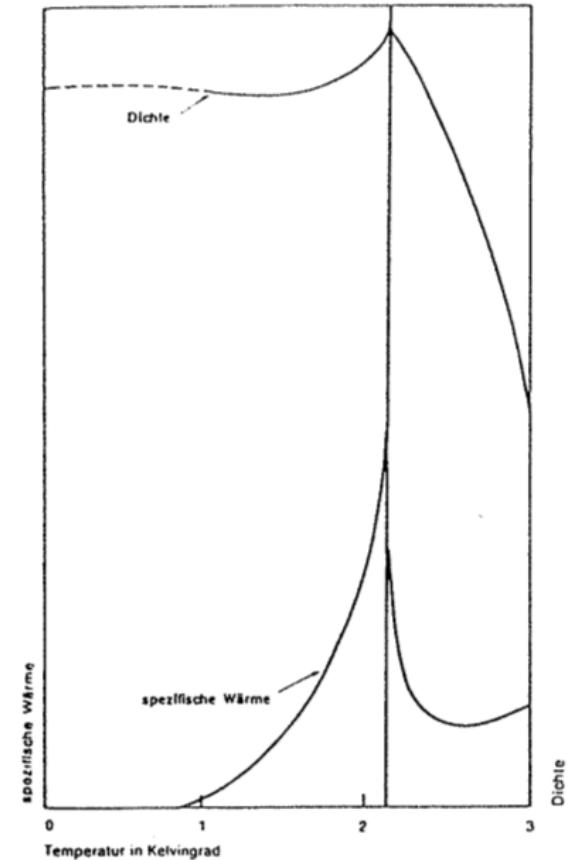
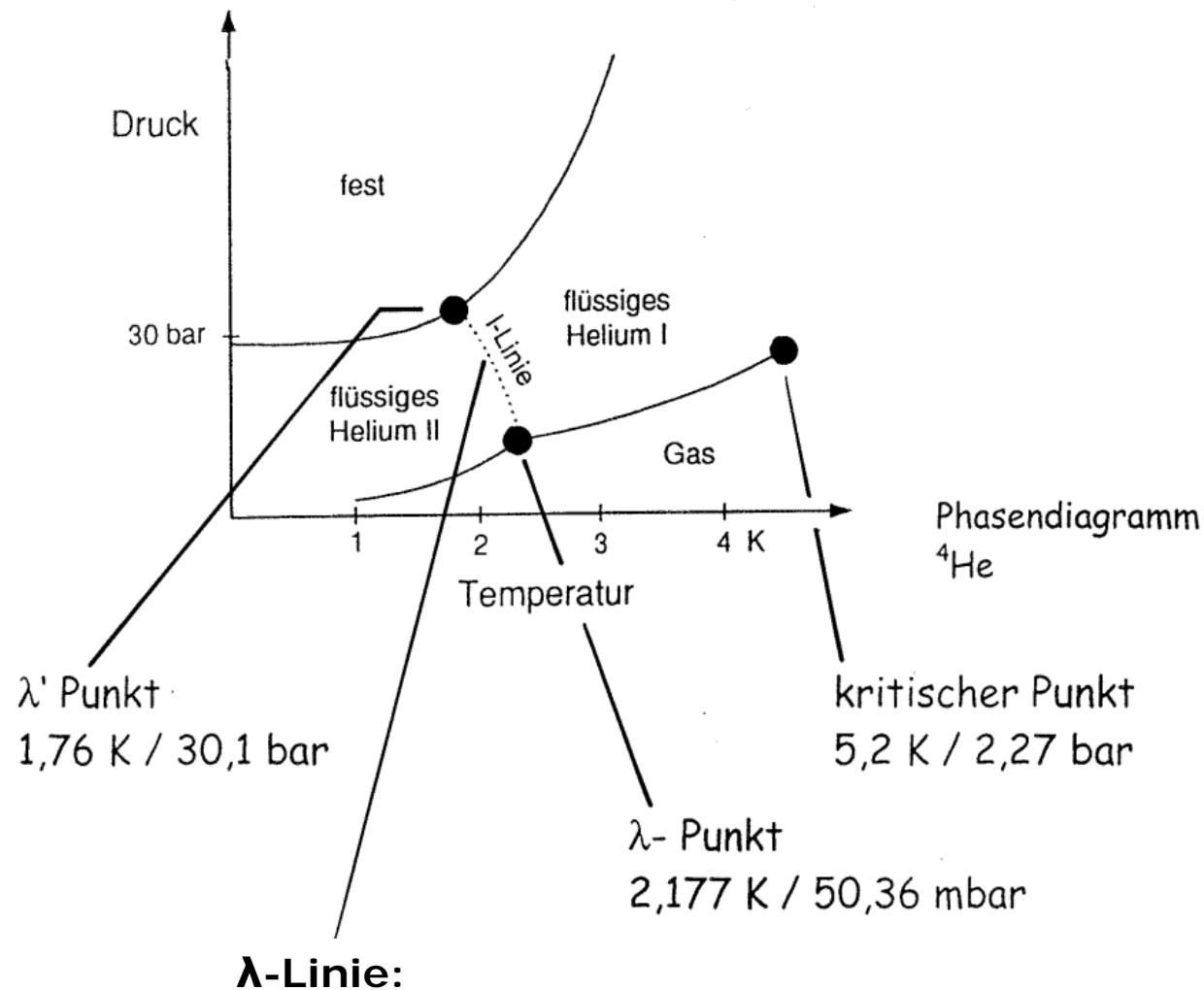


# Helium

## Phasendiagramm ${}^4\text{He}$



**$\lambda$ -Linie:**

**Phasenübergang 2. Ordnung** keine Umwandlungsenthalpie

$c_p$ , Transportkoeffizienten: ändern sich

innere Energie, Dichte: stetig; Ableitung unstetig

# Helium

## Zweiflüssigkeitsmodell:

suprafluide Komponente:

keine Entropie;  $s_s = 0$

keine Viskosität;  $\eta_s = 0$

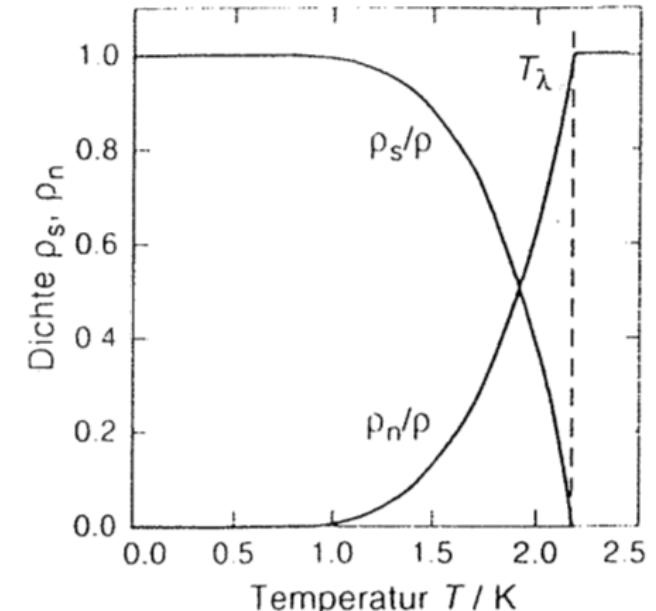
normalfluide Komponente:

