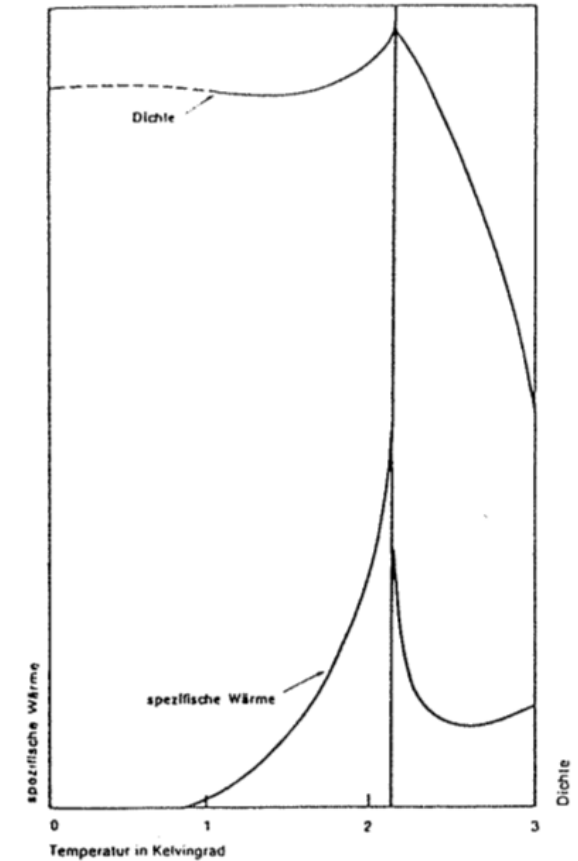
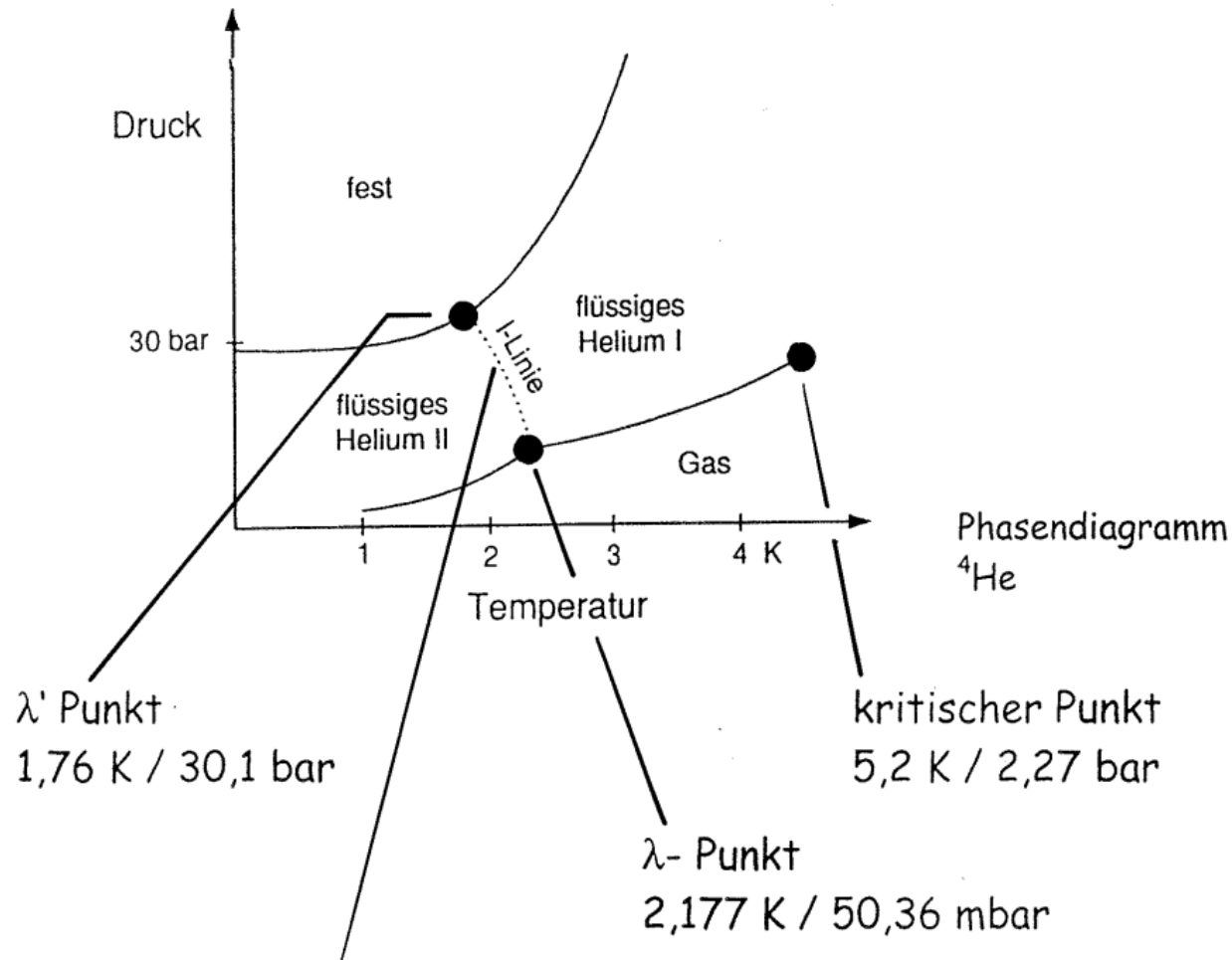


Helium

Phasendiagramm ^4He



λ-Linie:

Phasenübergang 2. Ordnung keine Umwandlungsenthalpie

c_p , Transportkoeffizienten: ändern sich

innere Energie, Dichte: stetig; Ableitung unstetig

Helium

Zweiflüssigkeitsmodell:

suprafluide Komponente:

keine Entropie; $\mathbf{s}_s = \mathbf{0}$

keine Viskosität; $\boldsymbol{\eta}_s = \mathbf{0}$

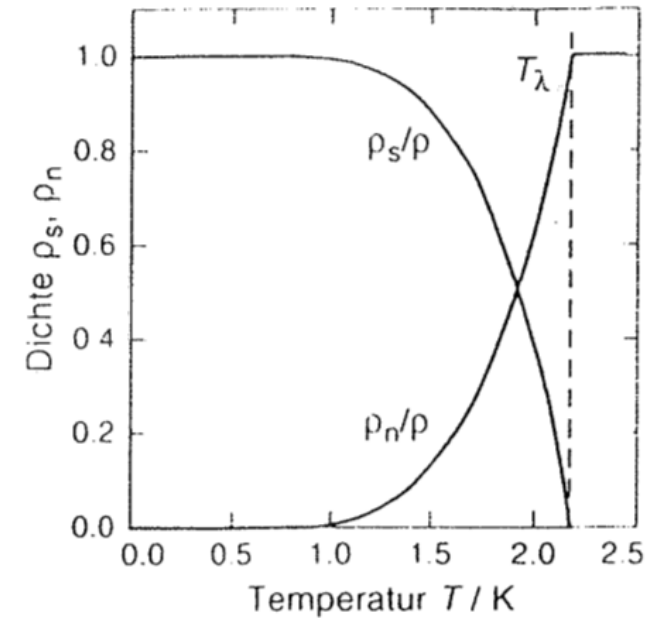
normalfluide Komponente:

$\mathbf{s}_n = \mathbf{s}(T)$

$\boldsymbol{\eta}_n = \boldsymbol{\eta}$

keine Wechselwirkung zwischen \mathbf{s} und \mathbf{n}

z.B. wechselseitiges Durchströmen möglich



LHe I „normale“ Eigenschaften

klare Flüssigkeit;

$\rho = 125 \text{ kg/m}^3$

LHe II suprafluid (superfluid)

$\lambda_{\text{HeII}} \approx 10^6 \cdot \lambda_{\text{HeI}}$

\Rightarrow keine merklichen Temperaturgradienten

\Rightarrow kein Sieden (Abdampfen von der Oberfläche)

Viskosität $\rightarrow 0$

allgemein: Quantenflüssigkeit

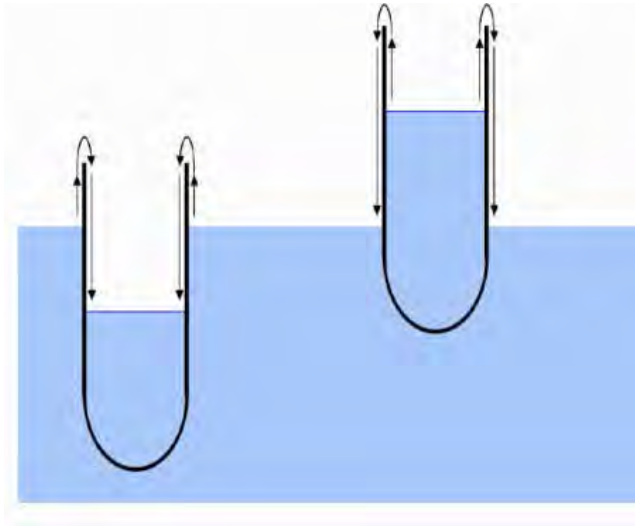
(Nullpunktenergie > Bindungsenergie)

MPI Göttingen (Herbst 2000):

Suprafluidität bei H_2

nachgewiesen ($T = 0,15 \text{ K}$)

Helium



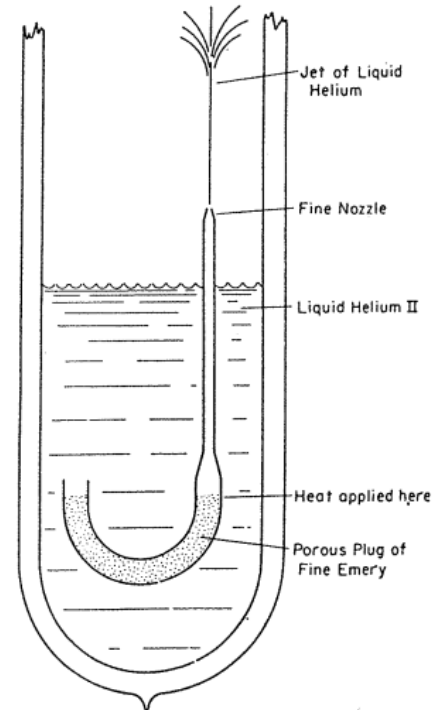
Filmkriechen

$d = 0,01 \mu\text{m}$

$\sim 40 \text{ cm / s}$

$\rightarrow 1 \text{ Tropfen / s}$

unabhängig von Δp



Thermomech. Effekt

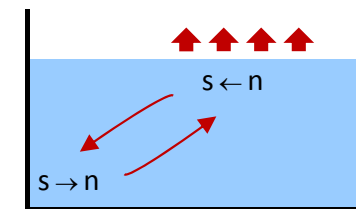
He II folgt dem Temp.grad.

Super Leck \rightarrow (Super Filter)

Porengröße $1 \dots 0,1 \mu\text{m}$

nur für He II durchlässig

Fontäneneneffekt



M

Erklärung exzellente
Wärmeleitung He-II

Helium

Kühlen mit Helium:

He II

⇒ 1,8 K @ 16 mbar
Abpumpen der Dämpfe

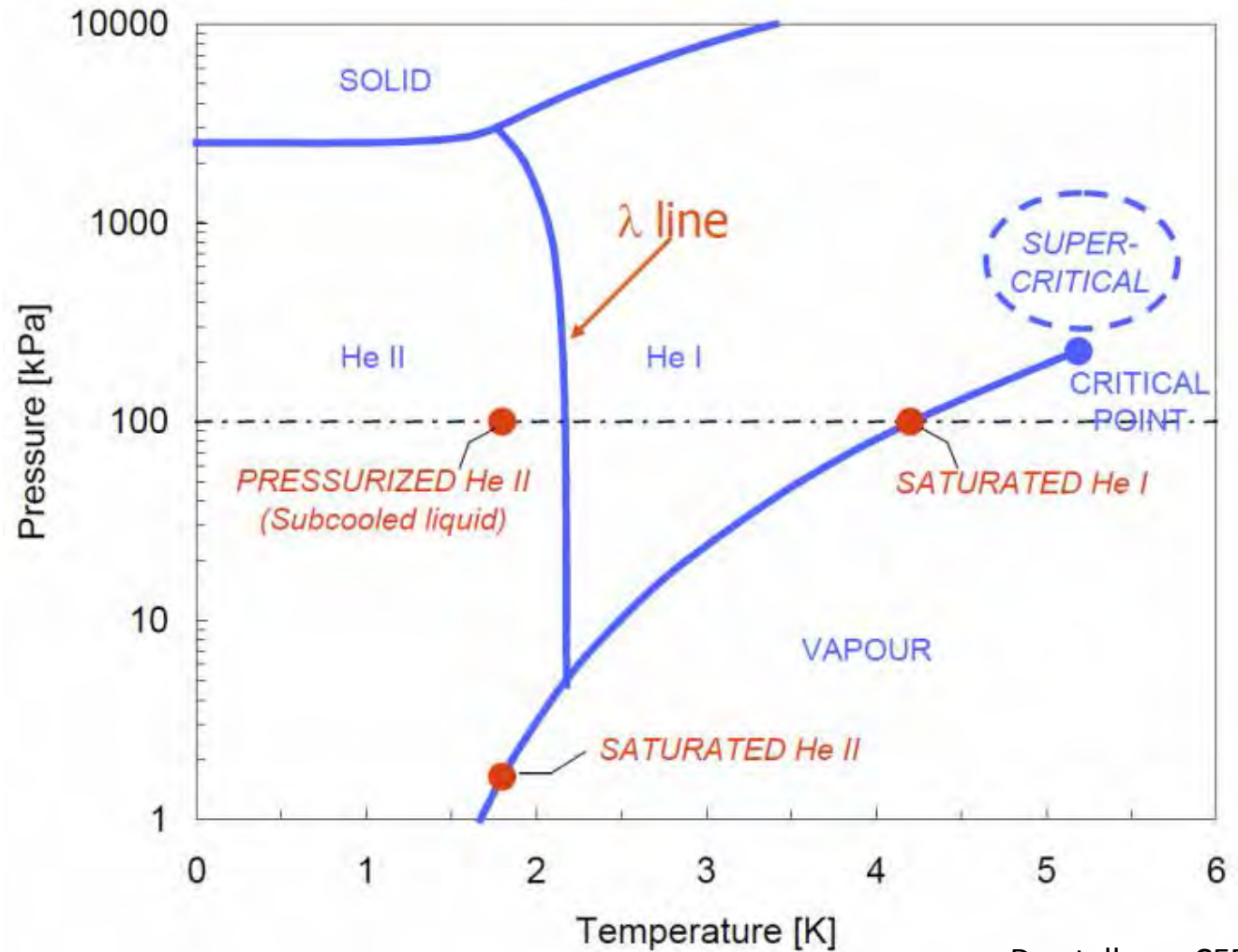
⇒ 1,8 K @ 1 bar
Unterkühlung-WÜ

He I

1 ... 1,5 bar
4,2 ... 4,6 K
„Flüssighelium“

He überkritisch

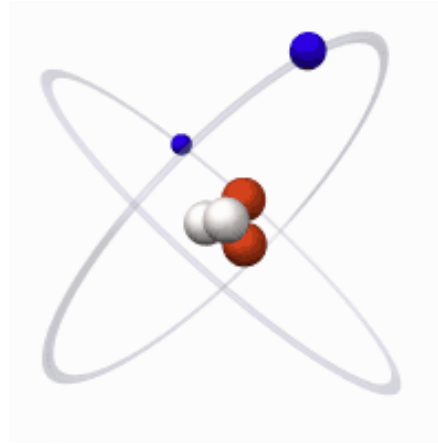
typisch ca. 5 K @ 5bar
Zwangskühlung einphasig
(sl Kabel, sl Magnete)



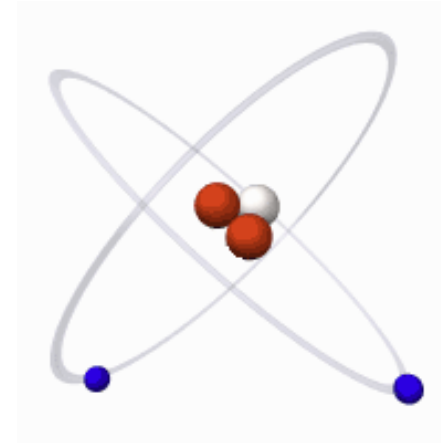
Darstellung: CERN

Helium

zwei stabile Isotope



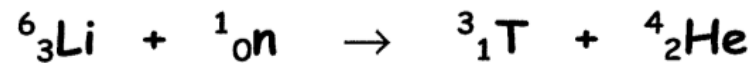
${}^4_2\text{He}$ 99,9999 %



${}^3_2\text{He}$ 0,00013 %

Isotopenverhältnis Atmosphäre $10^6 : 1$
Erdgas $10^7 : 1$

Gewinnung ${}^3\text{He}$: Kernreaktion



Abtrennung: Diffusion Pd-Rohr



$t_{\frac{1}{2}} = 12,4$ Jahre



${}^3\text{He}$: ~~$\sim 200,- \text{€} / \text{l}_{\text{gasf.}}$~~ ~~$\approx 90\,000 \text{€} / \text{l}_{\text{fl.}}$~~ \Rightarrow wegen 11.9.2001

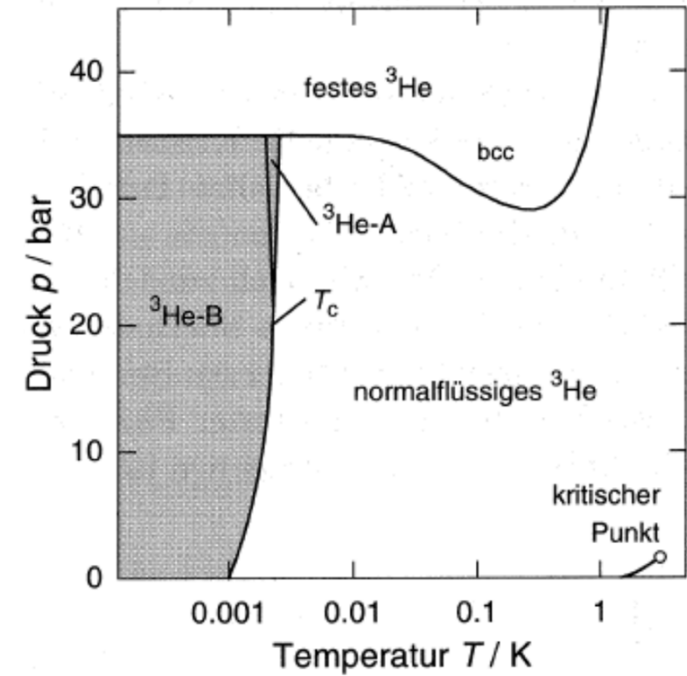
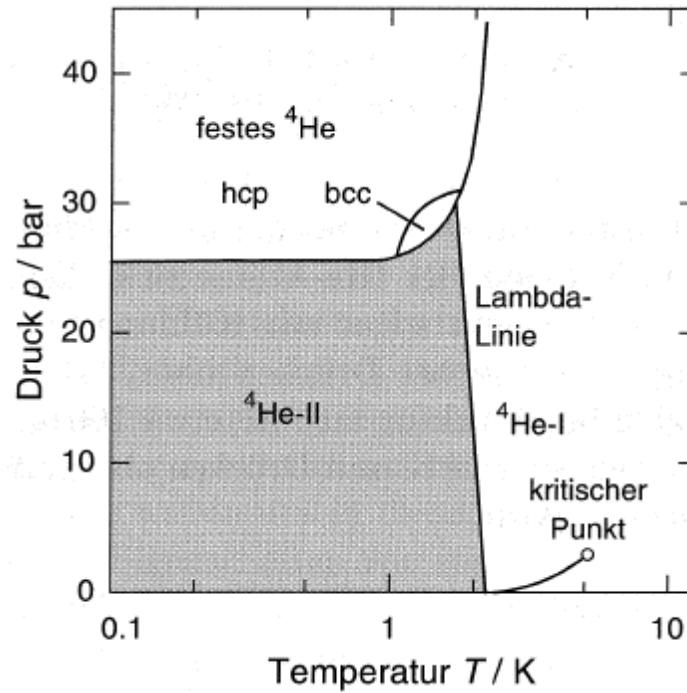
~~$1000,- \text{€} / \text{l}_{\text{gasf.}}$~~ ~~$\approx 450\,000 \text{€} / \text{l}_{\text{fl.}}$~~

~~$3000,- \text{€} / \text{l}_{\text{gasf.}}$~~ ~~$\approx 1\,350\,000 \text{€} / \text{l}_{\text{fl.}}$~~

Alternative:

„mining on the moon“ !?

