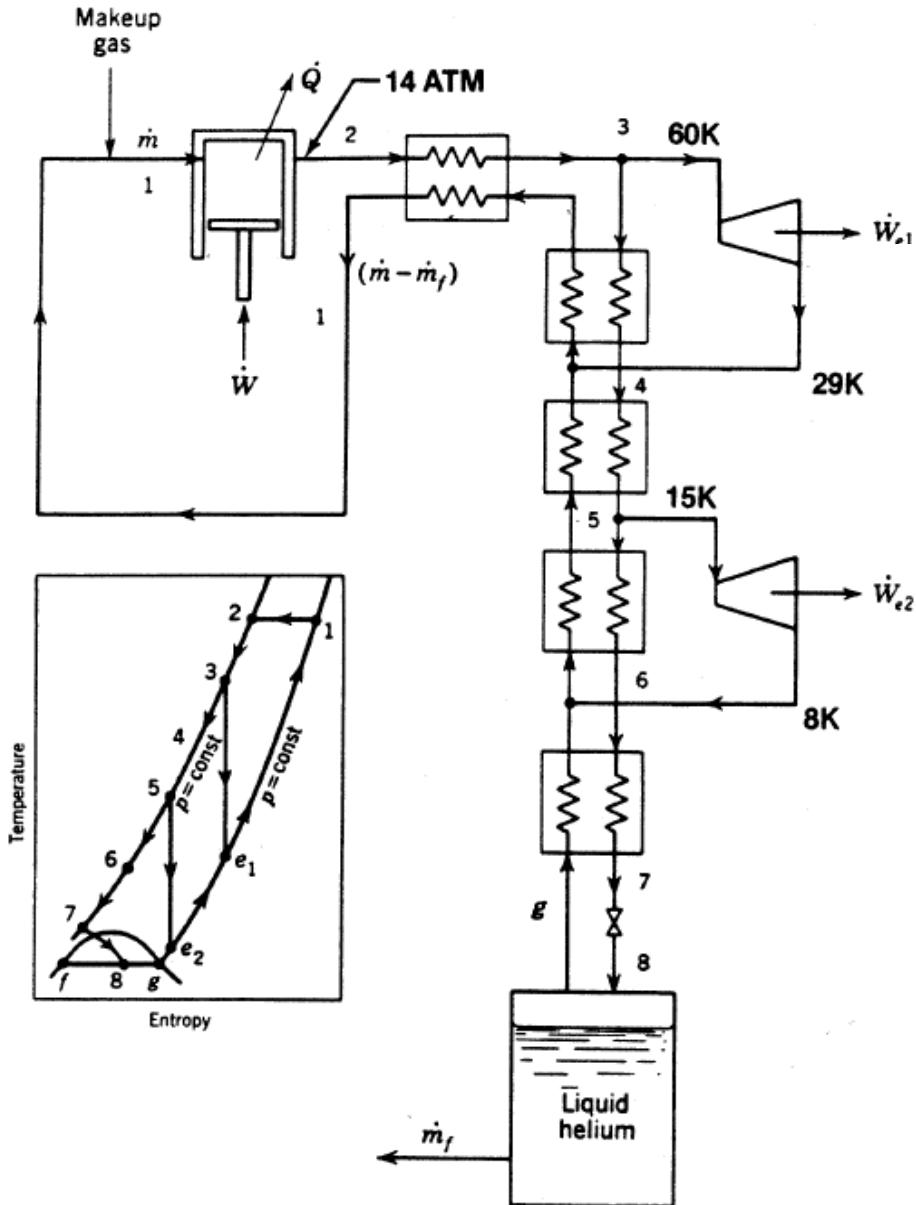
Prof. Sam Collins,  
MIT/Boston  
1946

- 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  
(isenstrop)

+

} 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 ⇒ 500 Inc. ⇒ CTI

⇒ HPS ⇒ KPS ⇒ PSI ⇒ CPS/Linde

Anlage bis heute im Kern unverändert;

### Verflüssigungsleistung:

5 ... 50 l/h ohne LN<sub>2</sub>

12 ... 70 l/h mit LN<sub>2</sub>-Vorkühlung



# Heliumverflüssigung: J-T-Kreislauf mit Stirling-Kältemaschinen

Fa. Philips, Eindhoven

Heliumverflüssiger auf Basis zweier  
Stirling-Kältemaschinen

Kapazität ~ 10 l/h

etwa 70 Anlagen gebaut (70er Jahre)

## Verfahren:

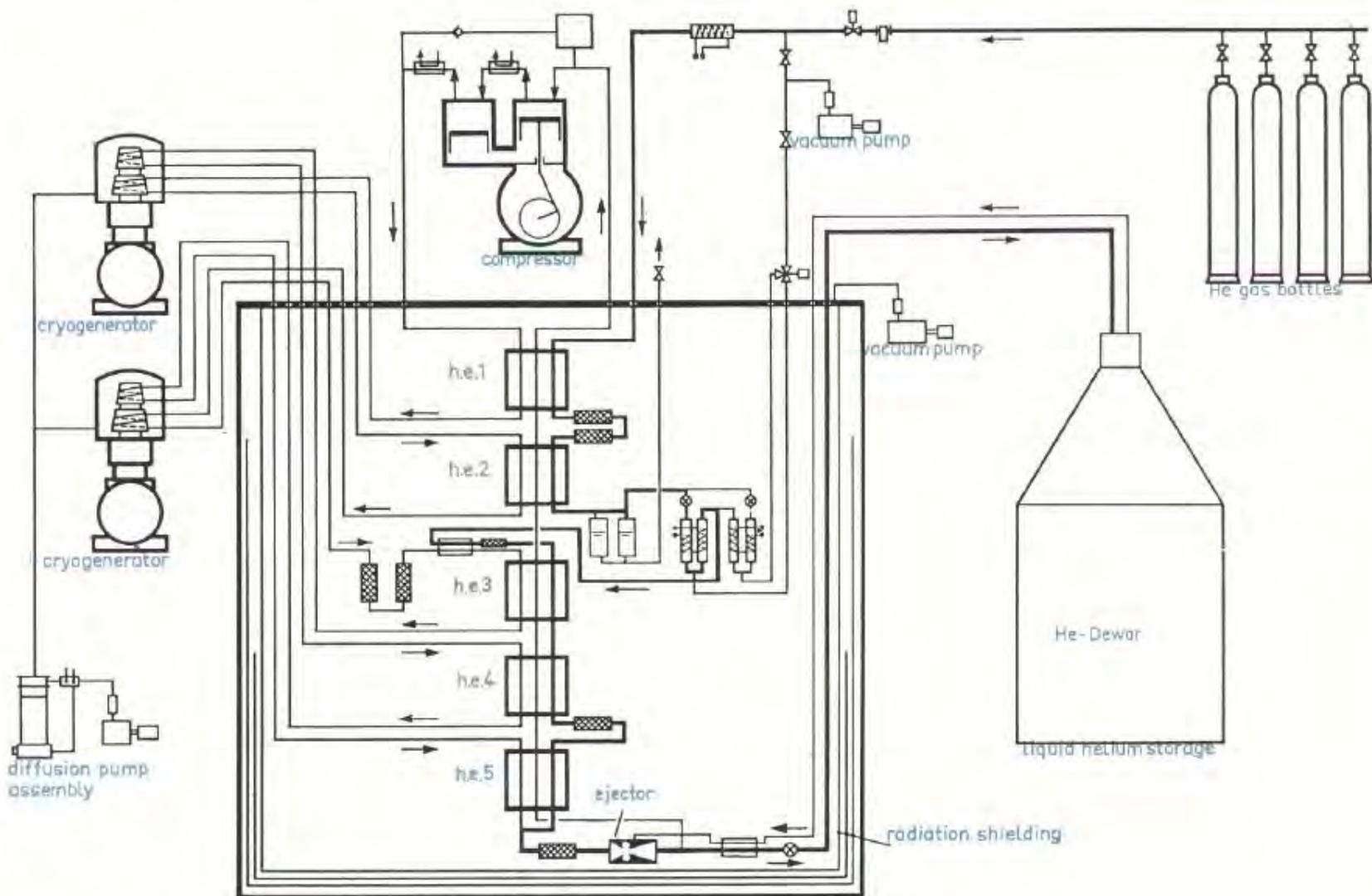
1.: Vorkühlung an Stirling-Kaltkopf;  
(110 K / 65 K / 30 K / 15 K)

