

Suprafluides Helium

Eine Einführung

Vortrag im Rahmen des Oberseminars
im 8. Semester Physik

Daniel Lehmann

1. Juli 2004

Gliederung

1. Helium
2. Helium bei tiefen Temperaturen
3. Suprafluide Eigenschaften
4. Zwei-Flüssigkeits-Modell
5. Zusammenfassung

1. Helium

- Entdeckung 1895 von *W. Ramsay* (aus Thorium-Zerfall)
- Elektronenkonfiguration $1s^2$
- betreibt keine Chemie
- 2 stabile Isotope: ^4He und ^3He
- 2 instabile Isotope: ^6He und ^8He , beide synthetisch



W. Ramsay

Gewinnung: aus Erdöl

aus Tritium- β -Zerfall

$T_{1/2} < 200$ ms



^4He



^3He

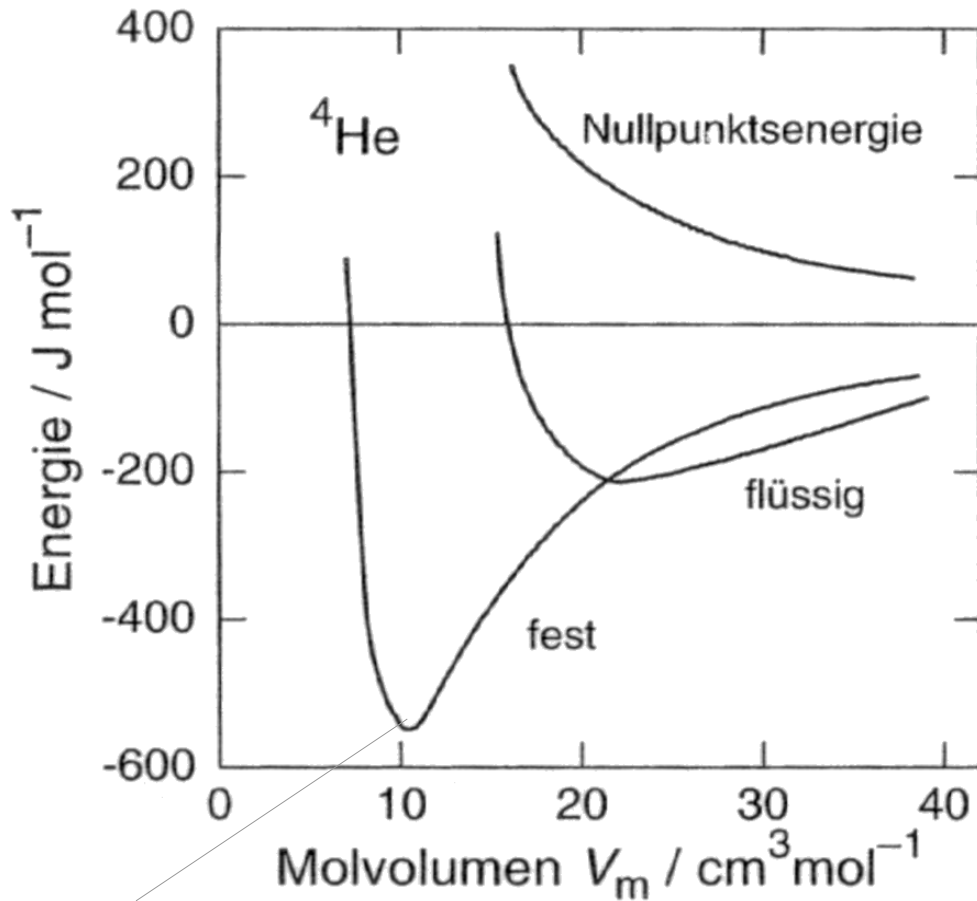
natürliche Häufigkeit	99,99986 %	0,00014 %
Siedepunkt	4,21 K	3,19 K
kritische Temperatur	5,20 K	3,32 K
Übergangstemperatur zum suprafluiden Zustand	2,177 K	0,0025 K

^4He : 2 Protonen $\uparrow\downarrow$ + 2 Neutronen $\uparrow\downarrow$ + 2 Elektronen $\uparrow\downarrow$ ———→ Boson

^3He : 2 Protonen $\uparrow\downarrow$ + 1 Neutron \uparrow + 2 Elektronen $\uparrow\downarrow$ ———→ Fermion