Helium



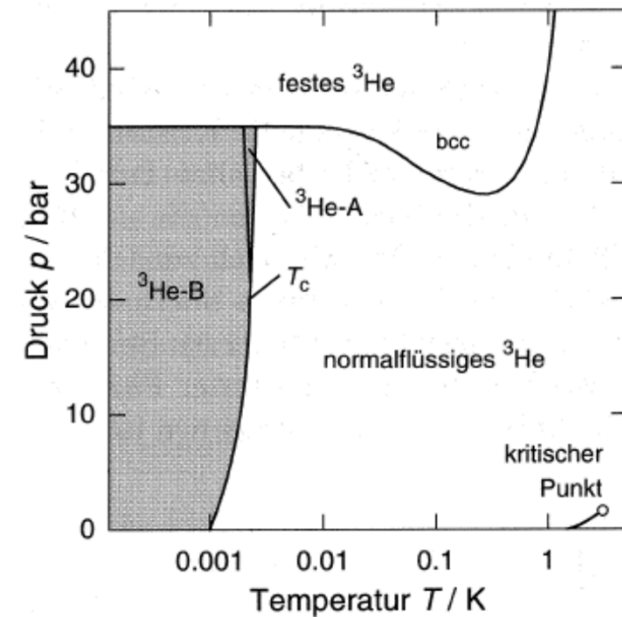
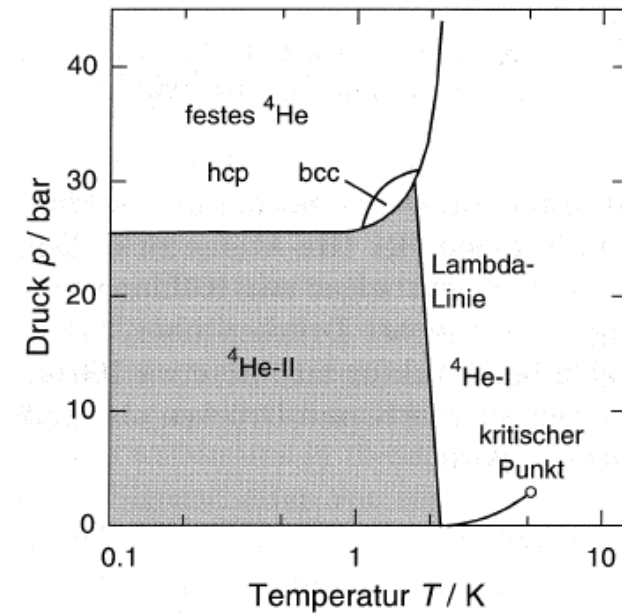
	^4He	^3He	
T_s	4,2 K	3,2 K	
krit. Pkt.	5,2 K	3,3 K	
Dichte ρ	0,125 kg/l	0,058 kg/l	⇐ LH_2 : 0,071 kg/l
Verdampfungs- enthalpie h_v	2,6 kJ/l	0,5 kJ/l	⇐ LN_2 : 162 kJ/l Wasser: 2,3 MJ/l
suprafluid	$T \leq 2,2 \text{ K}$	$T \leq 2,5 \text{ mK}$	Lee/Douglas/Osheroff '71/72 Nobelpreis 1996

Erzeugung tiefster Temperaturen

- Abpumpen He-Bad
- Pomeranchuk-Kühlung
- Adiabate Entmagnetisierung
- $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischer

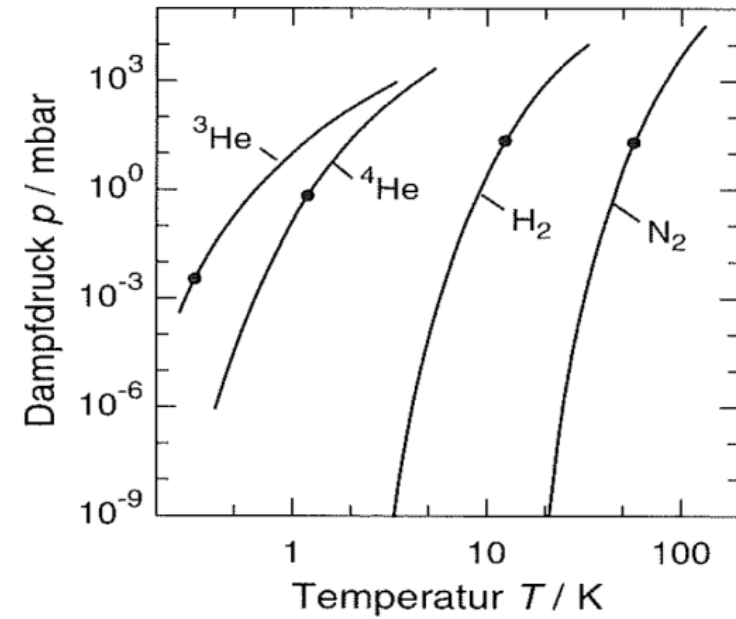
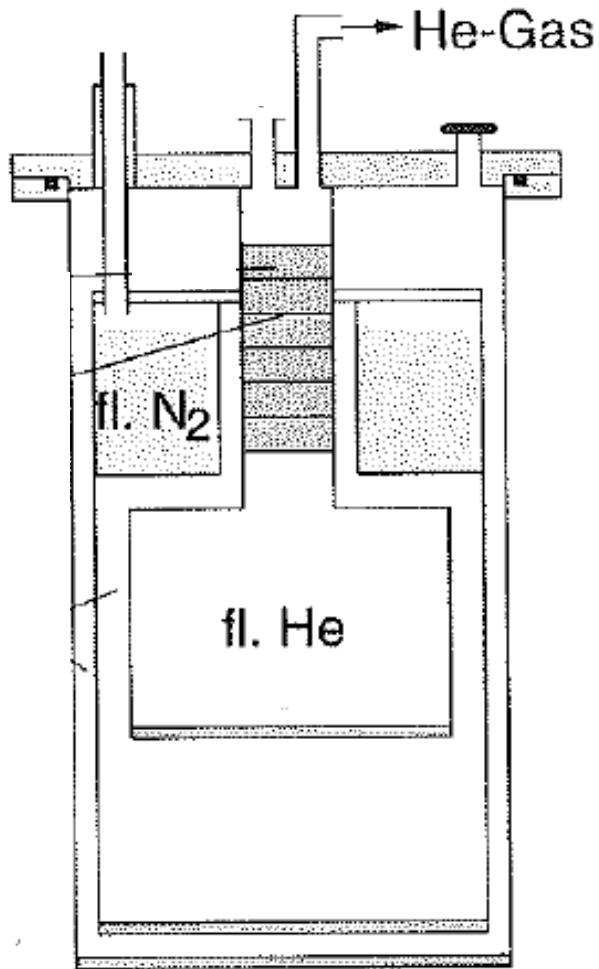
Phasendiagramm ^4He ;