2.: J-T-Entspannung



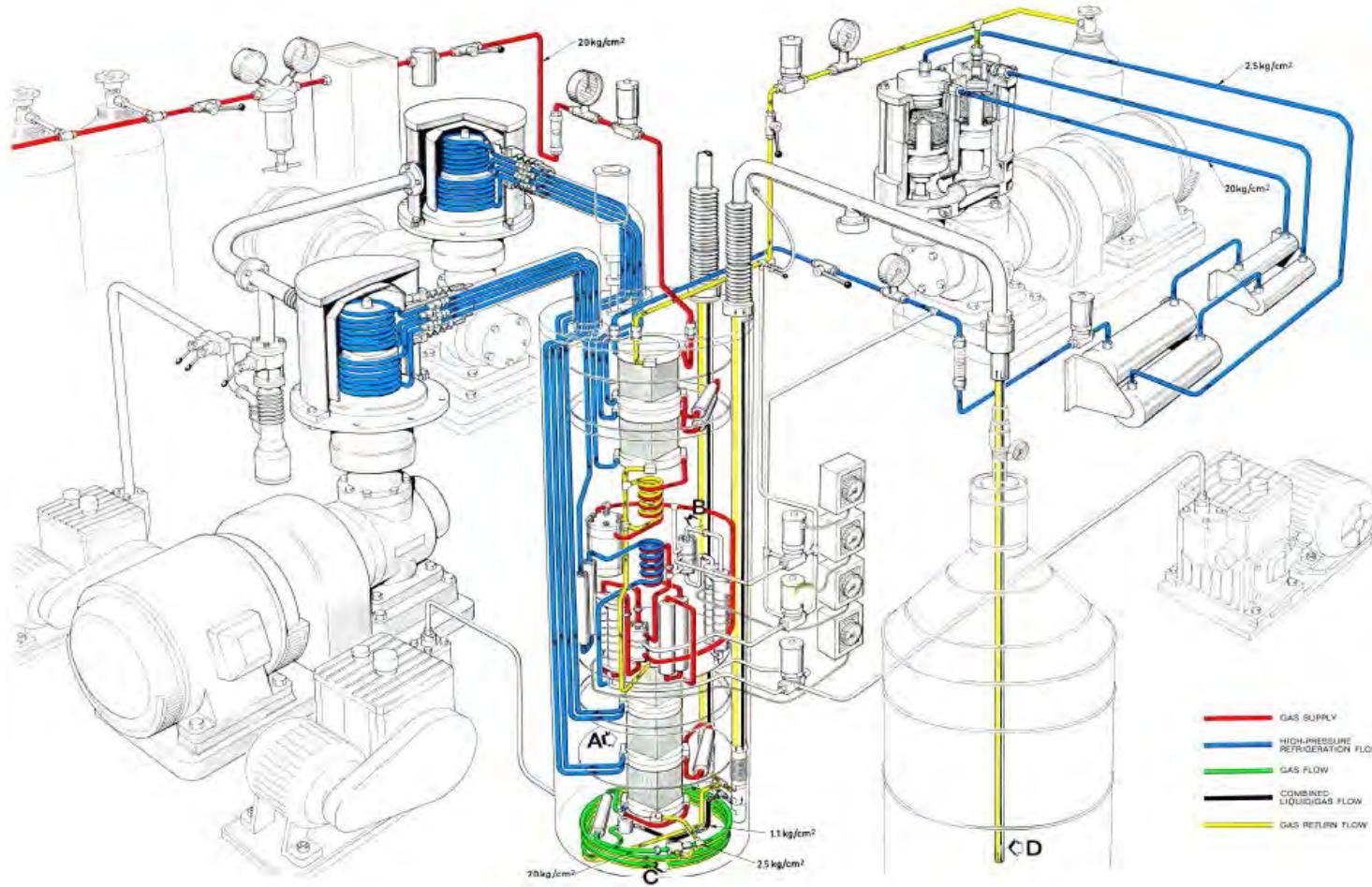
Philips, Eindhoven

# 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:

isentrope Expansion ohne  
mech. aufwändige  
Kolbenmaschine

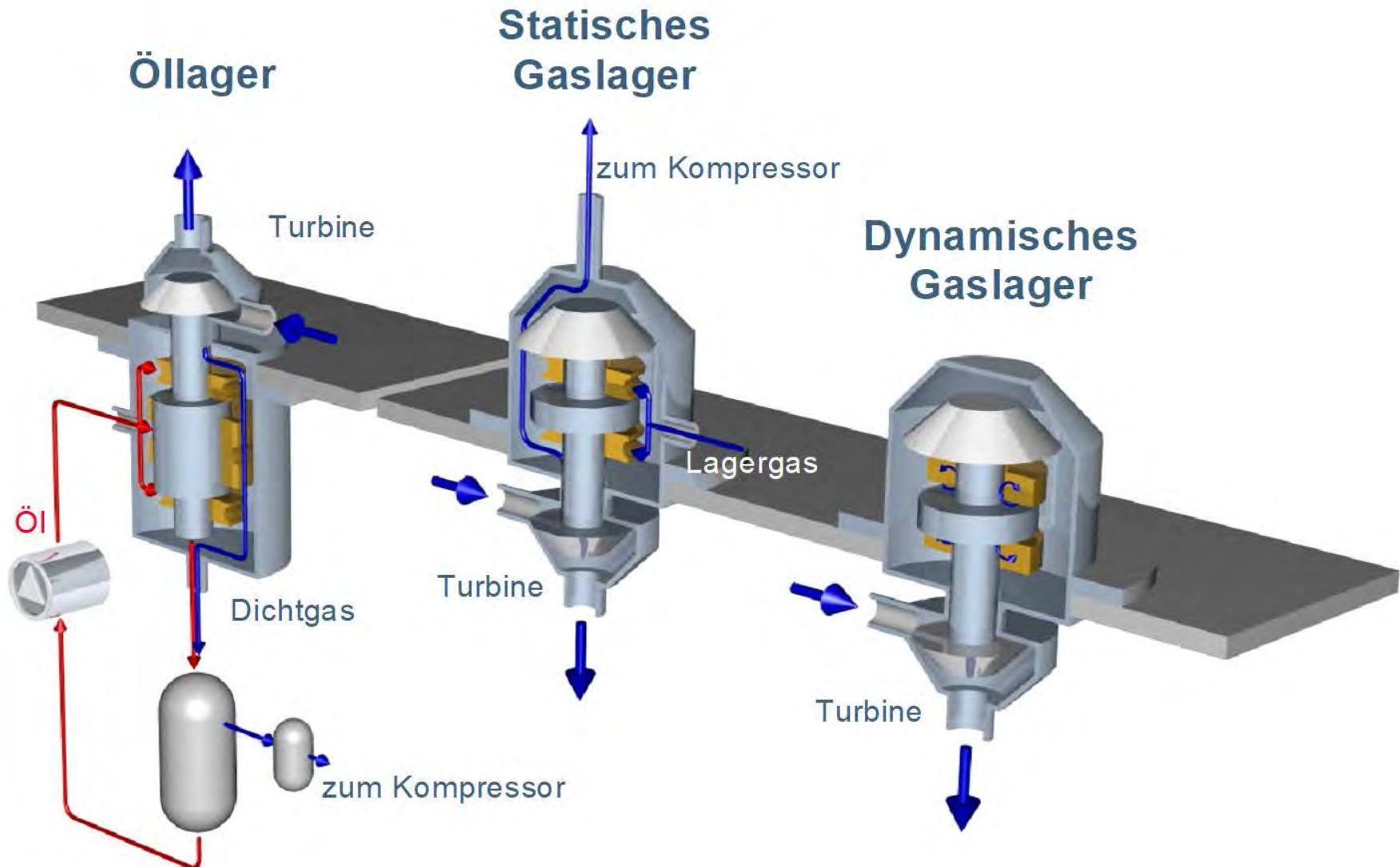
### Schwierigkeiten:

- geringe Massenströme
- hohe Umfangsgeschwindigkeiten
- benötigte hohe isentrope Wirkungsgrade



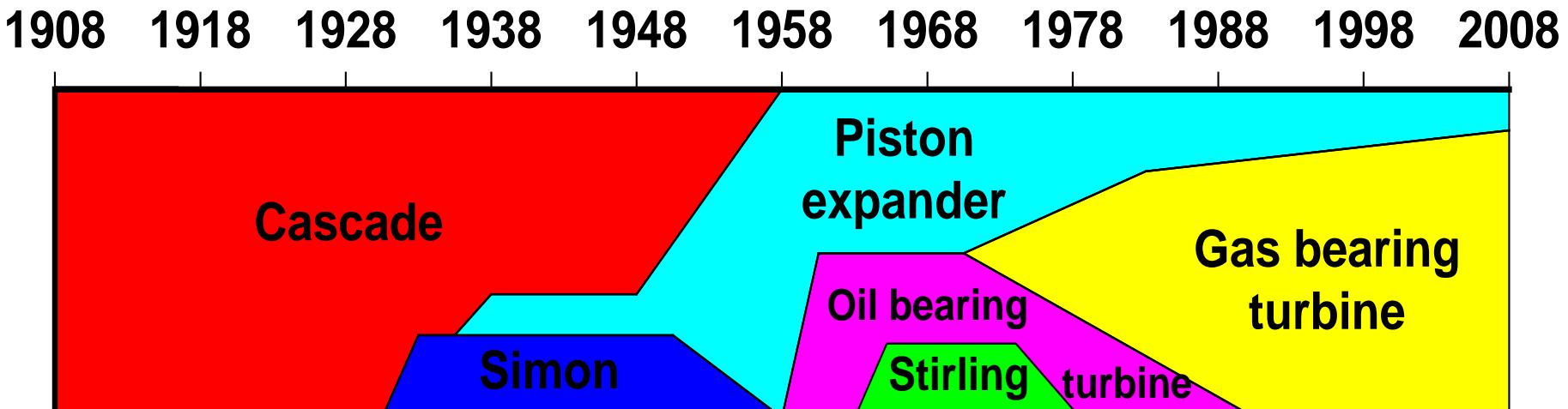
Drehzahlen bis zu  $5400 \text{ s}^{-1}$   
↳ Öl- bzw. Gaslager