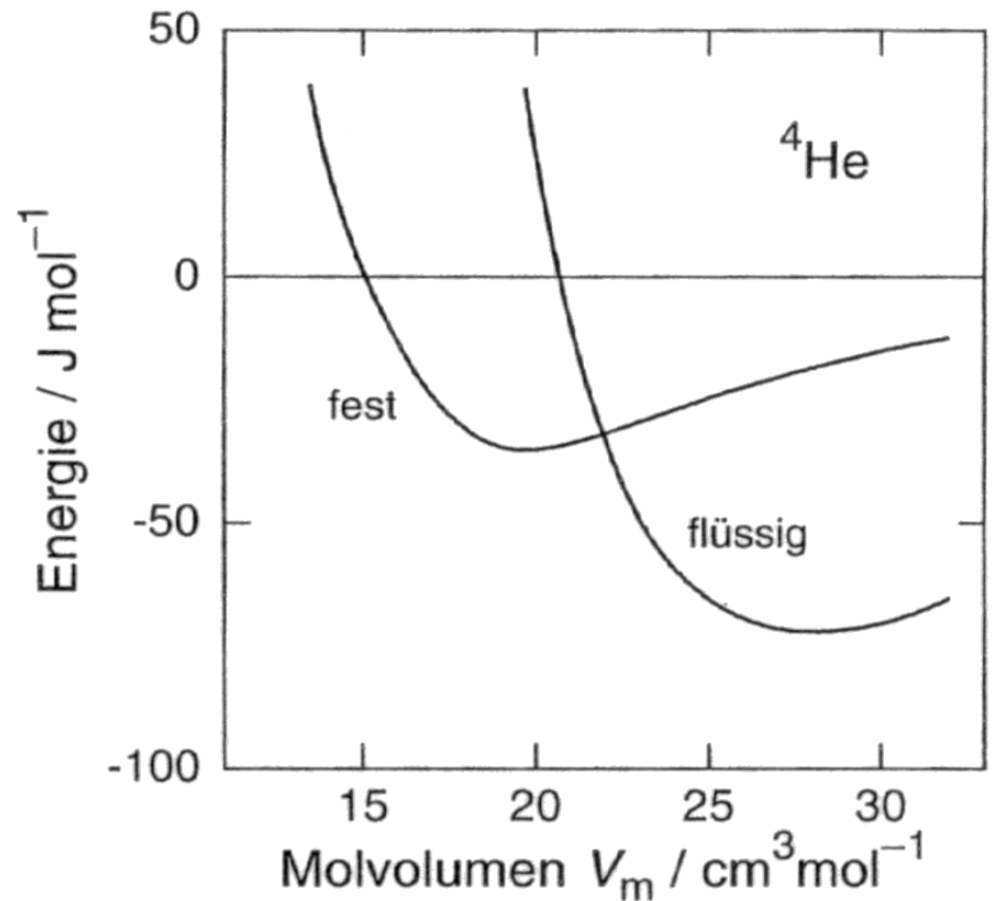
-Van der Waals Bindung

potenzielle Energie



ohne Nullpunktsenergie fest

Gesamtenergie



fester Zustand durch Druckerhöhung

Nullpunktsenergie:

$$E_0 = \frac{3 \hbar^2 \pi^2}{2 m V^{2/3}}$$

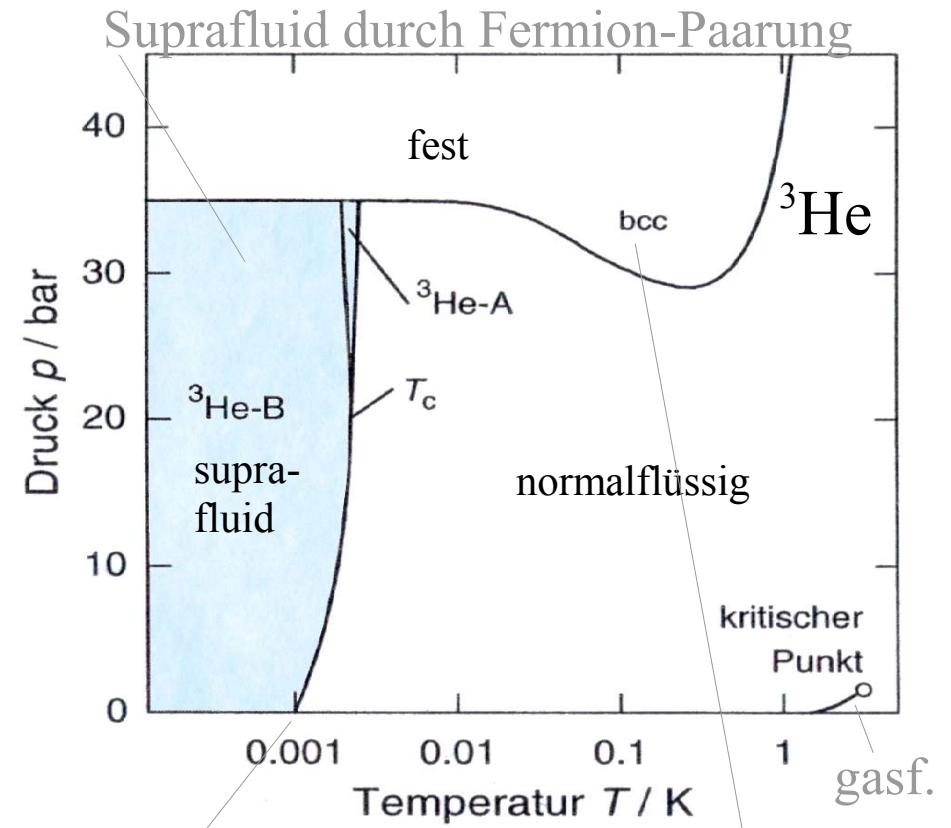
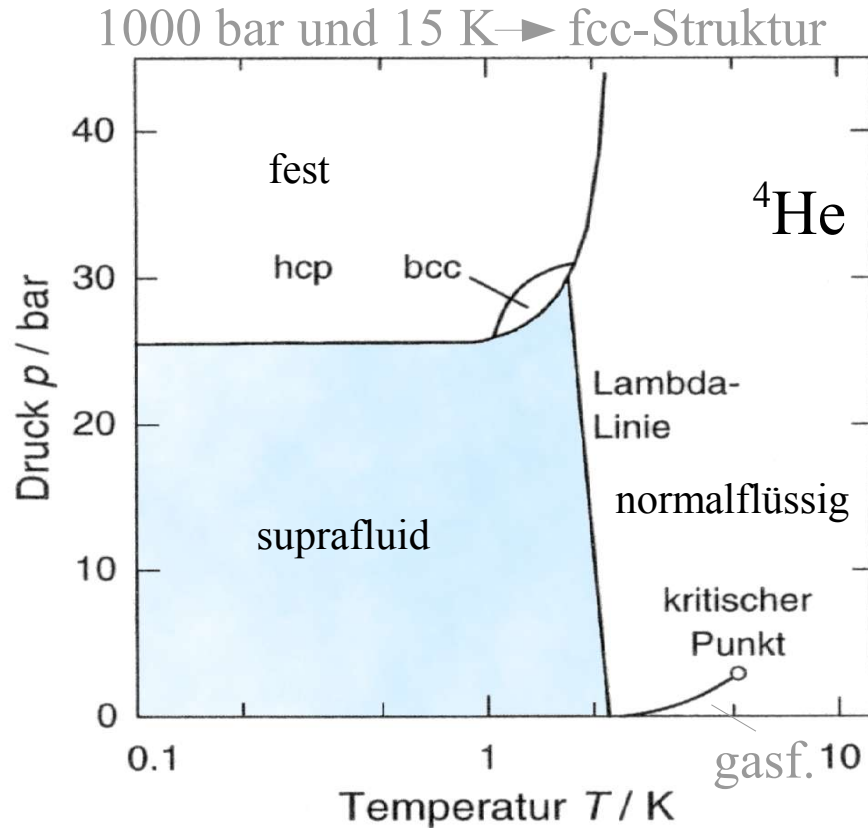
Verminderung der Bindungsenergie