Phasendiagramm ^3He



Abpumpen He-Bad

Abpumpen Dämpfe ^4He ; ^3He



Clausius-Clapeyron:

$$dp/dT = \Delta h / \Delta V \cdot T$$

$$\Delta V = V_{\text{gasf.}} - V_{\text{fl.}} \approx V_{\text{gasf.}}$$

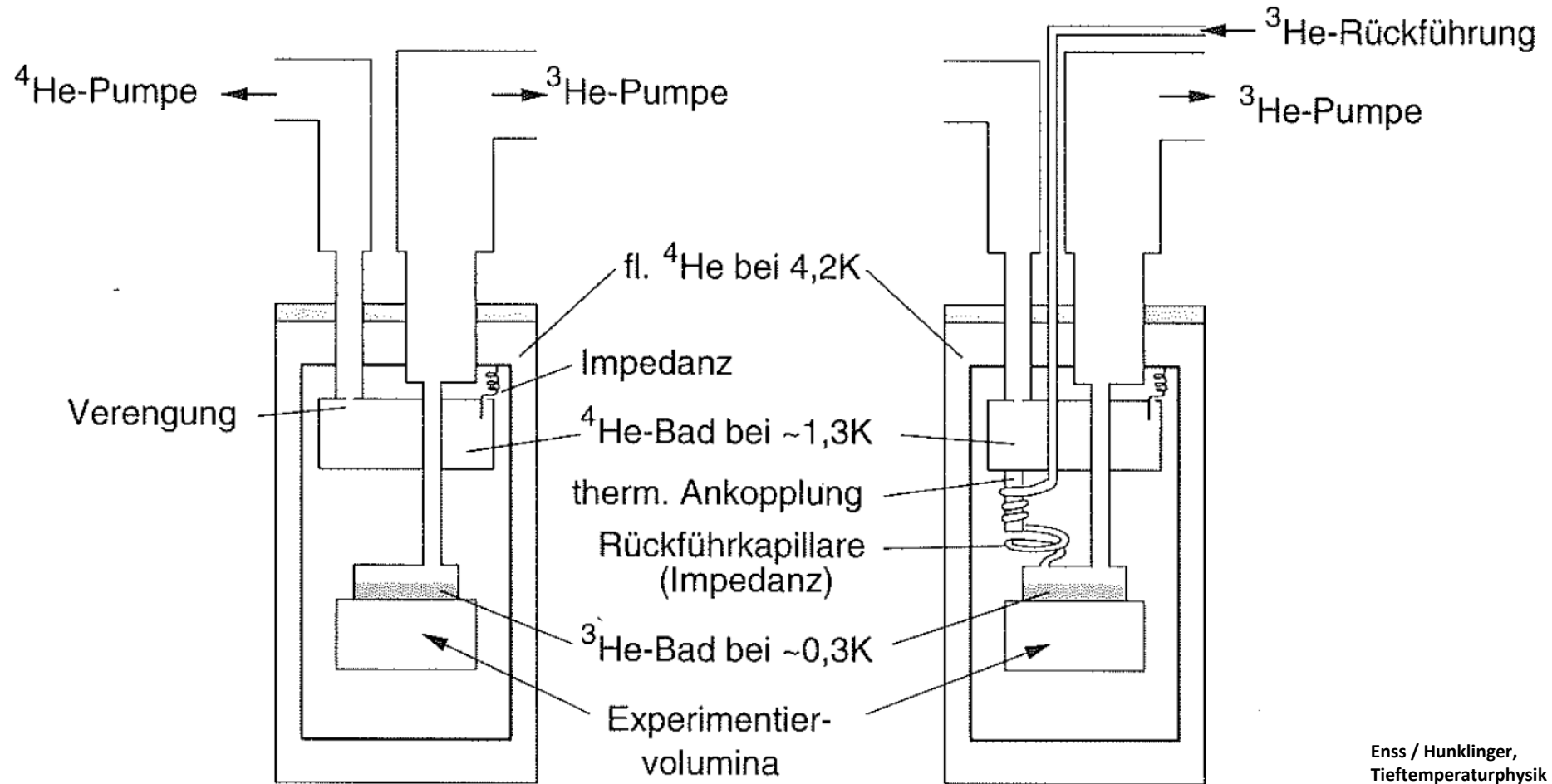
$$p \cdot V_{\text{gasf.}} = n \cdot R \cdot T$$

$$dp/dT = \Delta h \cdot p / n \cdot R \cdot T^2; \text{ DGL: } p(T) = p_0 \cdot e^{-\Delta h / n \cdot R \cdot T}$$

\Rightarrow p bzw. Kühlleistung fällt exponentiell mit T

^3He hat deutlich höheren Dampfdruck

Abpumpen ^3He -Bad



Enss / Hunklinger,
Tiefemperaturphysik

Aufbau ^3He -Verdampferkryostat nichtkont. / kontinuierlich

statt warmer ^3He -Vakuumpumpe alternativ

Kohle-Adsorberpumpe bei ca. 1 K (Regeneration durch Wiederaufwärmen)

Pomeranchuk-Kühlung

^3He -Schmelzdruckkurve, Bereich negativer Schmelzwärme:

flüssige Phase hat größere Ordnung als feste Phase
(Spin-Beiträge)