$s_n = s(T)$

$\eta_n = \eta$

keine Wechselwirkung zwischen  $s$  und  $n$

z.B. wechselseitiges Durchströmen möglich



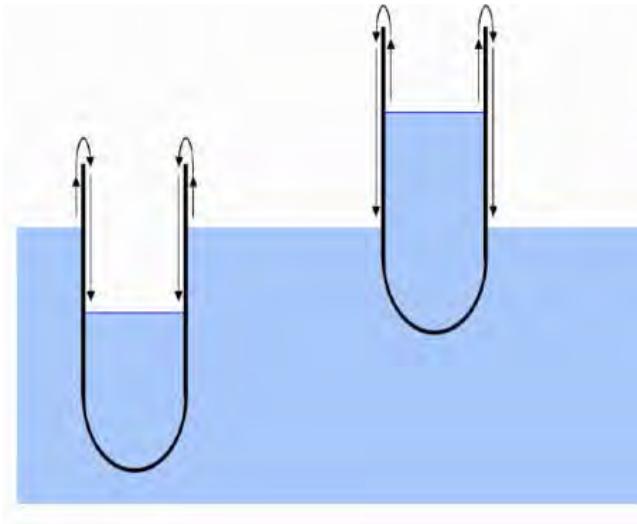
**LHe I** „normale“ Eigenschaften  
*klare Flüssigkeit;*  
 $\rho = 125 \text{ kg/m}^3$

allgemein: Quantenflüssigkeit  
(Nullpunktsenergie > Bindungsenergie)

**LHe II** suprafluid (superfluid)  
 $\lambda_{HeII} \approx 10^6 \cdot \lambda_{HeI}$   
 $\Rightarrow$  *keine merklichen Temperaturgradienten*  
 $\Rightarrow$  *kein Sieden (Abdampfen von der Oberfläche)*  
*Viskosität  $\rightarrow 0$*

MPI Göttingen (Herbst 2000):  
Suprafluidität bei  $H_2$   
nachgewiesen ( $T = 0,15 \text{ K}$ )

# Helium



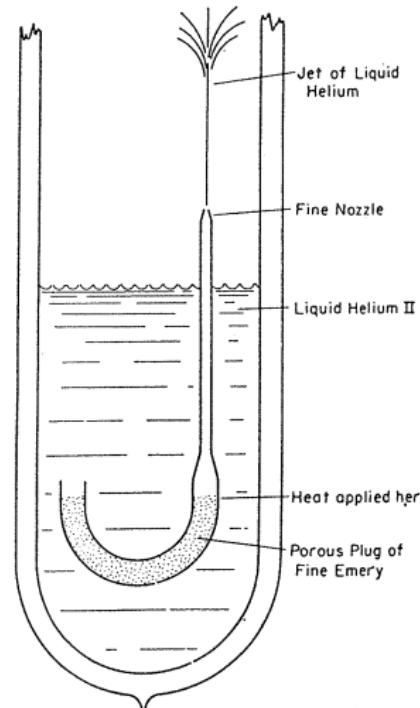
Filmkriechen

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

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

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

unabhängig von  $\Delta p$



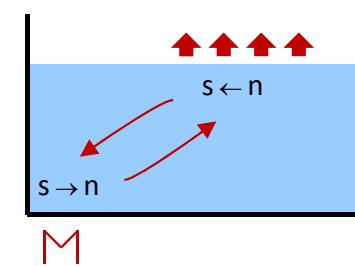
Thermomech. Effekt

He II folgt dem Temp.grad.

Super Leck  $\rightarrow$  (Super Filter)

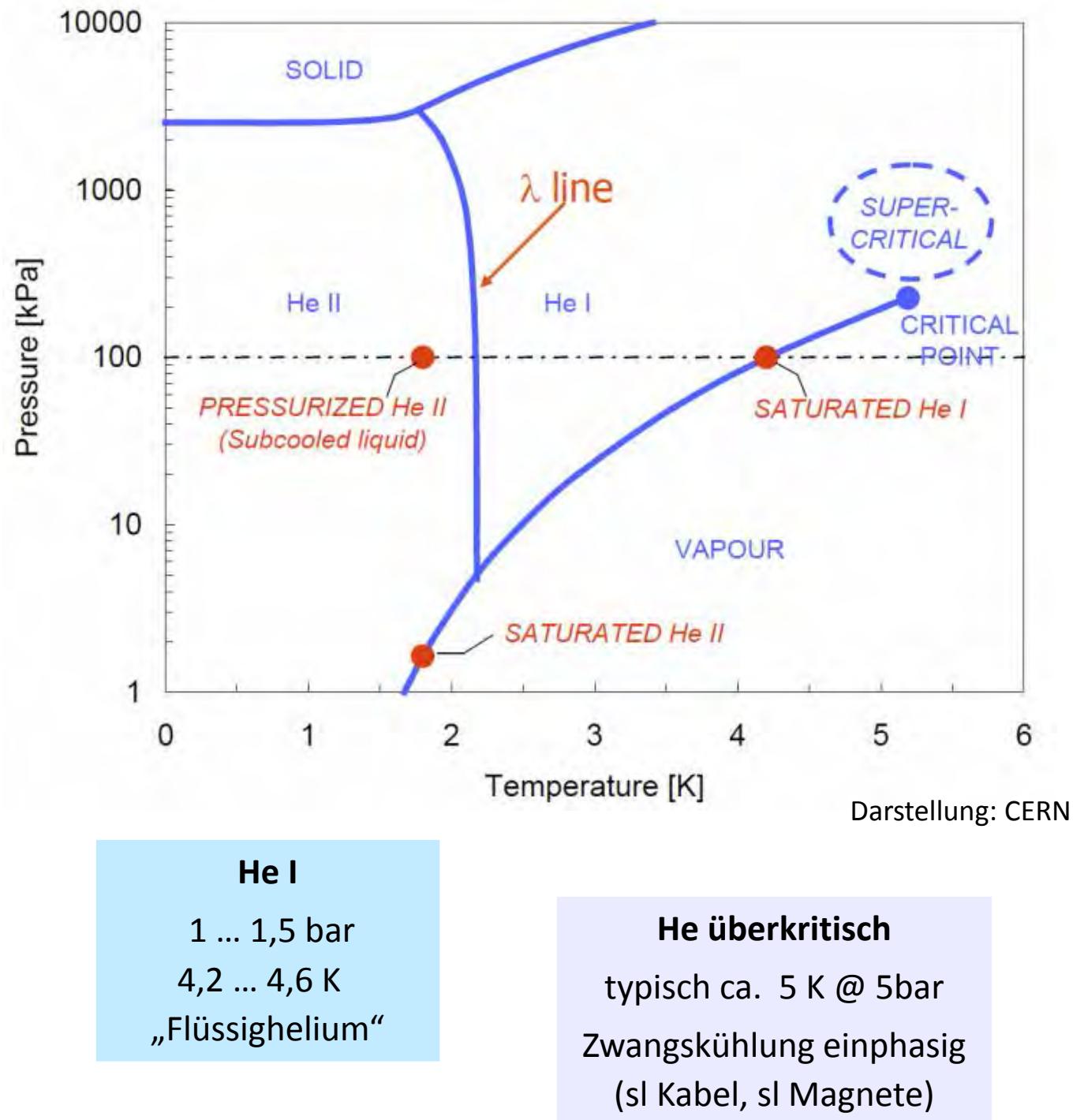
Porengröße  $1\dots0,1 \mu\text{m}$   
nur für He II durchlässig