³He: kleineres Gewicht

höhere Nullpunktsenergie

höherer Druck nötig

2. Helium bei tiefen Temperaturen

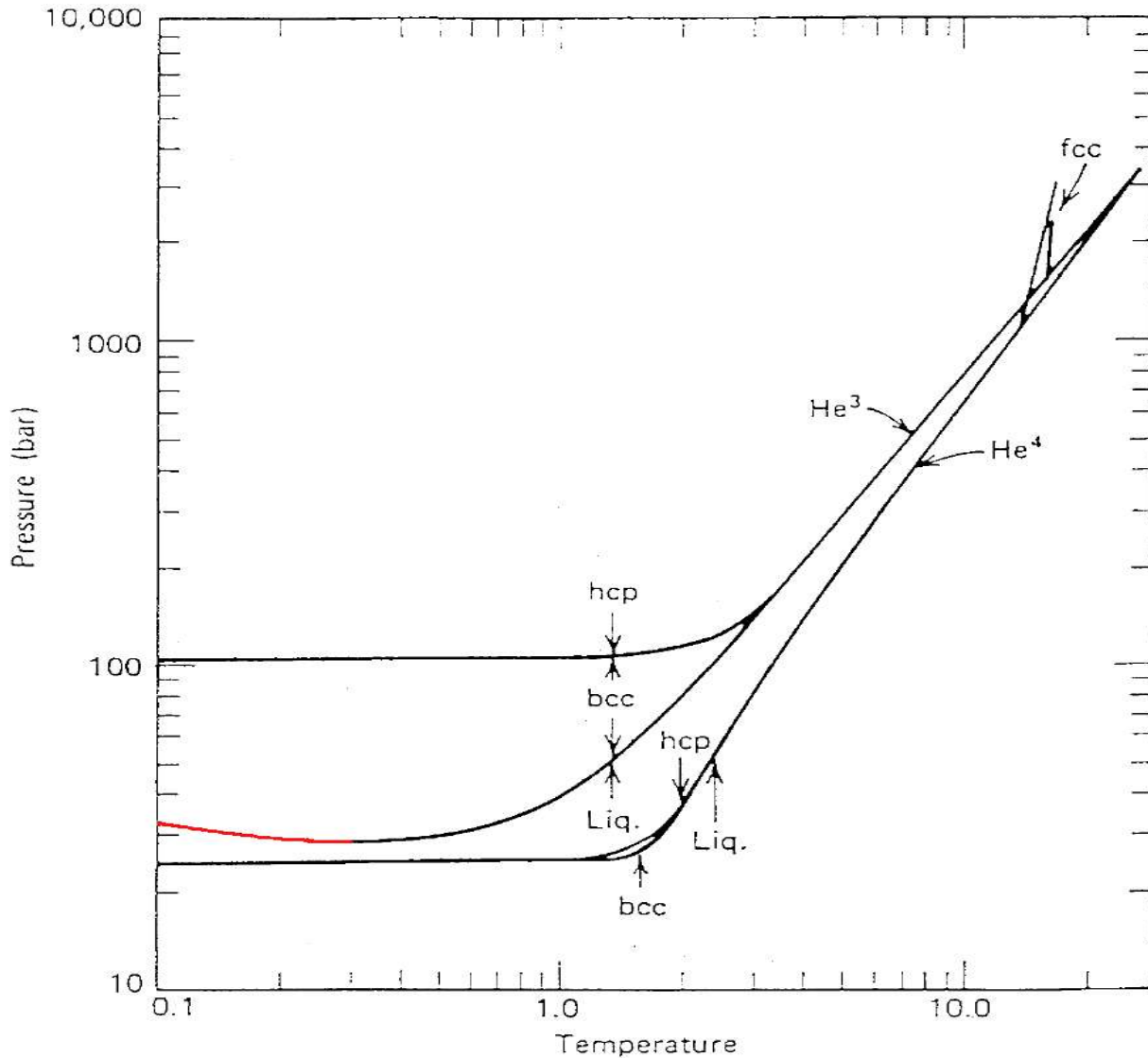


3 Größenordnungen geringer

Pomeranchuk-Effekt

- niedrigster Siedepunkt aller Gase
- kein Tripelpunkt
- bei Normaldruck nicht fest
- superfluide Phasen sind Supraleiter ähnlich (Viskosität ↔ Widerstand)
- Isotope ^4He und ^3He haben unterschiedliche Eigenschaften