# Heliumverflüssigung: Turbinenanlagen



# Heliumverflüssigung: zeitliche Entwicklung

## “Evolution” Prozesse / Komponenten



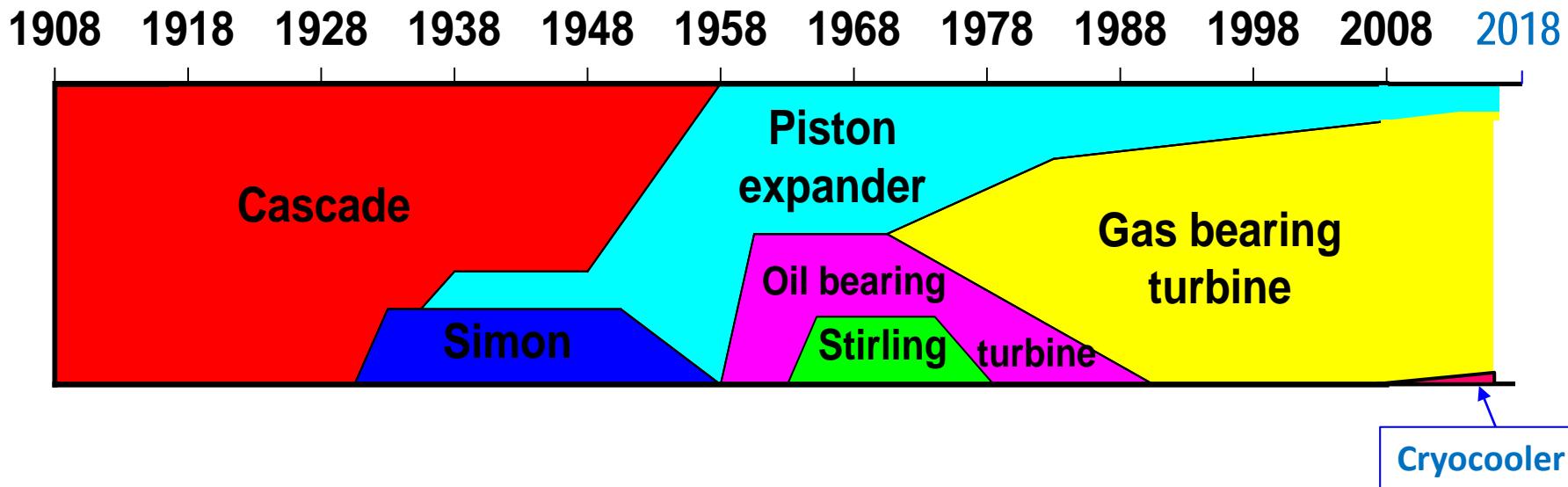
Darstellung: H. Quack

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

Konzentration auf Hersteller mit entsprechender Eigenentwicklung

# Heliumverflüssigung: zeitliche Entwicklung

## “Evolution” Prozesse / Komponenten



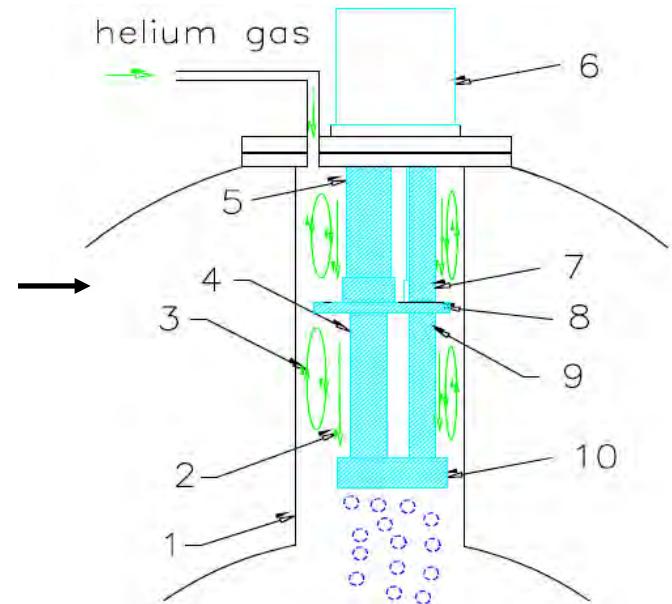
neu: Helium-Rückverflüssigung mittels **Cryocooler**

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

# Heliumverflüssigung: Cryocooler



Cryocooler plaziert  
im Halsrohr des  
Dewarbehälters



Chao WANG, [www.cryomech.com](http://www.cryomech.com)