Fontäneneffekt



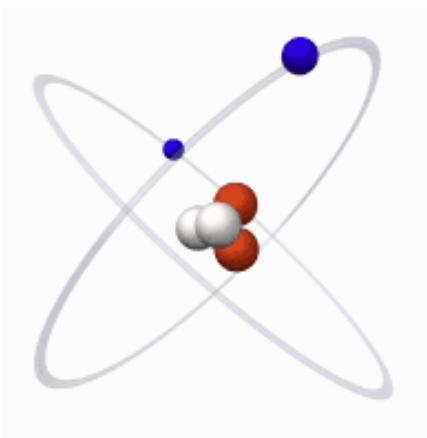
Erklärung exzellente  
Wärmeleitung He-II

# Helium

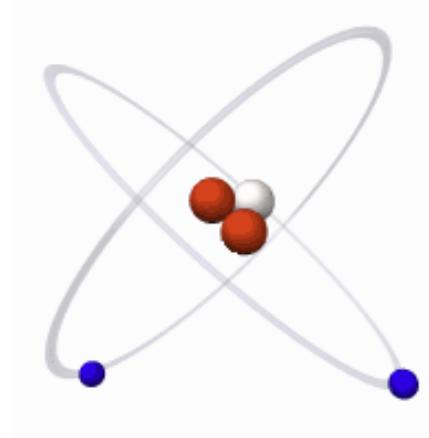


# Helium

## zwei stabile Isotope



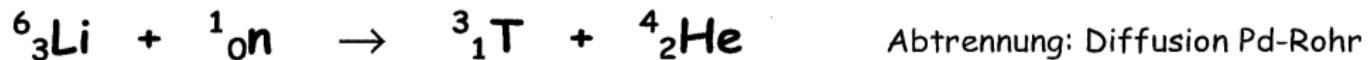
${}^4_2\text{He}$  99,9999 %



${}^3_2\text{He}$  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



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

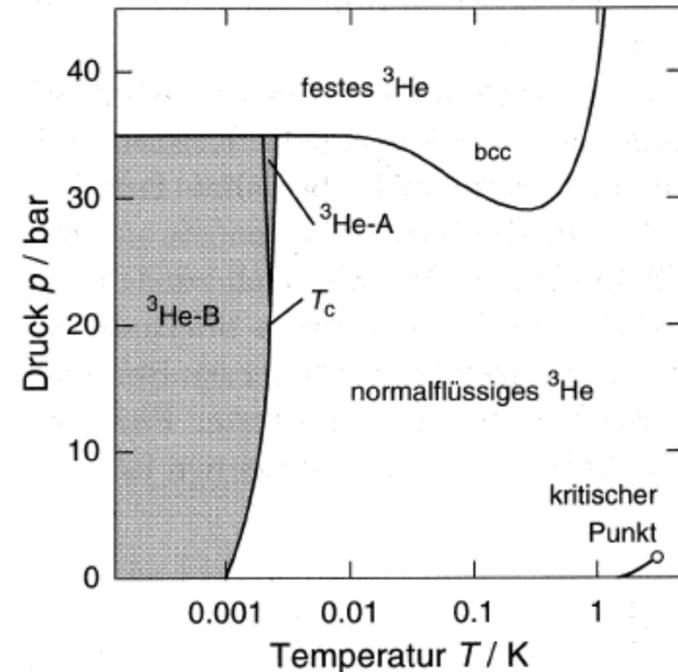
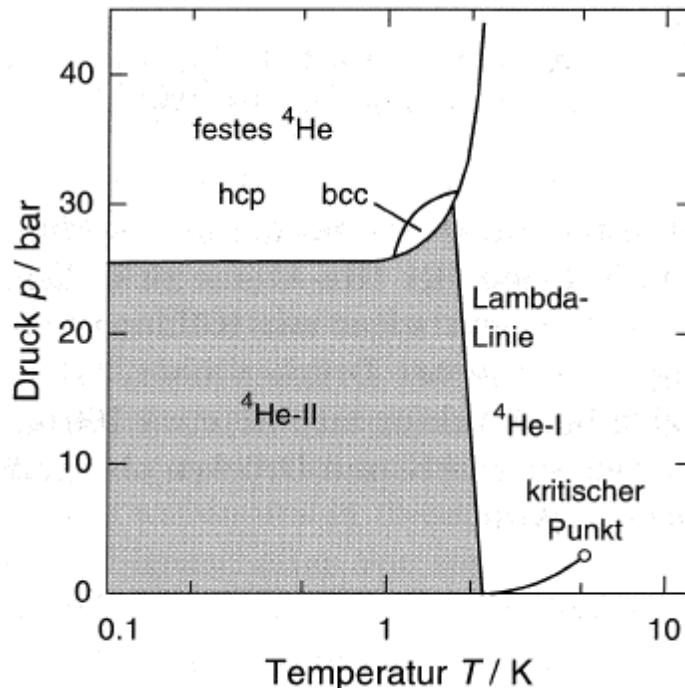
~~$1000,- \text{ € / l}_{\text{gasf.}}$~~   $\approx 450\,000 \text{ € / l}_{\text{fl.}}$

Alternative:

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

„mining on the moon“ !?