$$\Rightarrow S_{\text{fest}} > S_{\text{flüssig}}$$

\Rightarrow bei Druckerhöhung Temperaturabsenkung

Kälteleistung proportional zu $T \cdot (S_{\text{fest}} - S_{\text{flüssig}})$

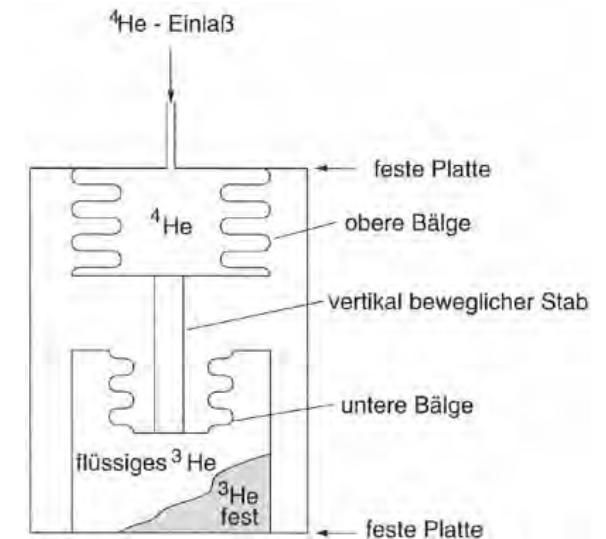
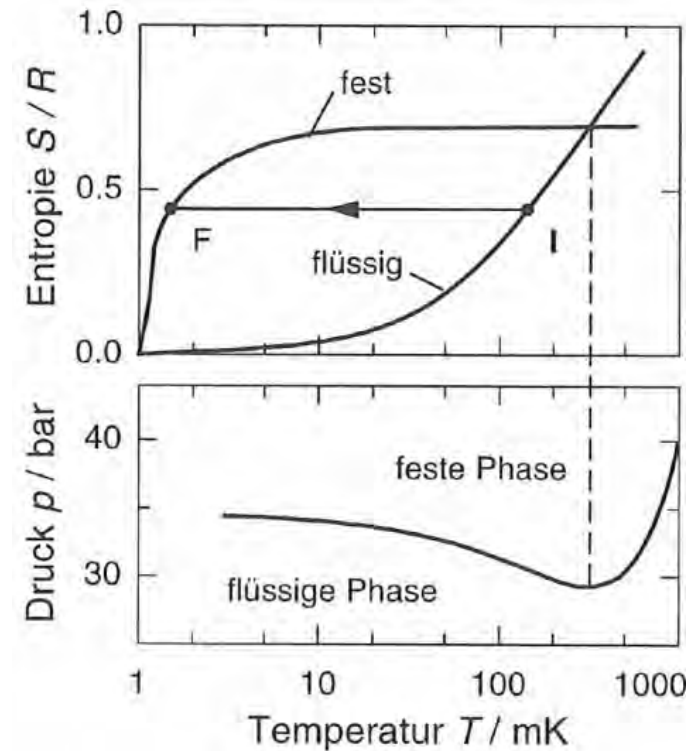
Idee / Entwicklung: Rußland

eingesetzt 1965 ...75

ab $T < 300 \text{ mK}$

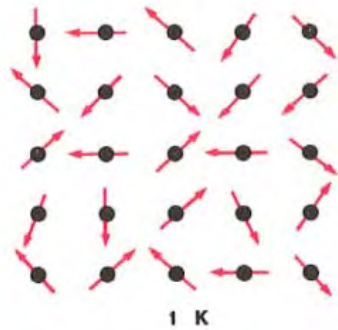
$T_{\text{min}} \approx 1 \text{ mK}$

heute durch $^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischer verdrängt

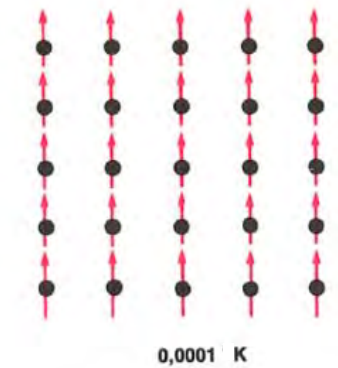
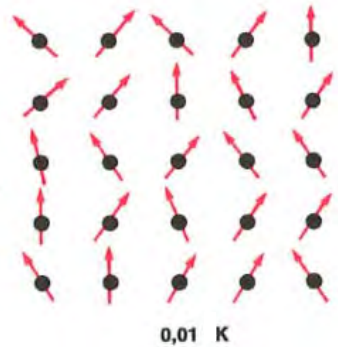