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

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

ca. 14 kWh / 1 L<sub>He</sub>



LOT Quantum Design, [www.lot-qd.com](http://www.lot-qd.com)

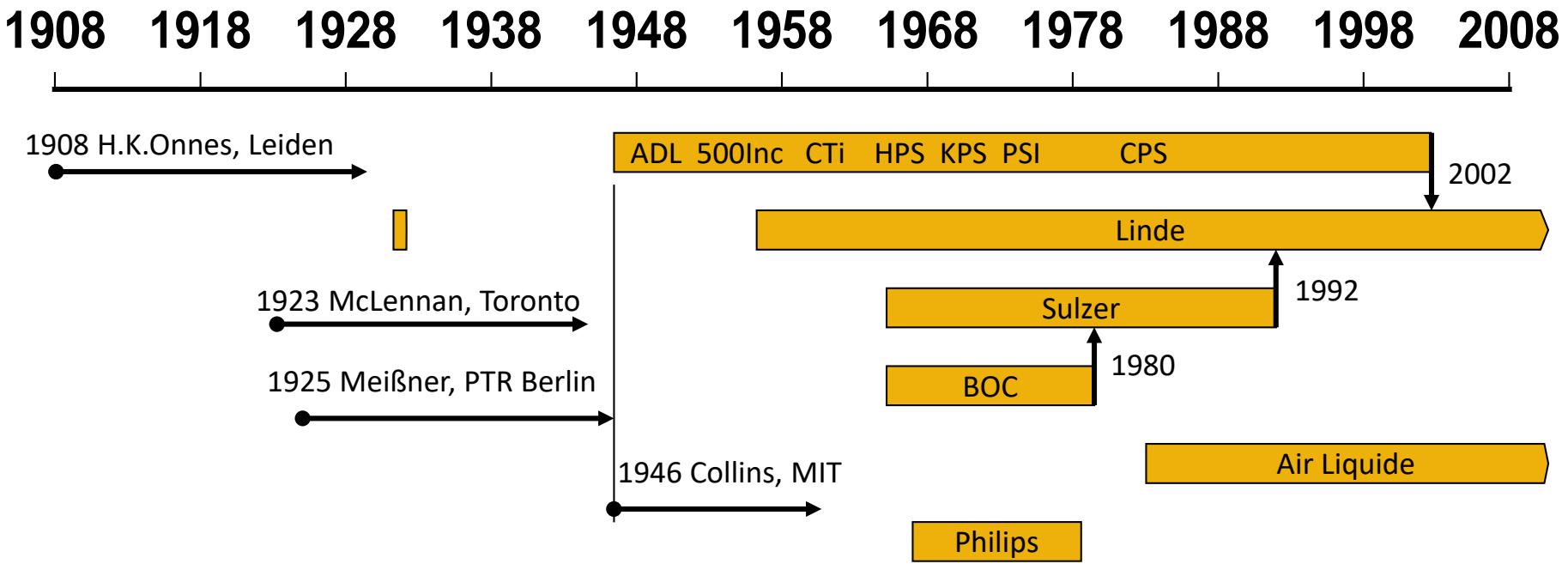
ALT - 80: ~ 12 l/Tag SHI cooler,  $P_{el} = 3,8 - 5,4 \text{ kW}$

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

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

# Heliumverflüssigung: zeitliche Entwicklung

## “Evolution” Herstellerfirmen



Musterbeispiel für exzellente Kooperation zwischen Forschung und Industrie;

Fortschritte

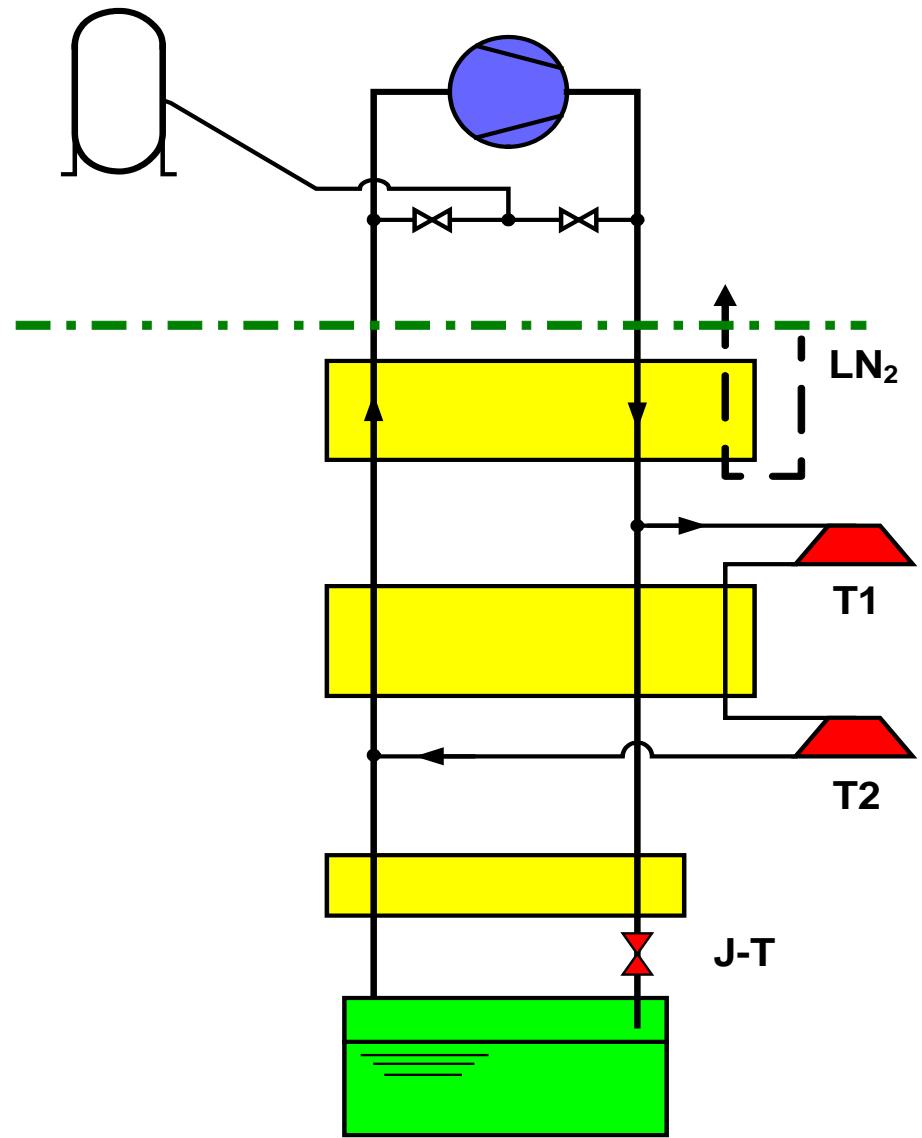
a) durch anspruchsvolle Kunden / Großforschung (CERN, DESY, ESS, ...)