Pomeranchuk Effekt

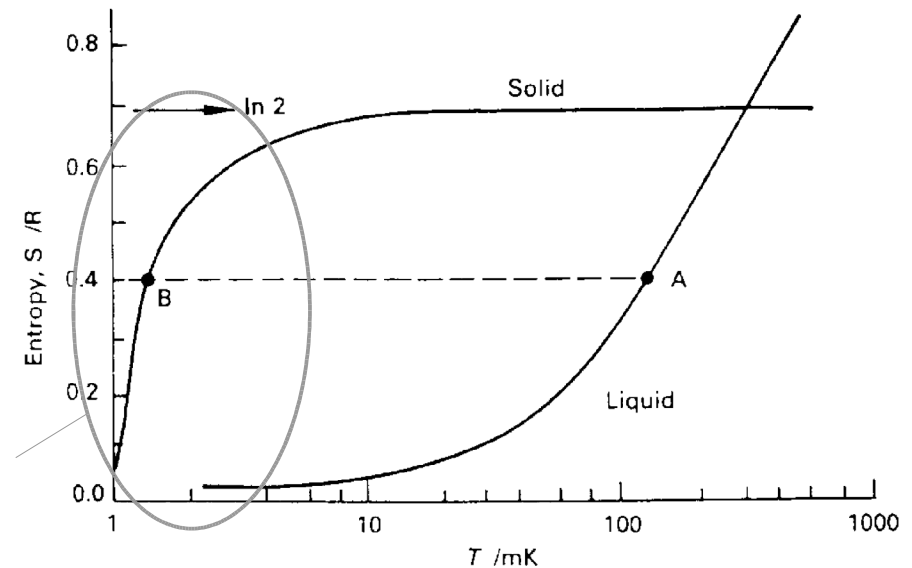


Abnahme durch antiferromagnetische Umordnung

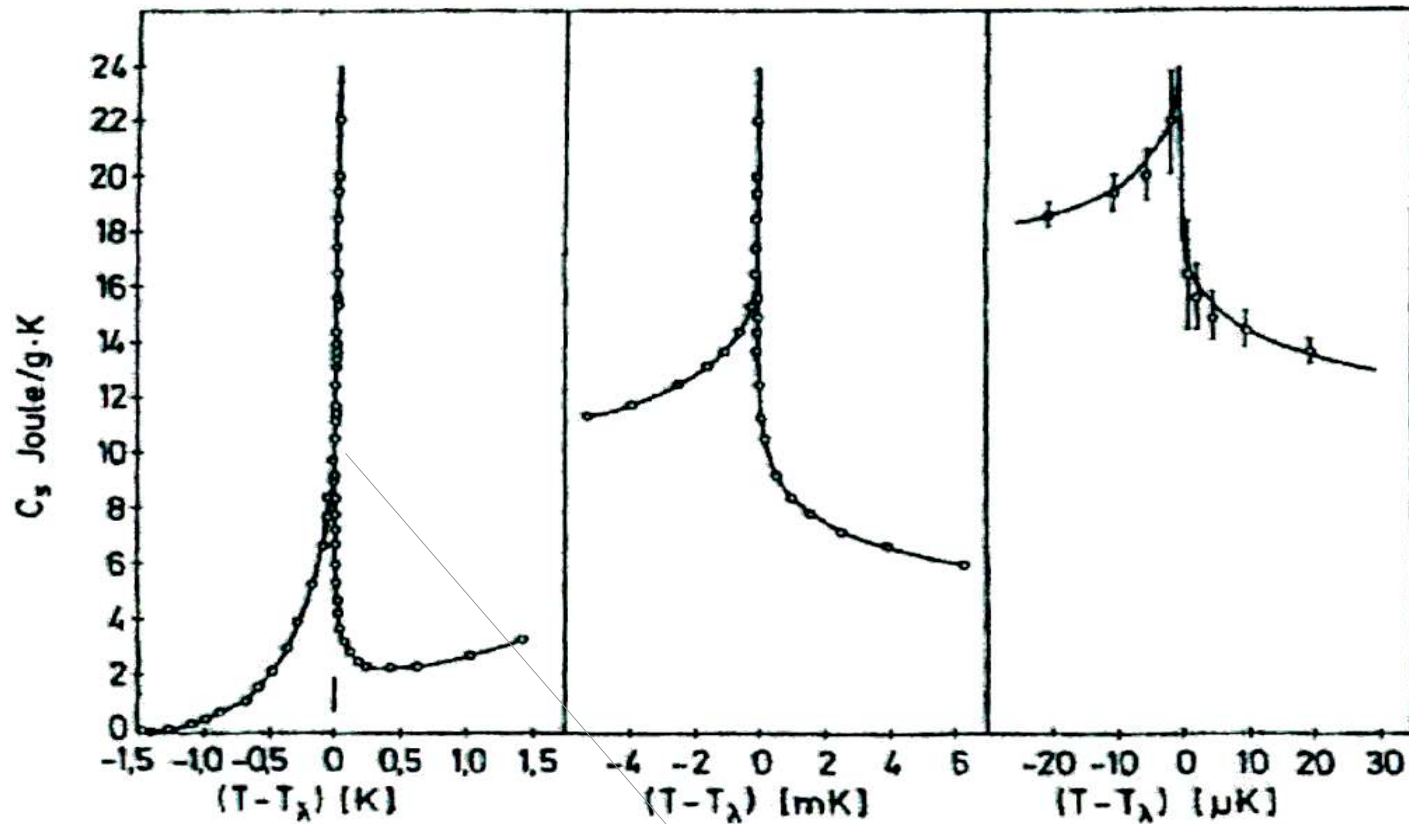
= Schmelzen bei kleiner werdenden Temperaturen

- fest:
Kernspins wechselwirken
→ $S = N k_B \ln 2$

- flüssig:
 $\frac{dS}{dT} = const.$ → $S \propto T$
für tiefe Temperaturen:
 $S \rightarrow 0$

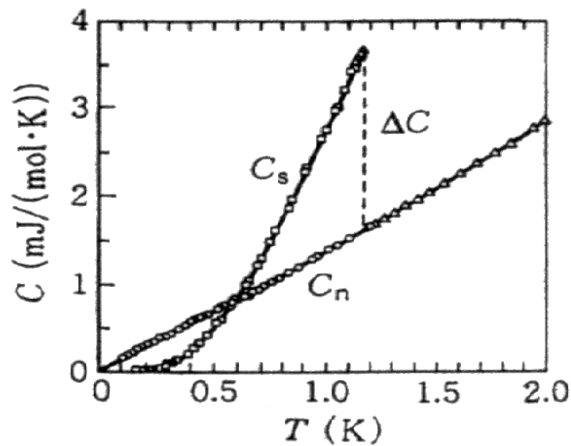


Wärmekapazität um T_λ



= Phasenübergang 2. Art
(keine Umwandlungswärme)

Singularität an Phasenübergang
= spontane Ausbildung makroskopischer Ordnung



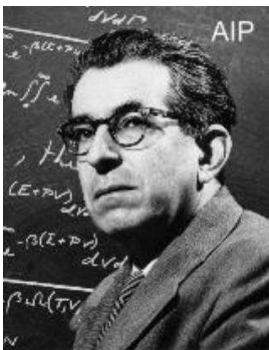
Vergleich zum Supraleiter:
ebenfalls Phasenübergang 2. Art

3. Suprafluide Eigenschaften

= reibungsfreies Fließen durch kleinste Kapillaren

- 1938 Erklärung von *F. London* als Ordnungszustand im Impulsraum = Bose-Einstein-Kondensation
- 1938 Postulation eines Zwei-Flüssigkeits-Modells von *Tisza*
- 1941/47 Zwei-Flüssigkeits-Hydrodynamik von *Landau*, Suprafluidität als Konsequenz eines Anregungsspektrums
- 1953 Herleitung des postulierten Anregungsspektrums durch *Feynman*
- 1972 Nachweis der Suprafluiden Phasen des ^3He durch *Osheroff*, *Richardson* und *Lee* (Nobelpreis 1996)