Enss / Hunklinger, Tieftemperaturphysik

Adiabate Entmagnetisierung



magnetische
Ordnung

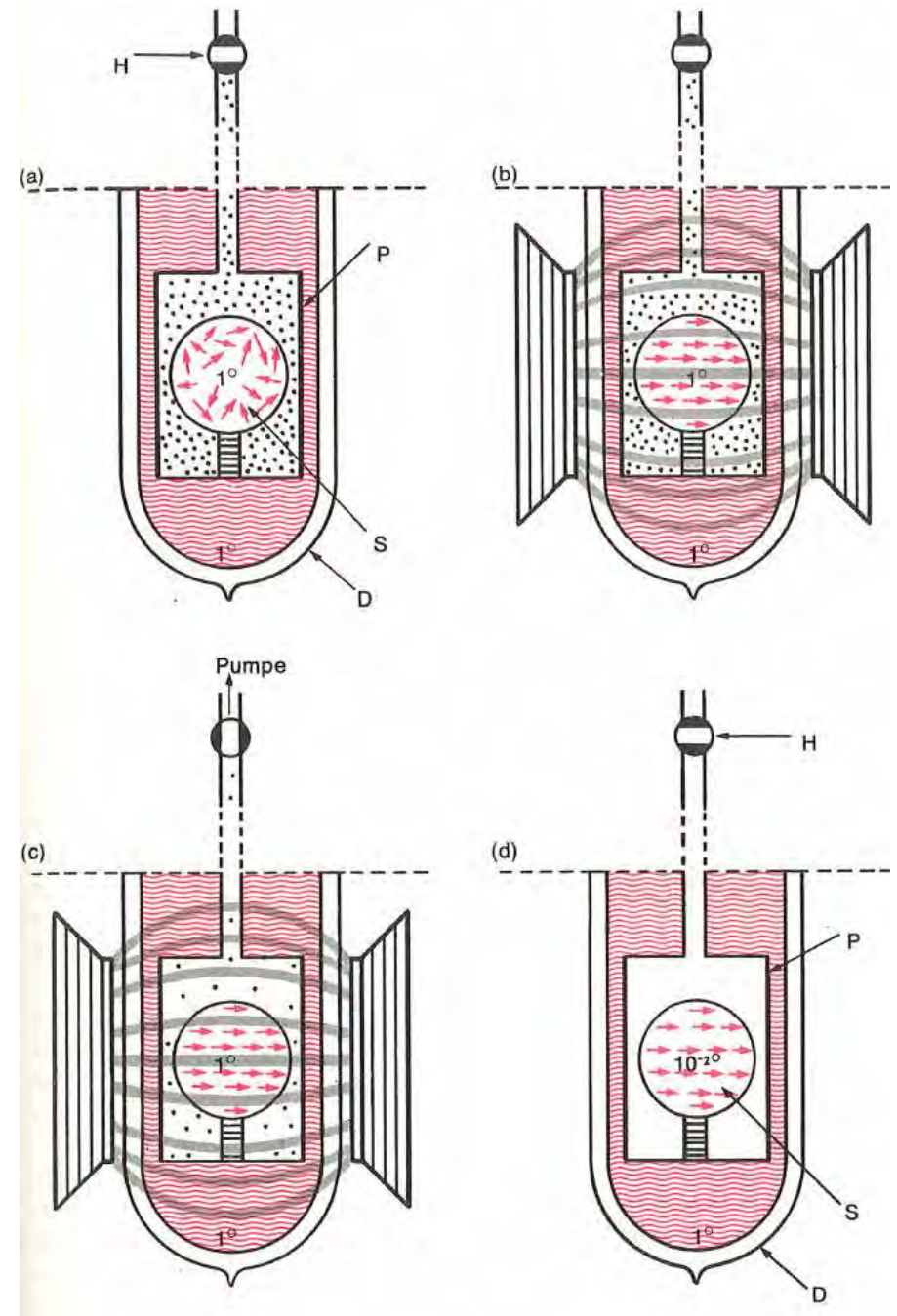


a) Vorkühlung via Kontaktgas

b) Magnetisierung und
Wärmeabfuhr

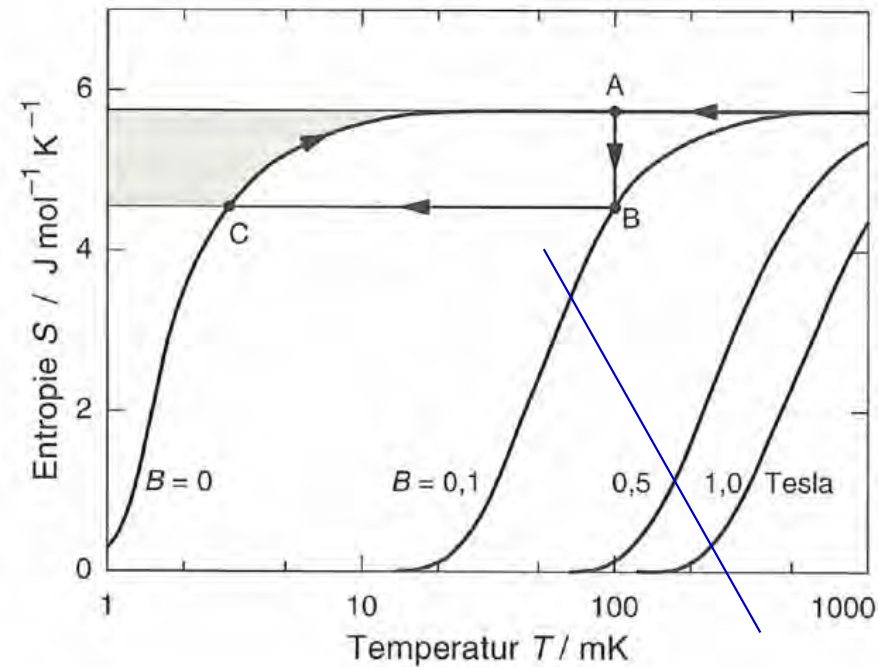
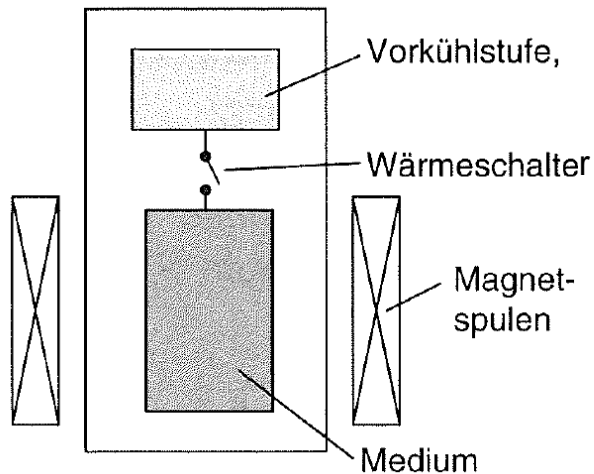
c) Abpumpen Kontaktgas

d) adiabate Entmagnetisierung



aus: Mendelssohn, K., Die Suche nach dem absoluten Nullpunkt

Adiabate Entmagnetisierung



S, T - Diagramm
magnet. Kühlung
Cer-Magnesium-
Nitrat

Enss / Hunklinger,
Tiefemperaturphysik

theoretisch Carnot-Wirkungsgrad erreichbar
(praktisch: recht gering)

1933 (fast zeitgleich)

Giauque / Berkeley + Debye / Leiden:

e⁻-Spin-Entmagnetisierung

paramagnet. Salze wie

Gadoliniumsulfat; Cer-Doppelsalze

typisch: 1 T / 1K \Rightarrow 40 mT / 0,002 K



aktuell auch für Kühlung nahe
Raumtemperatur untersucht
(Gd; LaFeSi, ...)

1956 Kurti + Simon / Oxford:

Kernspin-Entmagnetisierung (Metalle)

magnet. Moment Atomkerne Faktor 10^3 kleiner

Relaxationszeit Tage ... Wochen

10 T / 10 mK, dann $B \rightarrow 0$

Weltrekord:

Prof. F. Pobell et al., Univ. Bayreuth, 1996

1,5 μ K Gittertemp. (Platinzylinder)

0,3 nK Kerntemperatur

$^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischerkryostate (Dilution-Refrigerator)

Grundlage: Mischungslücke bei $T < 0,8 \text{ K}$; nur 6,4 % ^3He in ^4He gelöst

das “in-Lösung-Gehen” des ^3He entspricht einer Verdampfung; $T \rightarrow 1,9 \text{ mK}$

^4He -Inventar suprafluid, keine Wechselwirkung mit ^3He

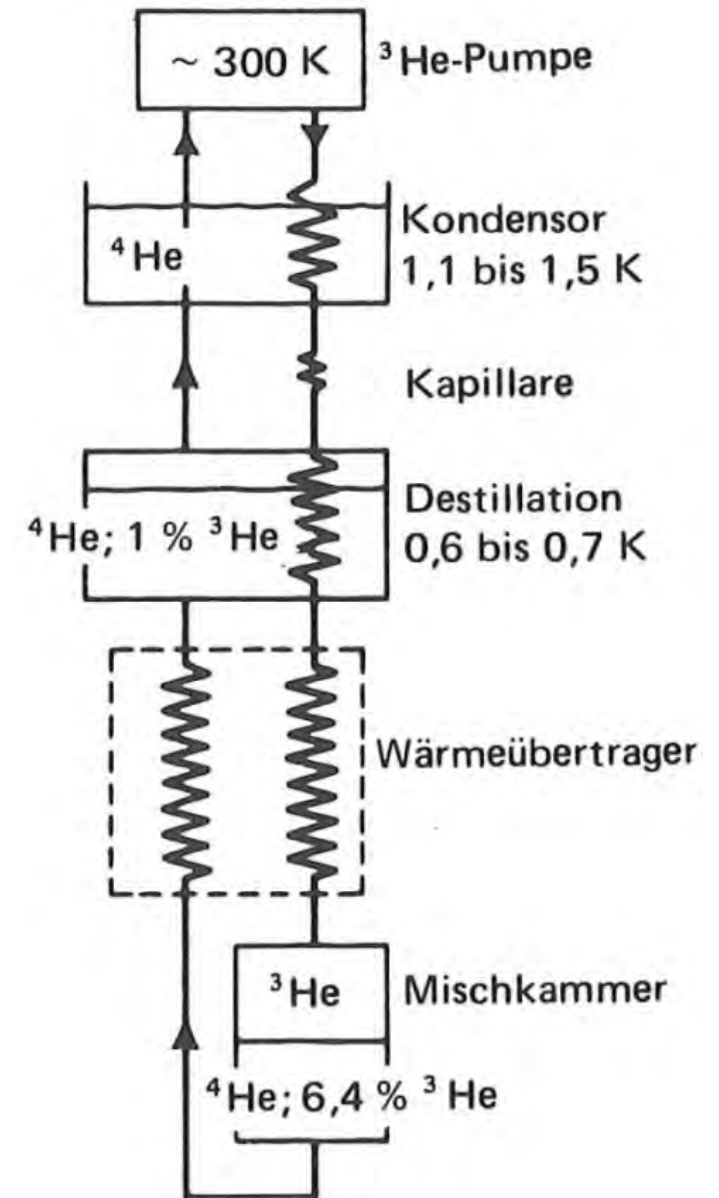
Abkühlung: Expansion bzw. Verdampfung der Quasiflüssigkeit ^3He