b) durch universitäre Begleitung

# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

## typisches Fließbild (modifizierter Claude-Prozess)

- warmer Kreislaufverdichter
- Puffertank (Helium hochrein)
- Gegenstrom-WÜ
- optional LN<sub>2</sub>-Vorkühlung
- 2 Expansionsturbinen
- J-T-Ventil



# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

## typisches Fließbild

(modifizierter Claude-Prozess)

- warmer Kreislaufverdichter

- Puffertank (Helium hochrein)

- Gegenstrom-WÜ

- optional LN<sub>2</sub>-Vorkühlung

- 2 Expansionsturbinen

- J-T-Ventil

- integrierter Reiniger

Ausfrieren von

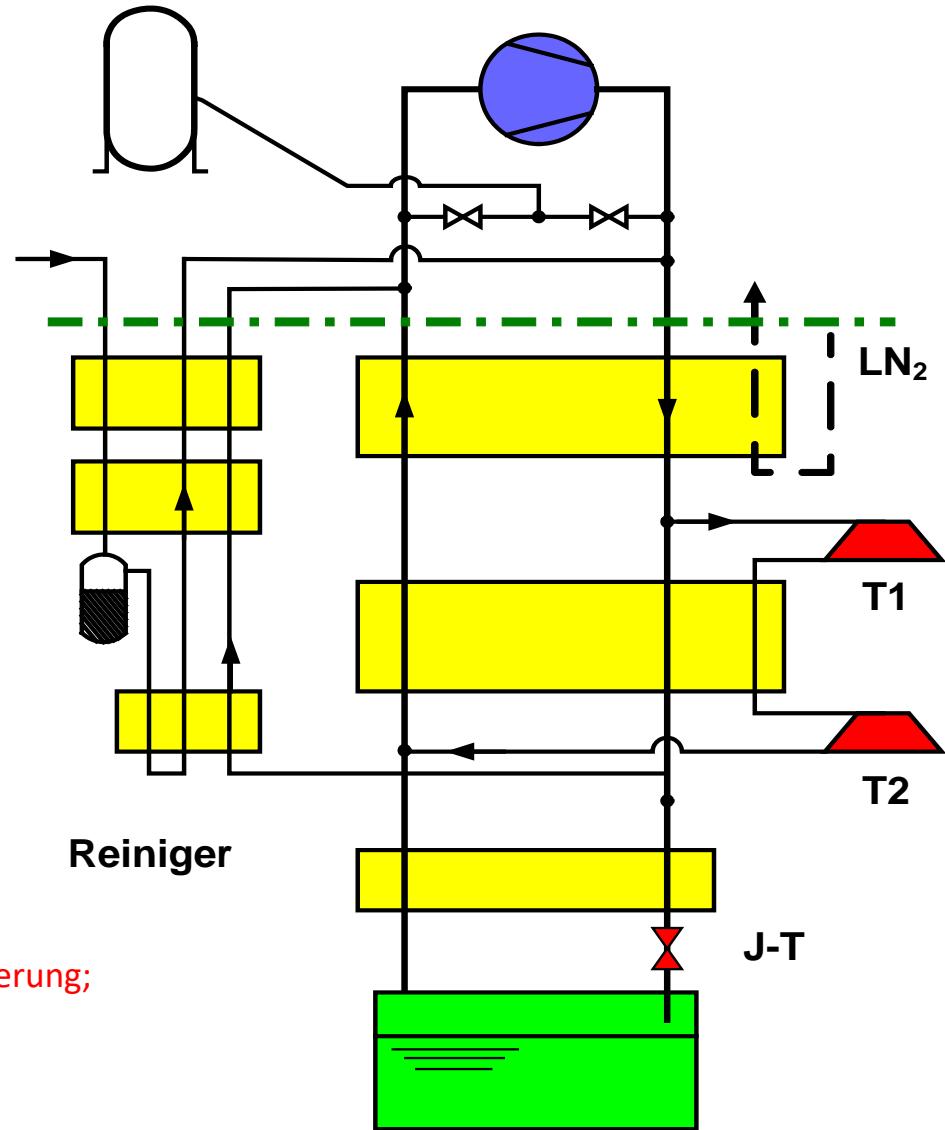
Verunreinigungen,

max. ca. 3 vol-%

- spezifischer Leistungsbedarf:

4 .... 2 kWh / l<sub>LHe</sub>

aufwändige Steuerung;  
störungsanfällig



# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



## Kreislaufverdichter

Schraubenverdichter einstufig

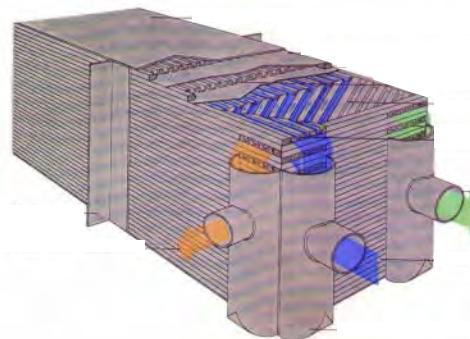
1,05 bar → ca. 14 bar

ölgeschmiert



## Wärmeübertrager

Aluminium-Plattenwärmeübertrager  
vakuumgelötet



# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Aluminum Platten-Wärmeübertrager:

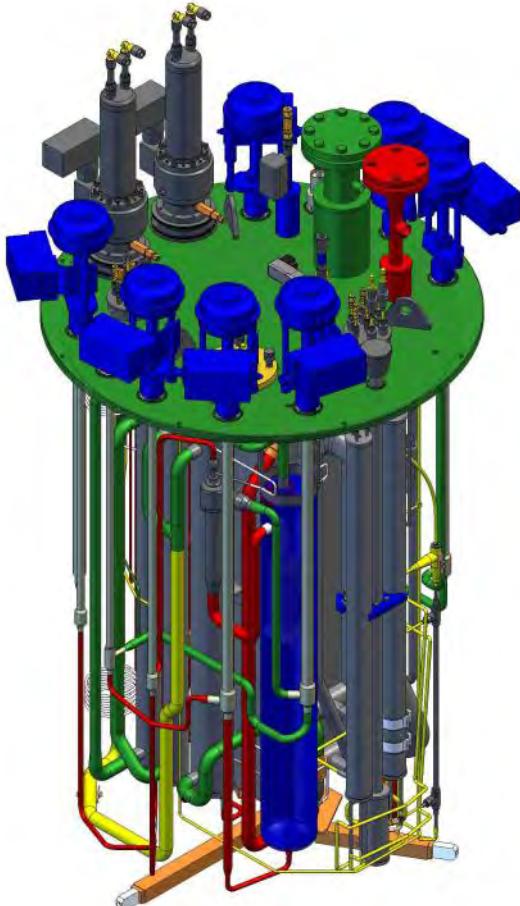
- sehr zuverlässig
- exzellente Effektivität ( $\Delta T_{\text{ein/aus}} \approx 3 \text{ K}$ )

Quelle: Linde Schalchen

# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

## Coldbox

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



# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen

## Expansionsturbinen

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



Optimierung hinsichtlich

- Geometrie Lauf- / Leiträder
- Spaltverluste
- Wärmeeinträge

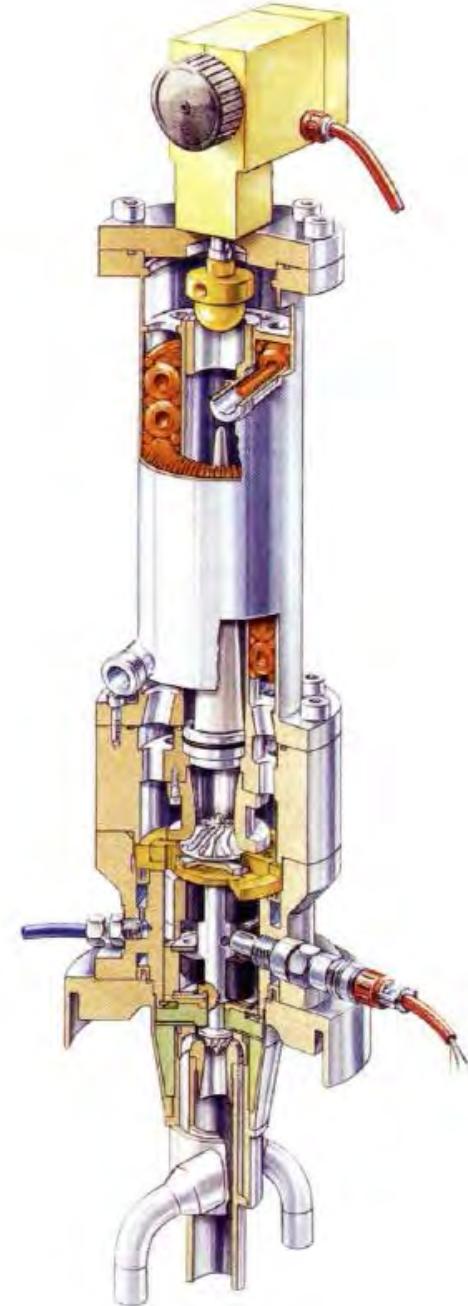
isentroper Wirkungsgrad

früher:  $\eta_s \approx 65\%$

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

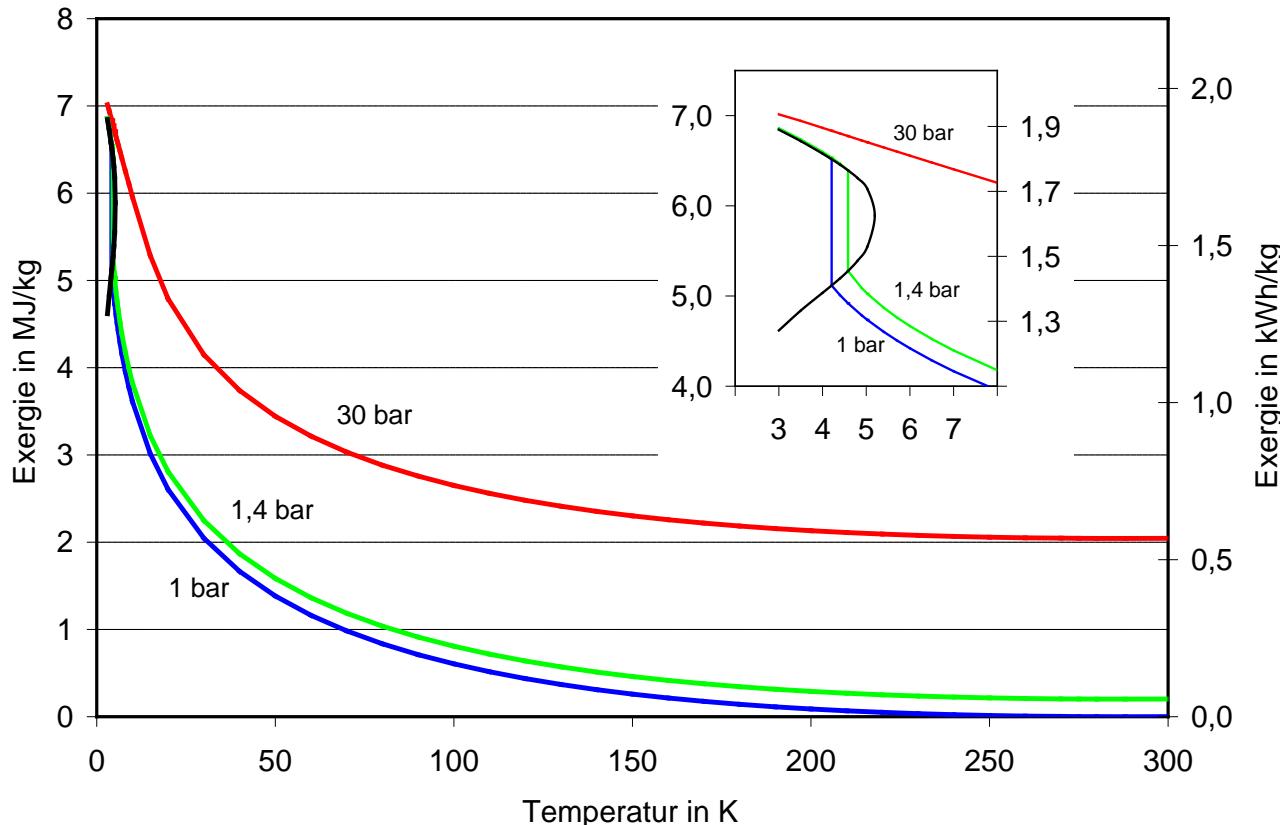
⇒ Steigerung Verflüssigungs- bzw.  
Kälteleistung um Faktor 1,5 ... 2