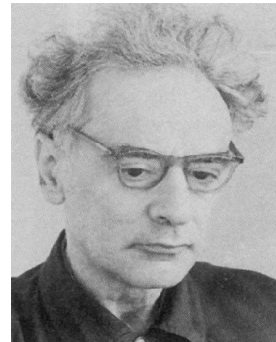
Nobelpreis 1962



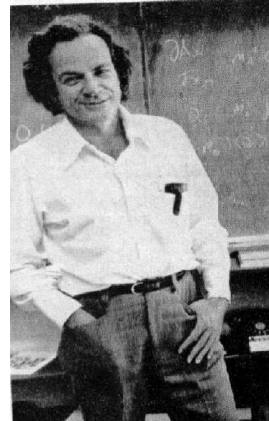
F. W. London



L. Tisza



L. D. Landau



R. Feynman



D. D. Osheroff



R. C. Richardson



D. M. Lee

Experimentelle Beobachtungen

- unterhalb von T_λ ändern sich plötzlich fast alle Eigenschaften
- Wärmeleitfähigkeit steigt um mindestens 5 Größenordnungen
- Viskosität fällt um mindestens 11 Größenordnungen
- schon mit bloßem Auge erkennbar:

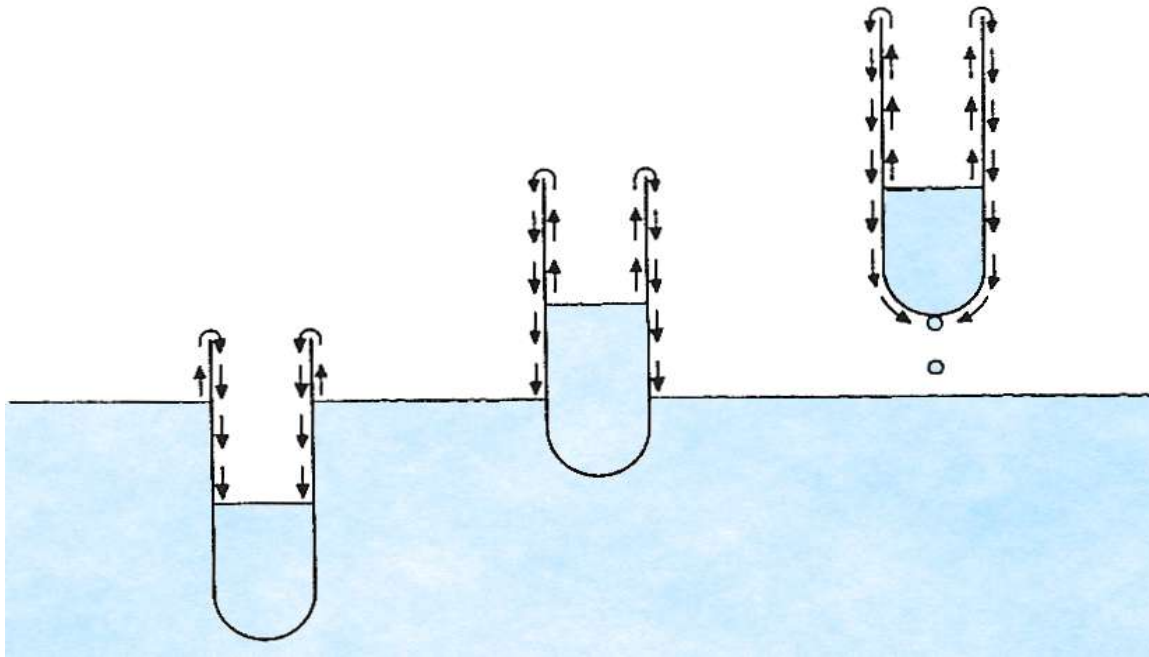
$T > T_\lambda$: Sieden im ganzen Volumen

$T < T_\lambda$: Sieden nur noch an der Oberfläche
keine Oberflächenwellen mehr

auf 1000faches
von Kupfer

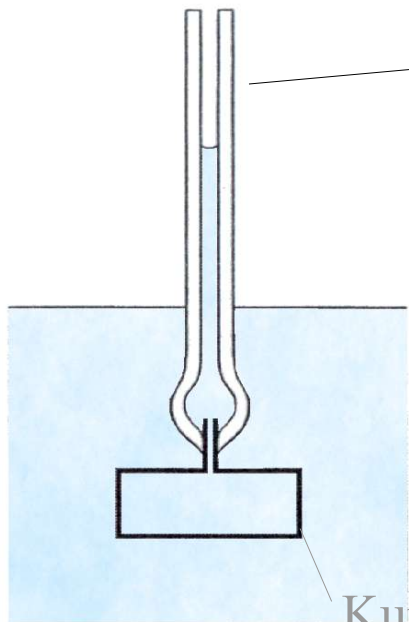
da kein Temperaturunterschied
mehr zwischen Oberfläche und
Volumen (Wärmeleitfähigkeit)