# Helium

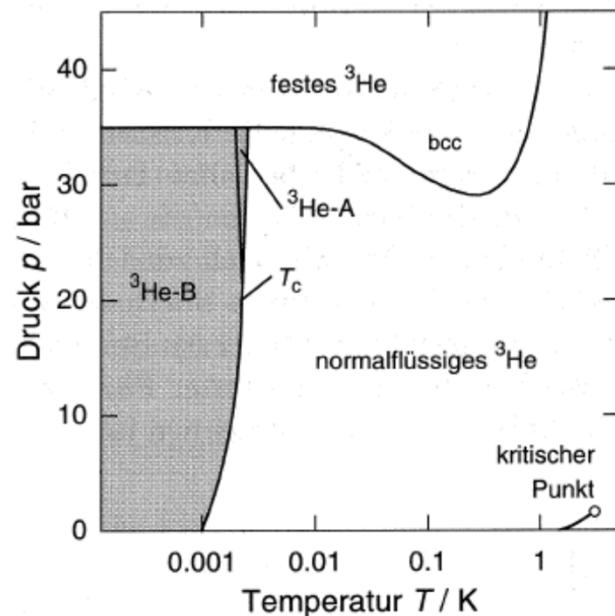
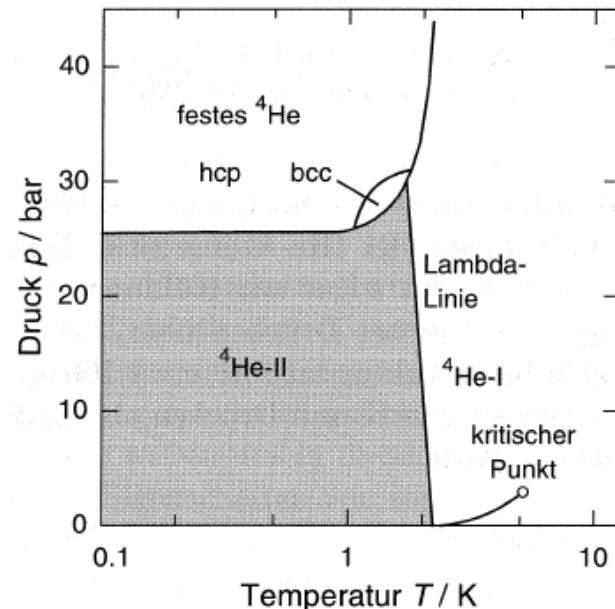


	$^4\text{He}$	$^3\text{He}$	
$T_s$	<b>4,2 K</b>	<b>3,2 K</b>	
krit. Pkt.	<b>5,2 K</b>	<b>3,3 K</b>	
Dichte $\rho$	<b>0,125 kg/l</b>	<b>0,058 kg/l</b>	$\Leftrightarrow \text{LH}_2: 0,071 \text{ kg/l}$
Verdampfungs-enthalpie $h_v$	<b>2,6 kJ/l</b>	<b>0,5 kJ/l</b>	$\Leftrightarrow \text{LN}_2: 162 \text{ kJ/l}$ Wasser: 2,3 MJ/l
suprafluid	<b><math>T \leq 2,2 \text{ K}</math></b>	<b><math>T \leq 2,5 \text{ mK}</math></b>	Lee/Douglas/Osheroff '71/72 Nobelpreis 1996

# Erzeugung tiefster Temperaturen

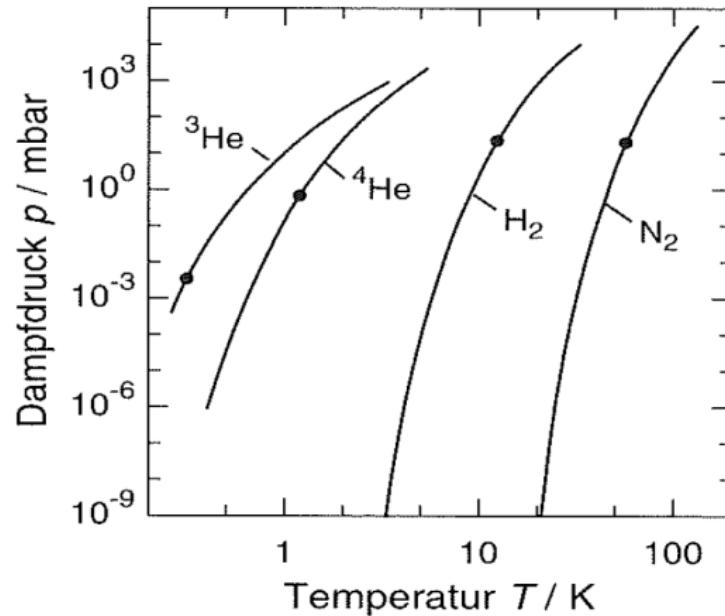
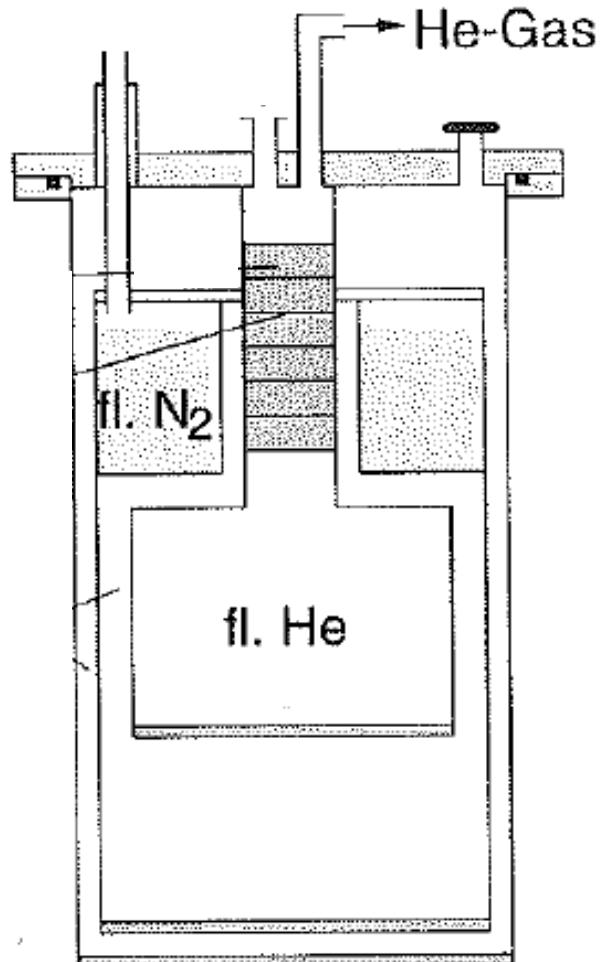
- **Abpumpen He-Bad**
- **Pomeranchuk-Kühlung**
- **Adiabate Entmagnetisierung**
- **$^3\text{He}/^4\text{He}$ -Mischer**