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



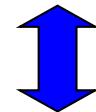
# Heliumverflüssigung: maximal erreichbare Effizienz

## Exergieanalyse



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

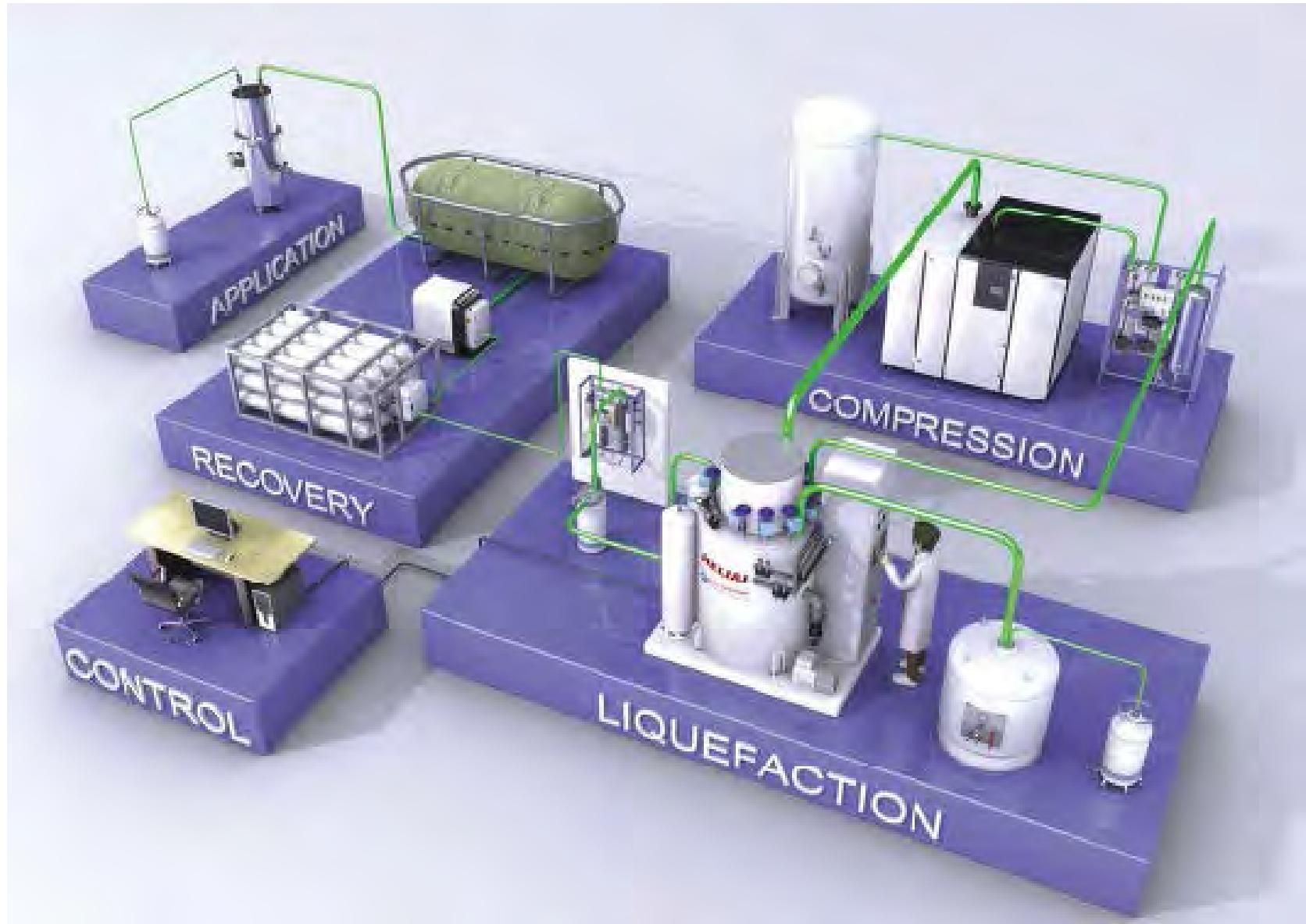
vollständige Verflüssigung  
(ab 1 bar/300 K):  
min. 1,81 kWh/kg



Bestwert heutige Verflüssiger  
(Kapazitätsklasse  
20 ... 100 l/h):