Bechereexperimente



Suprafluider Heliumfilm auf Glaswand

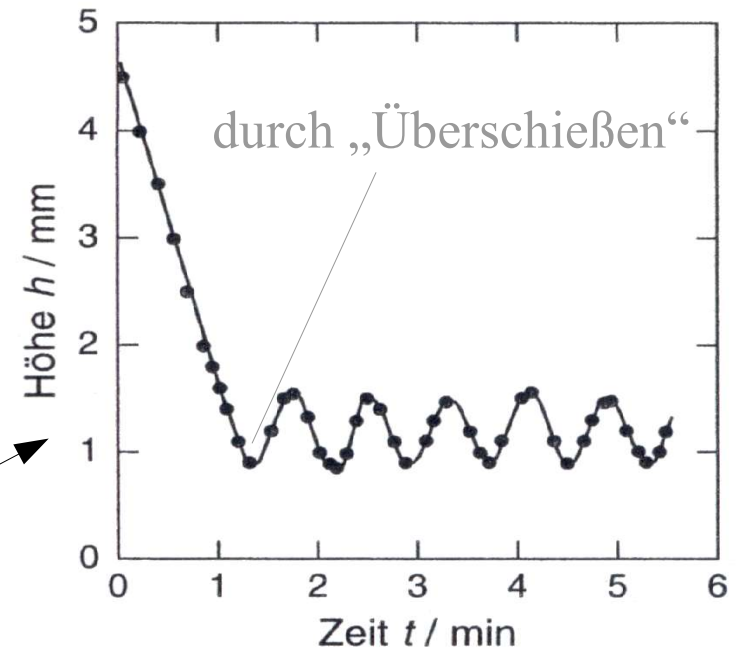
→ Helium fließt zur energetisch günstigsten Position



geringe Volumenänderung =
große Füllstandsänderung

periodische ungedämpfte
Füllstandsschwingung

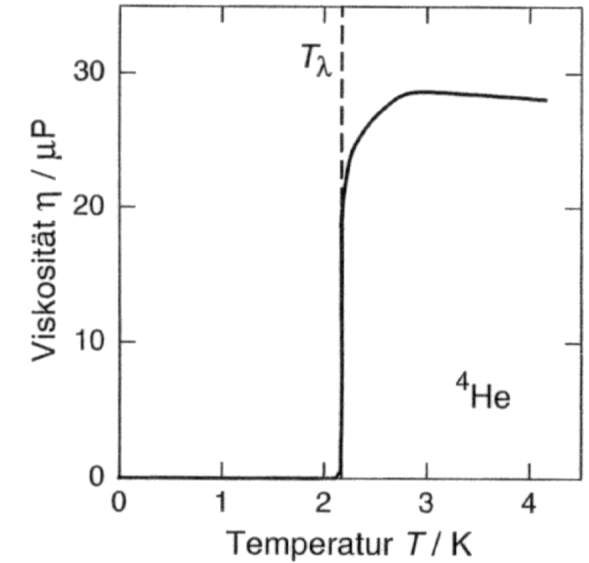
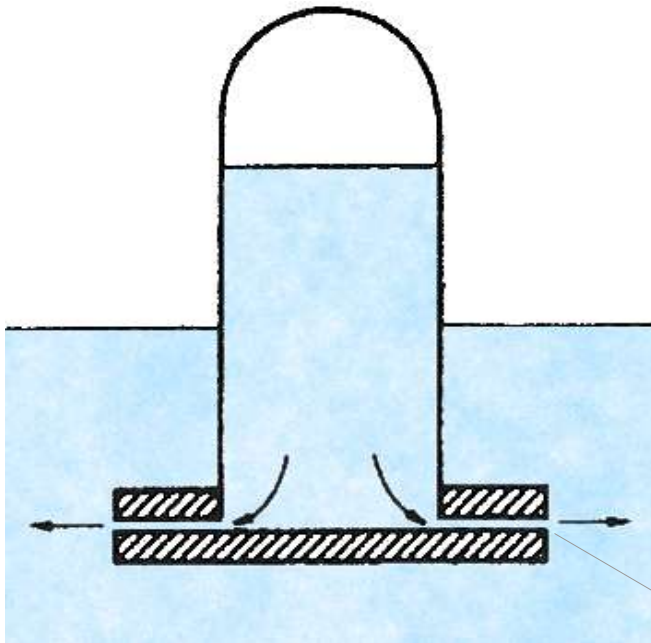
Kupfer zum thermischen Anbinden