Phasendiagramm  $^4\text{He}$ ;  
Phasendiagramm  $^3\text{He}$



# Abpumpen He-Bad

Abpumpen Dämpfe  ${}^4\text{He}$ ;  ${}^3\text{He}$



Clausius-Clapeyron:

$$\frac{dp}{dT} = \Delta h / \Delta V \cdot T$$

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

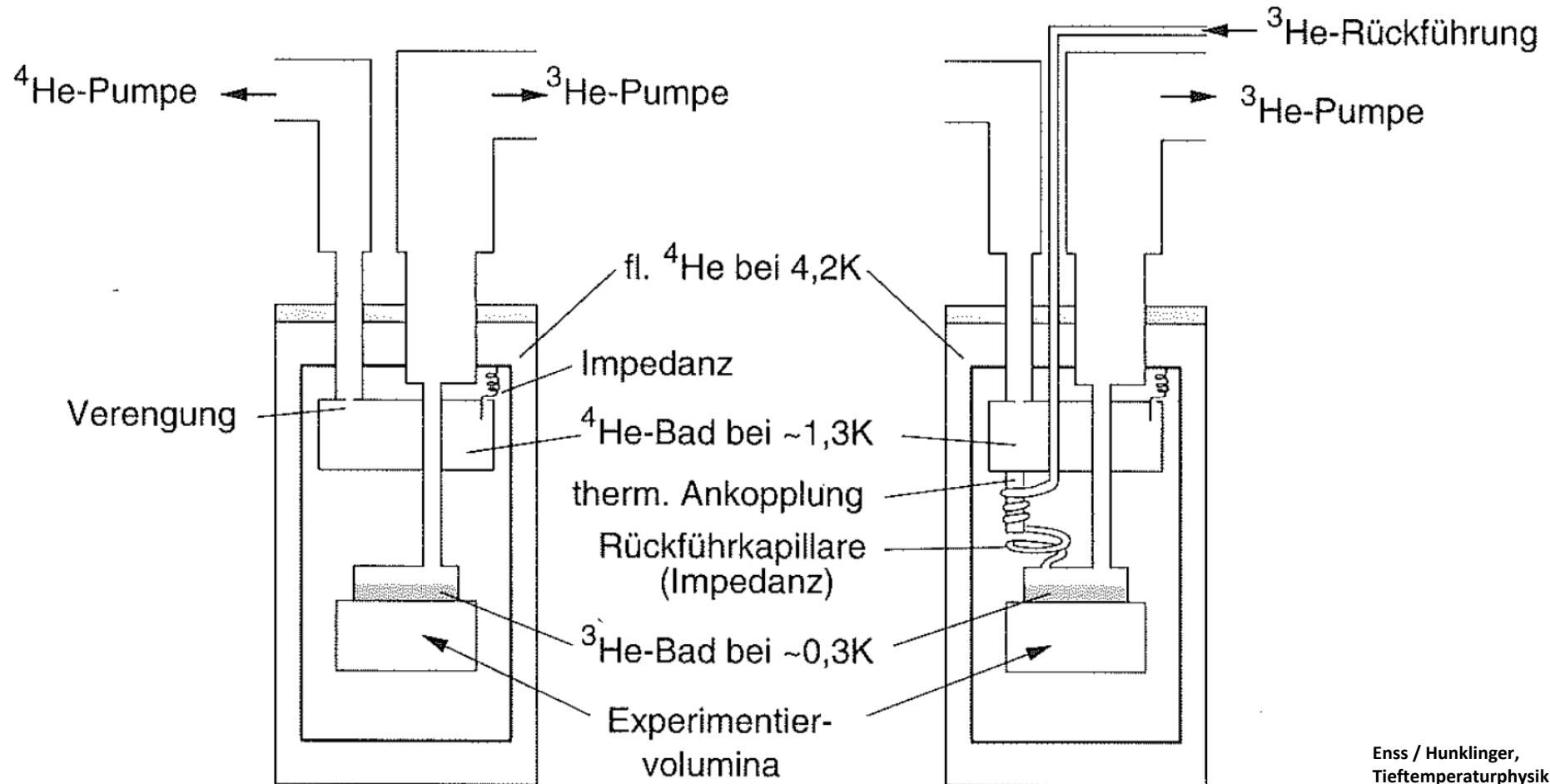
$$p \cdot V_{\text{gasf.}} = n \cdot R \cdot T$$

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

⇒  $p$  bzw. Kühlleistung fällt exponentiell mit  $T$

${}^3\text{He}$  hat deutlich höheren Dampfdruck

# Abpumpen $^3\text{He}$ -Bad



Enss / Hunklinger,  
Tieftemperaturphysik

## Aufbau $^3\text{He}$ -Verdampferkryostat nichtkont. / kontinuierlich

statt warmer  $^3\text{He}$ -Vakuumpumpe alternativ

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

# Pomeranchuk-Kühlung

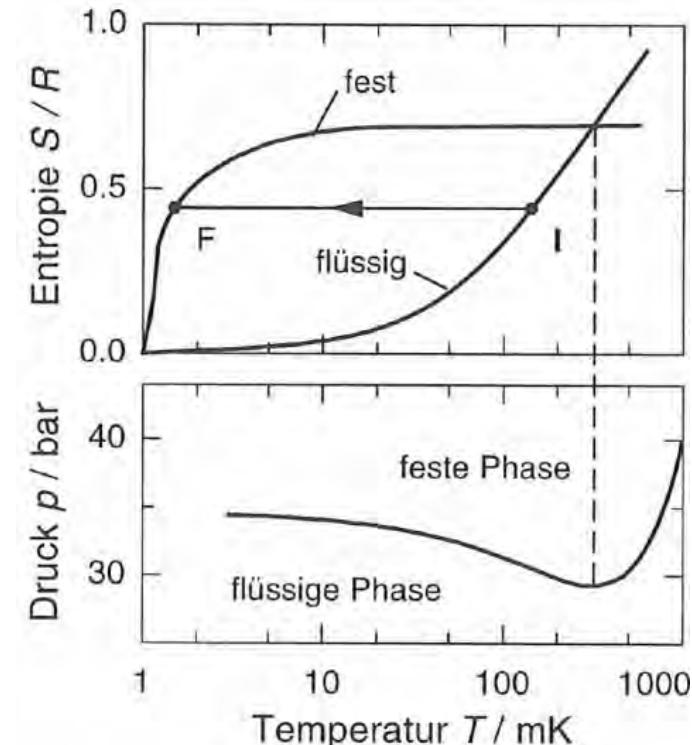
$^3\text{He}$ -Schmelzdruckkurve, Bereich negativer Schmelzwärme:

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

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

$\Rightarrow$  bei Druckerhöhung Temperaturabsenkung

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



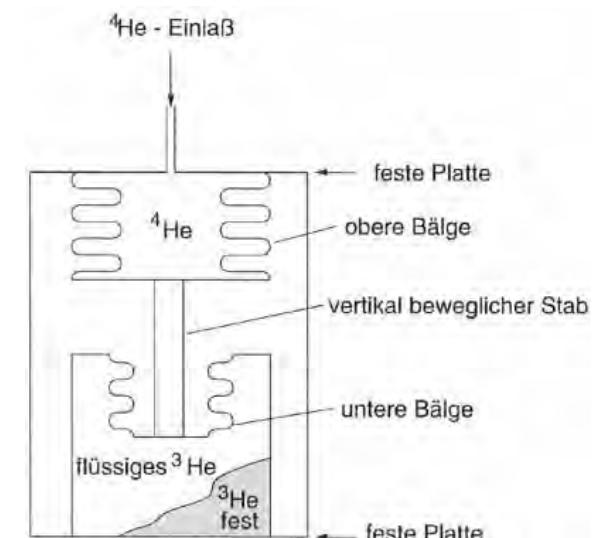
Idee / Entwicklung: Rußland

eingesetzt 1965 ...75

ab  $T < 300$  mK

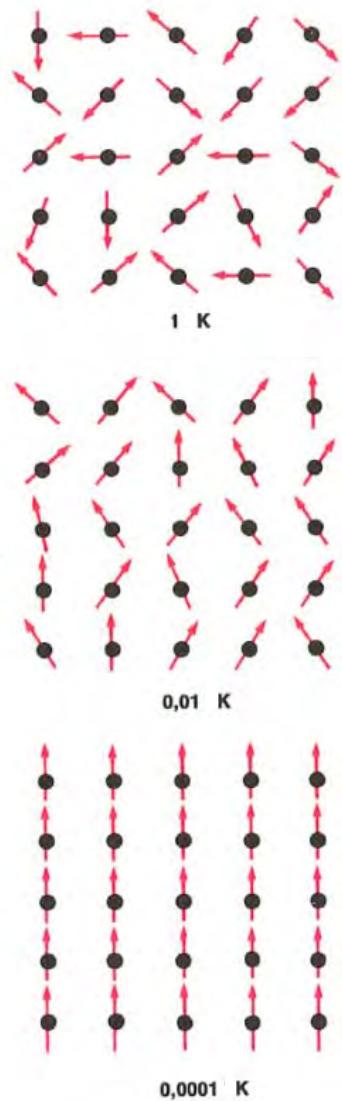
$T_{\min} \approx 1$  mK

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



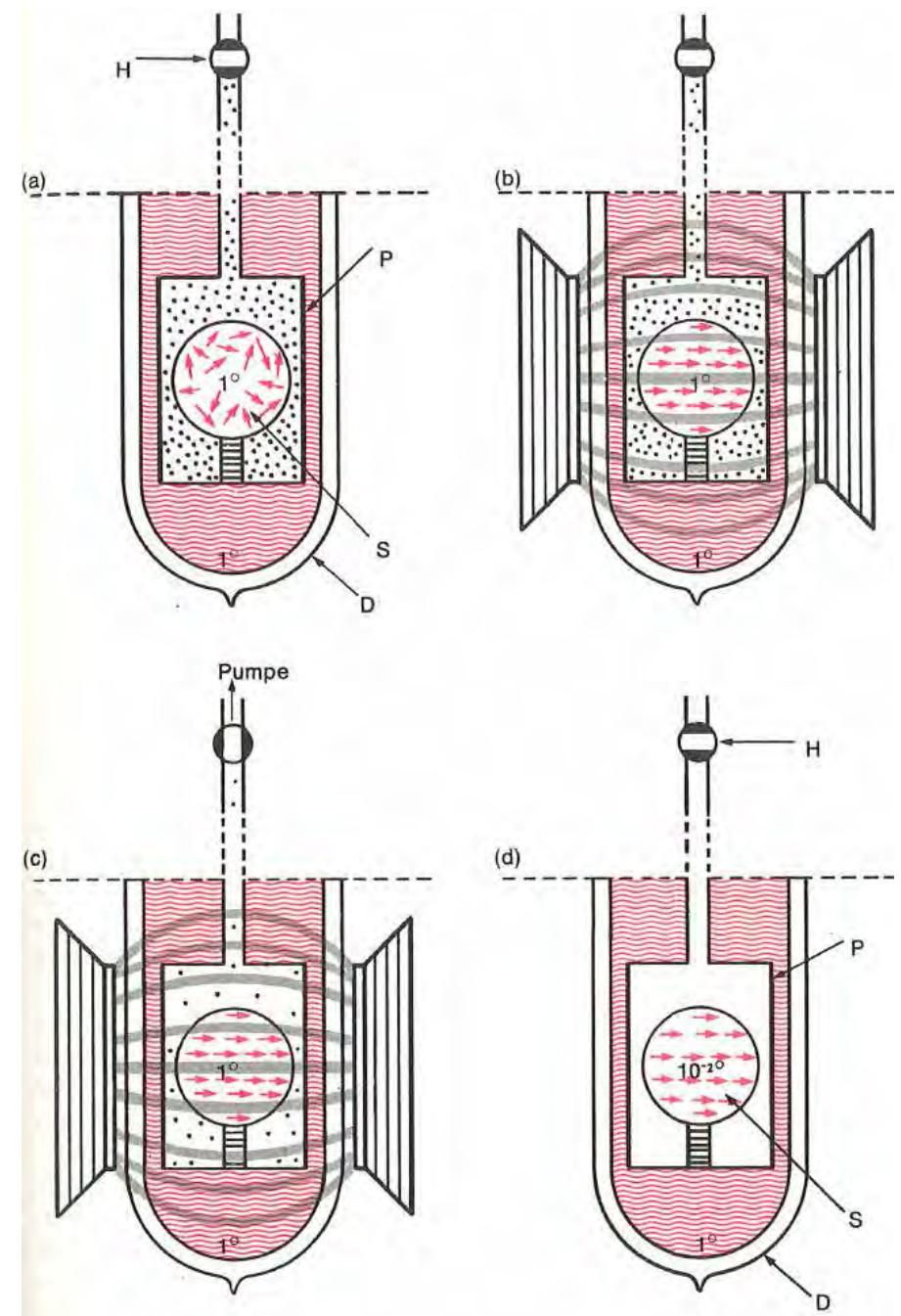
Enss / Hunklinger, Tieftemperaturphysik

# Adiabate Entmagnetisierung



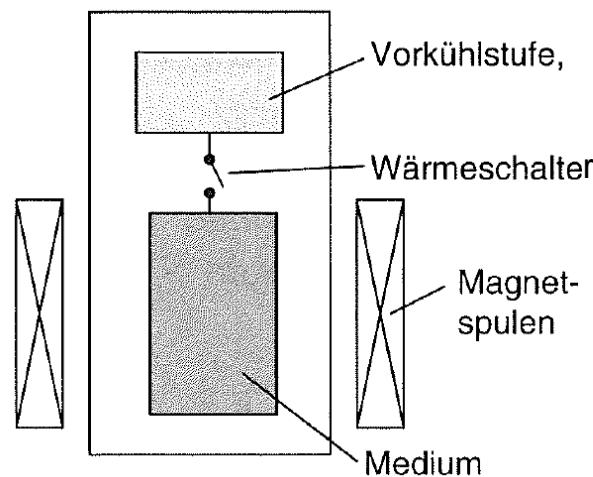
magnetische  
Ordnung

- a) Vorkühlung via Kontaktgas
- b) Magnetisierung und Wärmeabfuhr
- c) Abpumpen Kontaktgas
- d) adiabate Entmagnetisierung



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

# Adiabate Entmagnetisierung



1933 (fast zeitgleich)

Giauque / Berkeley + Debye / Leiden:

**e<sup>-</sup>-Spin-Entmagnetisierung**

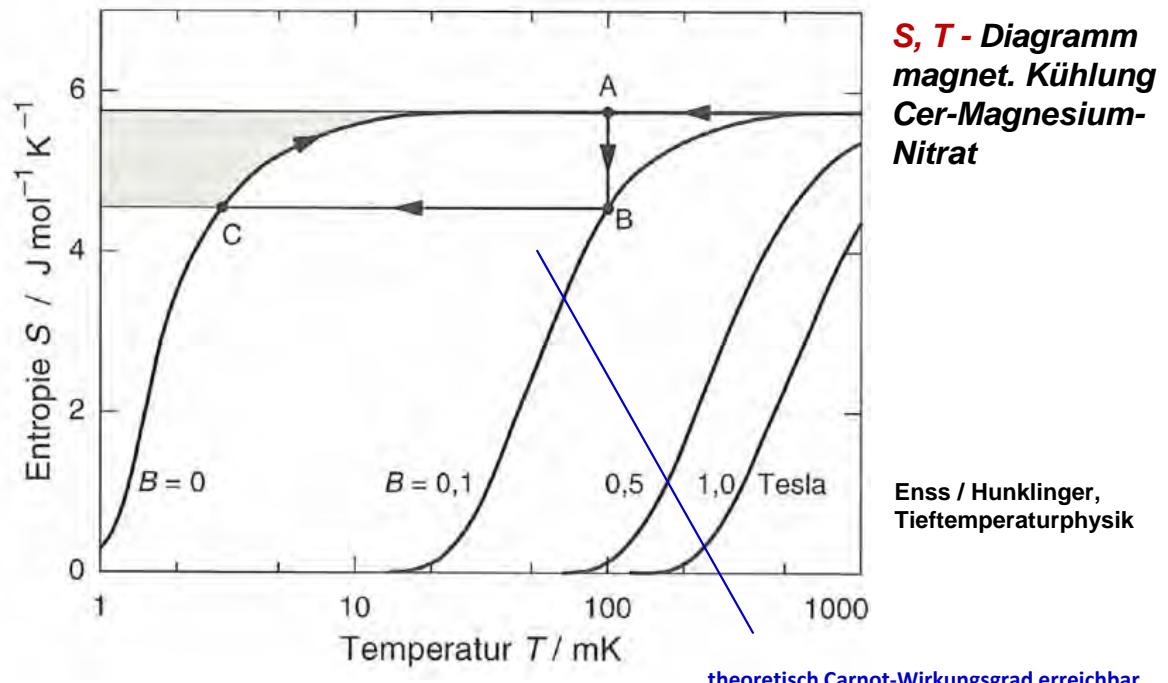
paramagnét. Salze wie

Gadoliniumsulfat; Cer-Doppelsalze

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



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



theoretisch Carnot-Wirkungsgrad erreichbar  
(praktisch: recht gering)

1956 Kurti + Simon / Oxford:

**Kernspin-Entmagnetisierung (Metalle)**

magnet. Moment Atomkerne Faktor 10<sup>3</sup> kleiner

Relaxationszeit Tage ... Wochen

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

Weltrekord:

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

**1,5 µK 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 %  $^3\text{He}$  in  $^4\text{He}$  gelöst

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

$^4\text{He}$ -Inventar suprafluid, keine Wechselwirkung mit  $^3\text{He}$

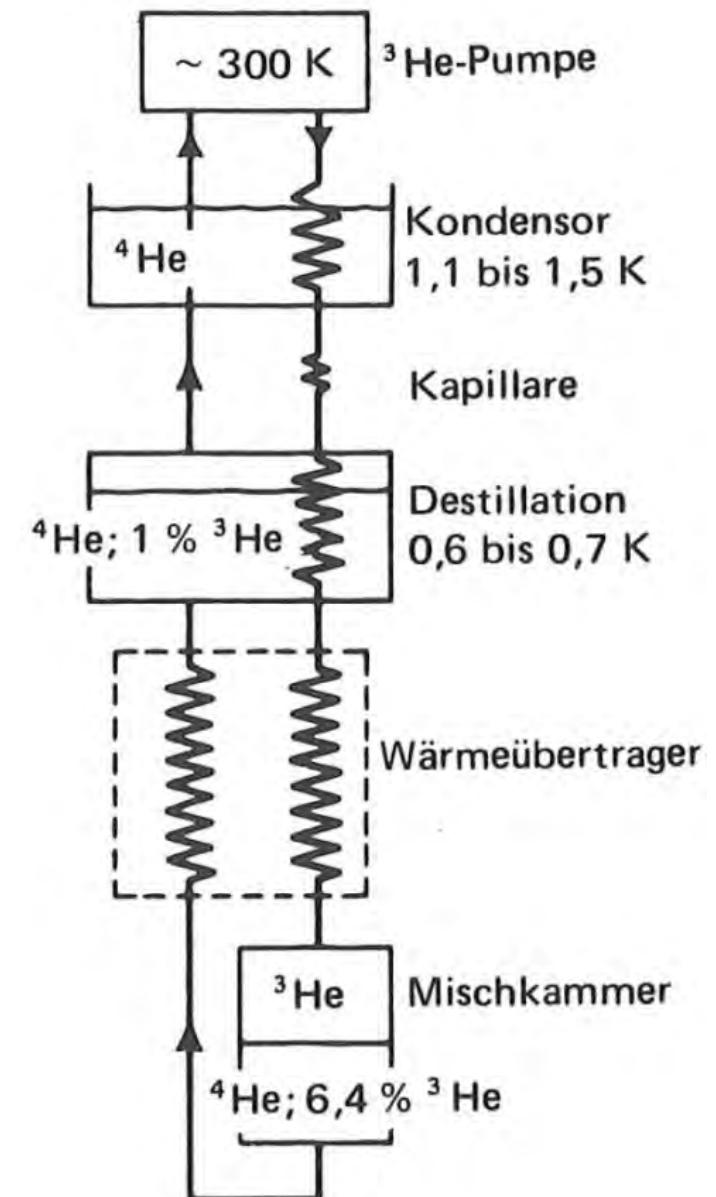
Abkühlung: Expansion bzw. Verdampfung der Quasiflüssigkeit  $^3\text{He}$