schwierigstes Bauteil: Wärmeübertrager

^4He suprafluid \Rightarrow störende Längs-Wärmeleitung

erhöhter (Kapitza-)Widerstand zwischen FK und LHe

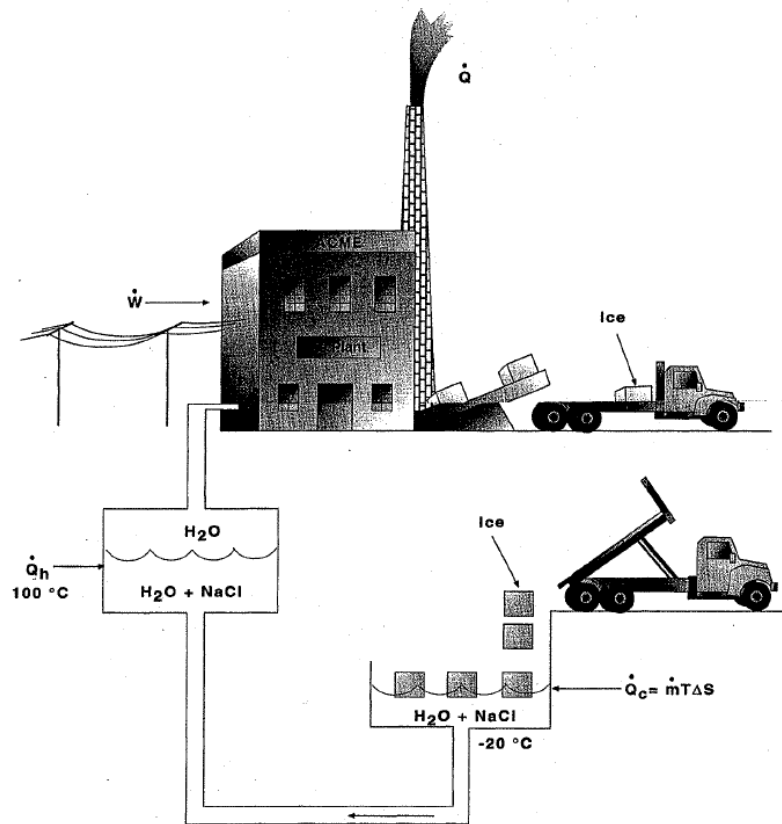
$\sim 500 \text{ m}^2$ WÜ-Fläche (Ag-Sinterschicht, mehrstufig)



$^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischkryostate (Dilution-Refrigerator)

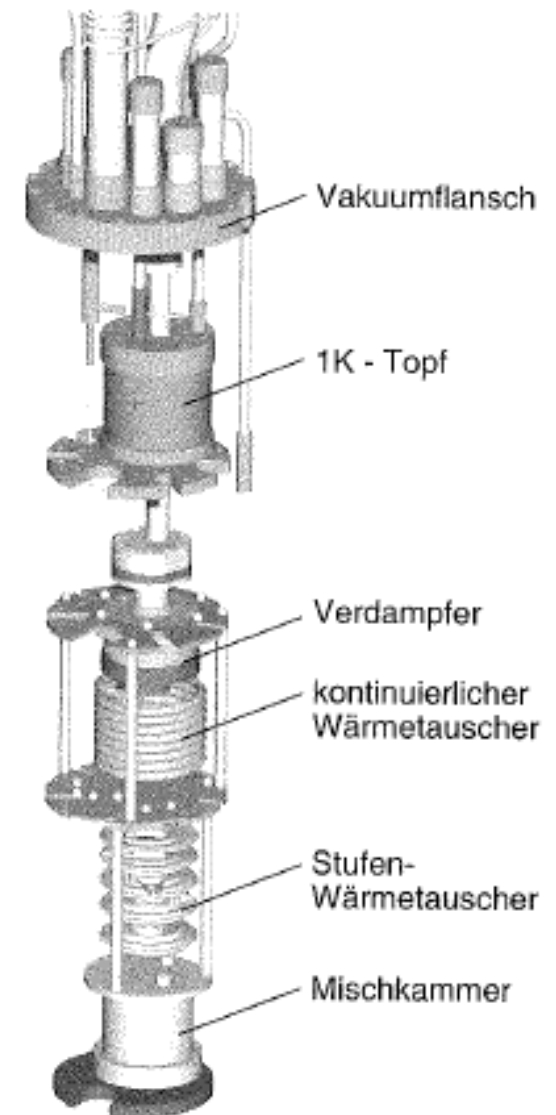
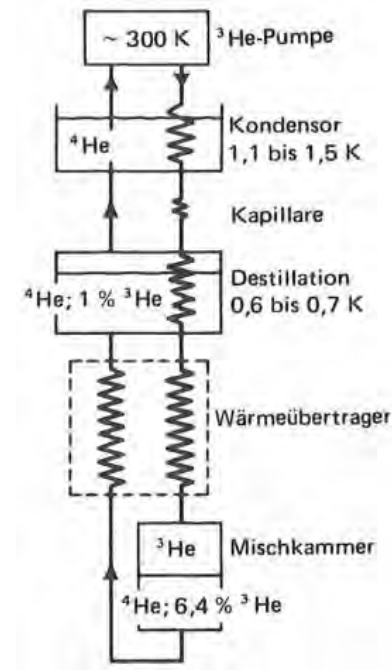
als kommerzielle Geräte erhältlich, weit verbreitet

typ.: Kälteleistung $40 \mu\text{W}$ @ 10 mK



Analogie Salzlösung

(Flynn, Th., Cryogenic Engineering)



Enss / Hunklinger, Tieftemperaturphysik