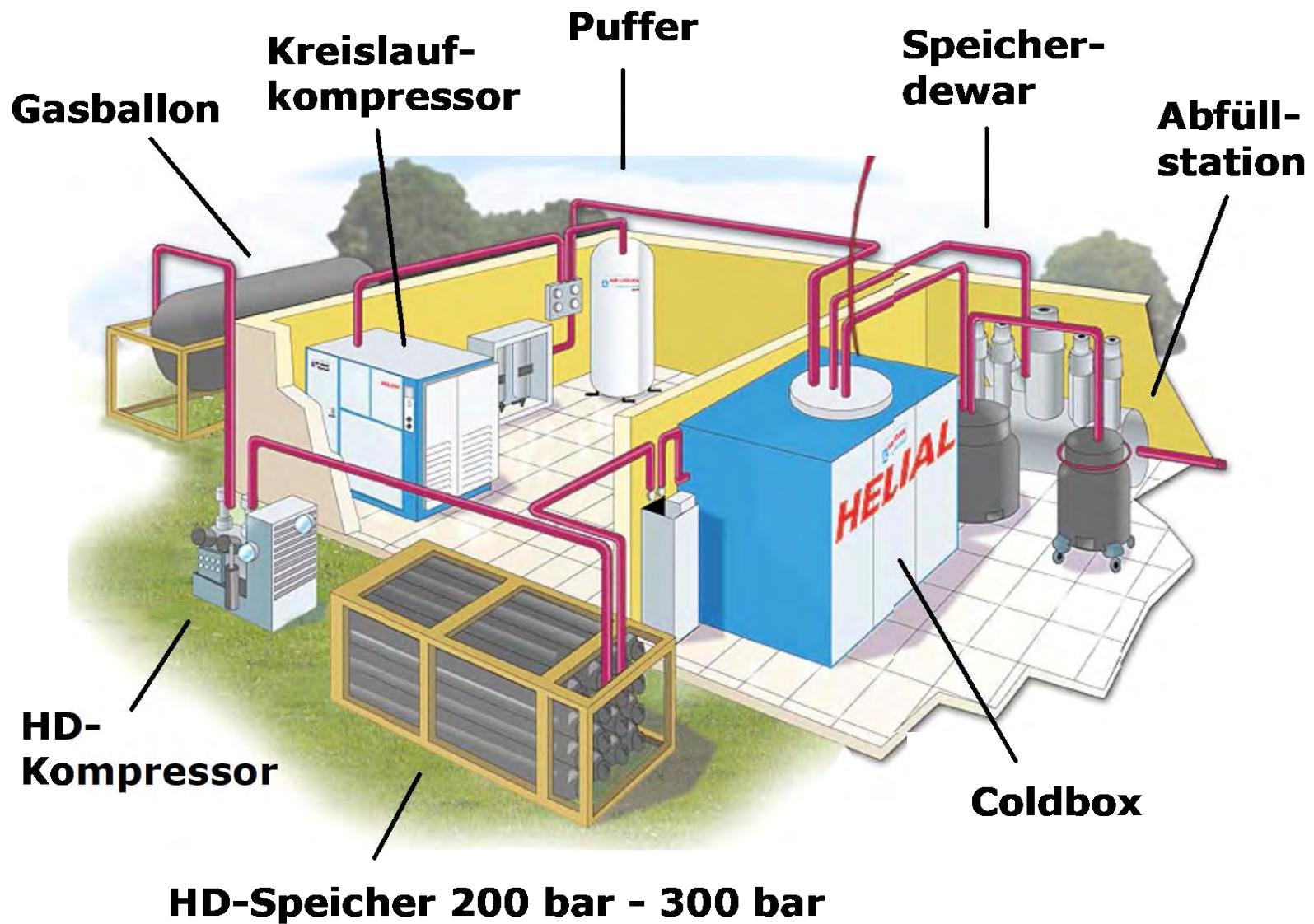
ca. 16 kWh/kg  
= 2 kWh/l<sub>LHe</sub>

# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Graphik: Air Liquide

# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Graphik: Air Liquide

# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Heliumverflüssiger TU Dresden (MOL 110)

ca. 28 l/h

technischer Stand: ~ 80er Jahre

$P_{el} = 127 \text{ kW}$

# Heliumverflüssigung: Aufbau heutiger Anlagen



Heliumverflüssiger IFW Dresden

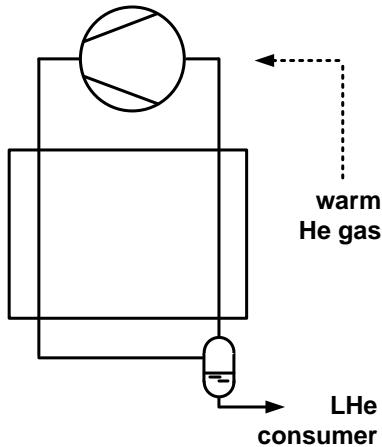
ca. 44 l/h

technischer Stand: ~ 2005

$P_{el} = 90 \text{ kW}$

# Heliumverflüssiger / Refrigeratoren

## Unterschied Verflüssiger - Refrigerator



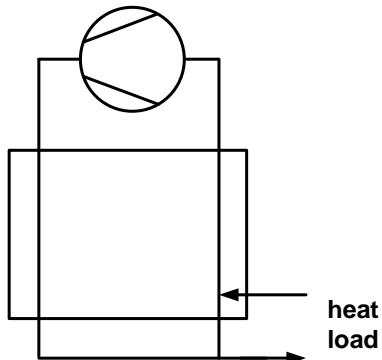
### Verflüssiger

meist nur Verdampfungsenthalpie genutzt ( $20,4 \text{ kJ/kg}$ )

(Aufwärmung Kaltgas:  $1500 \text{ kJ/kg}$ )

Standard-Verflüssiger:  $10 \dots 200 \text{ l/h}$

Industrieverflüssiger:  $\sim 1000 \dots 4000 \text{ l/h}$



### Refrigerator

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

$0.1 \dots 20 \text{ kW} @ 1,8 \dots 5 \text{ K}$

# Helium-Großanlagen



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

**33 kW @ 50 K ... 75 K**  
(Schildkühlung, refrig.)

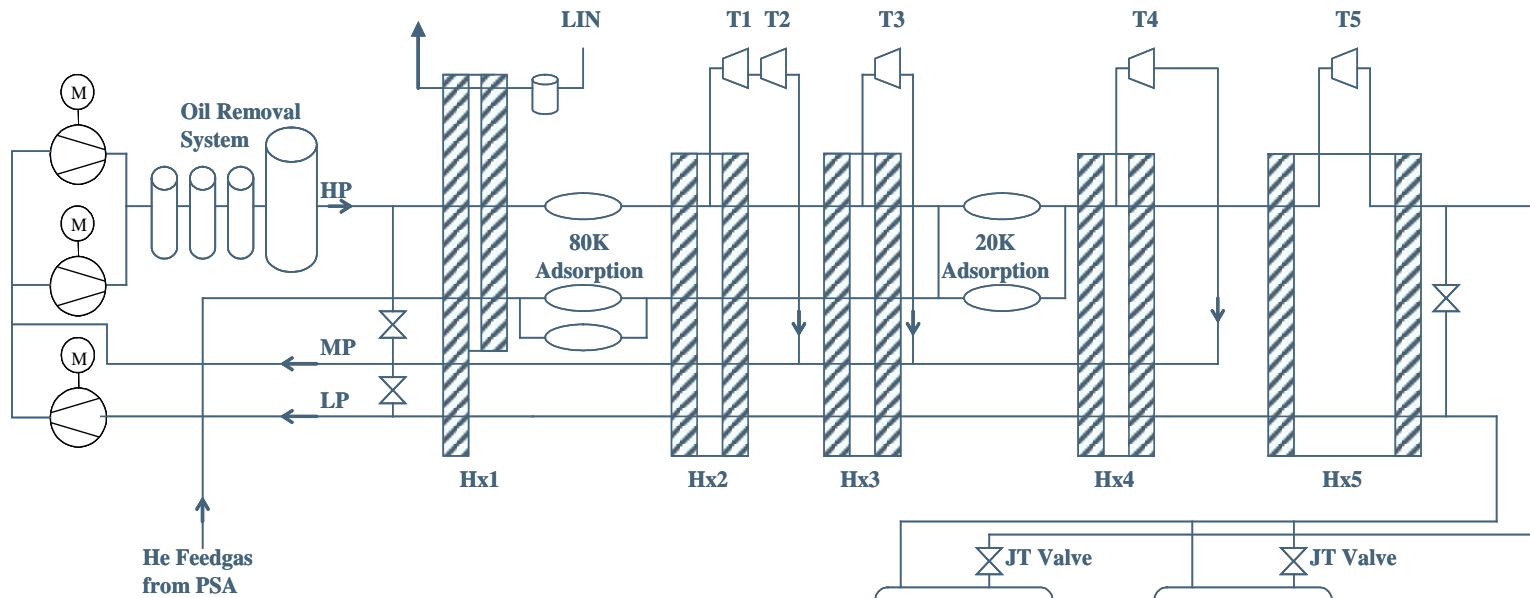
+

**23 kW @ 4.6 K ... 20 K**  
(Schildkühlung, refrig.)

+

**41 g/s** Verflüssiger-  
entnahme

# Helium-Großanlagen



Skikda, Algerien: in Betrieb seit 2006

Erdgas-Verflüssigung inkl. Heliumabtrennung und  
Verflüssigung (3000 l<sub>LHe</sub>/h);

11 000 gal LHe-Trailer

Quelle: Linde Kryotechnik, Pfungen