schwierigstes Bauteil: Wärmeübertrager

$^4\text{He}$  suprafluid  $\Rightarrow$  störende Längs-Wärmeleitung

erhöhter (Kapitza-)Widerstand zwischen FK und LHe

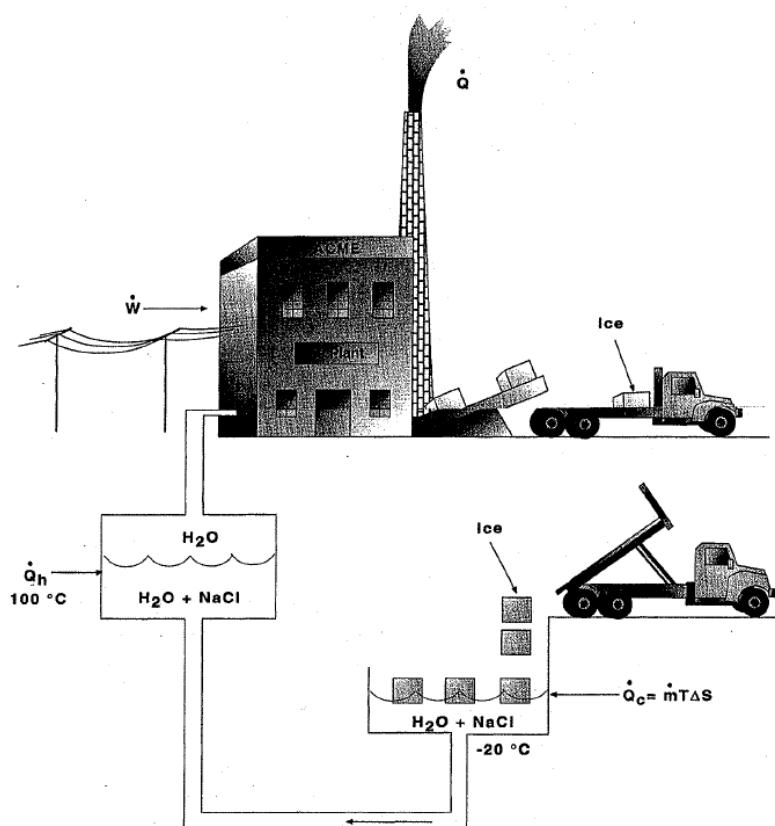
$\sim 500 \text{ m}^2$  WÜ-Fläche (Ag-Sinterschicht, mehrstufig)



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

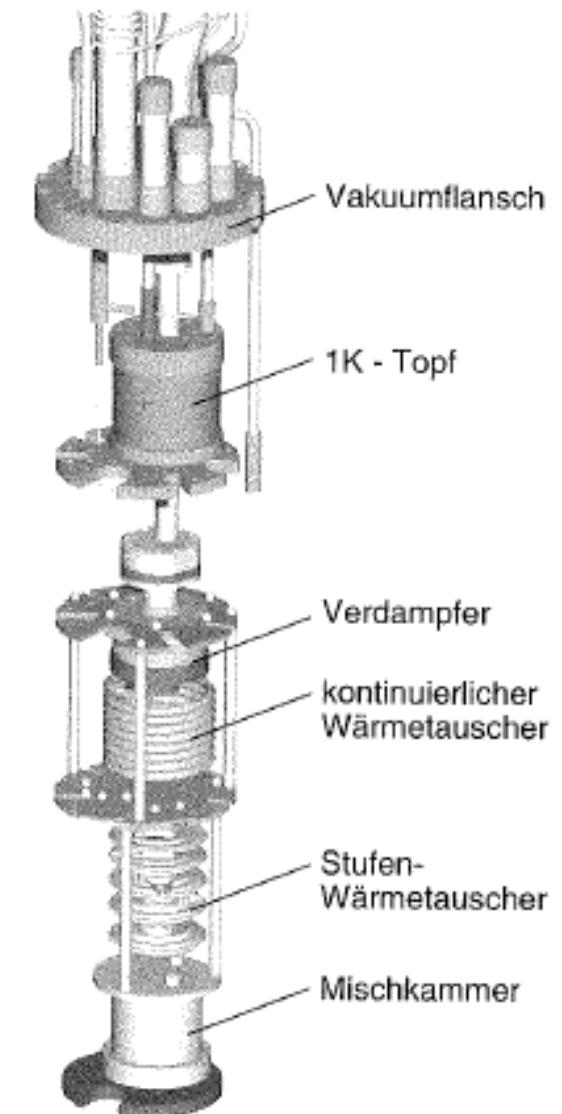
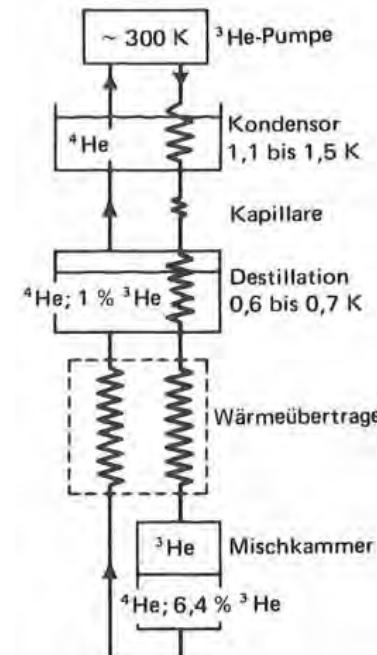
als kommerzielle Geräte erhältlich, weit verbreitet

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



Analogie Salzlösung

(Flynn, Th., Cryogenic Engineering)



Enss / Hunklinger, Tieftemperaturphysik