Viskositätsbestimmung

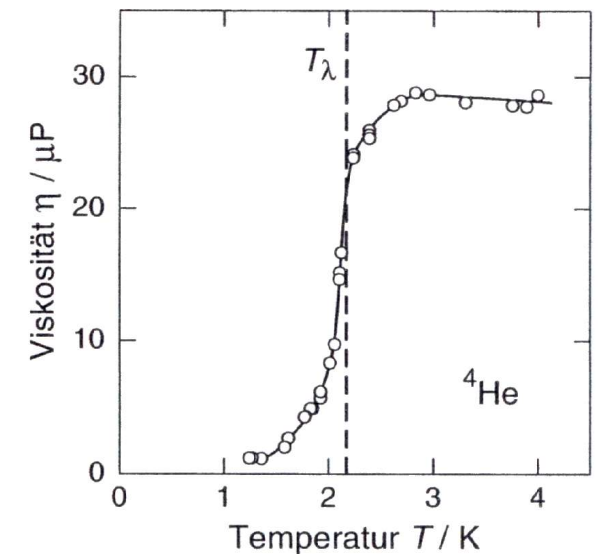
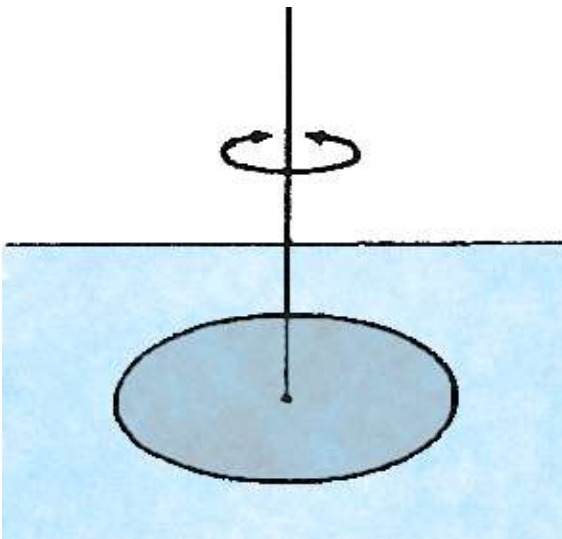
Heliumstand im Gefäß in Abhängigkeit von der Zeit

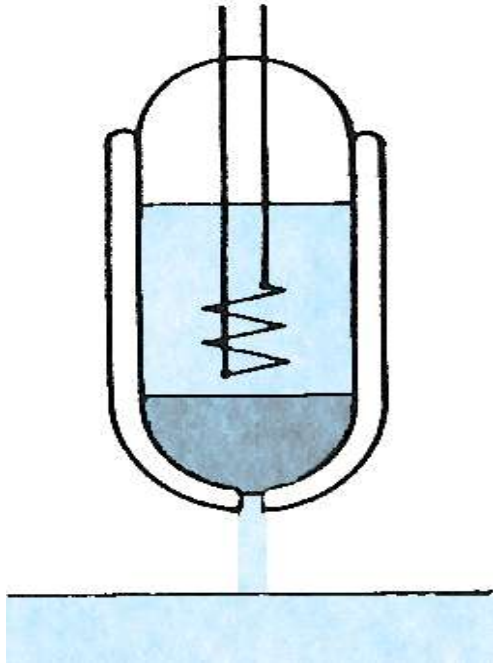
→ Viskosität $< 10^{-12}$ Pa s



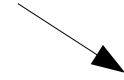
Dämpfung der Schwingung durch Reibung

→ Viskosität $\approx 10^{-6}$ Pa s
wie Wasser bei 300 K



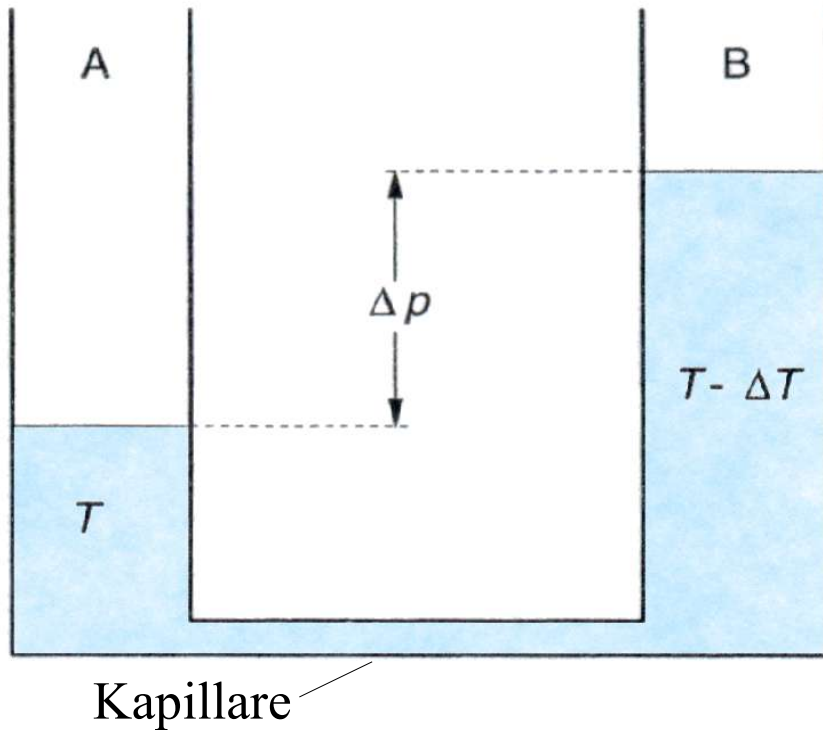


Austrittsspalt mit Pulver verschlossen



Temperaturerhöhung beim Ausfluss von He

Thermomechanischer Effekt



zu Beginn: $T_A = T_B$

Druckerhöhung in A

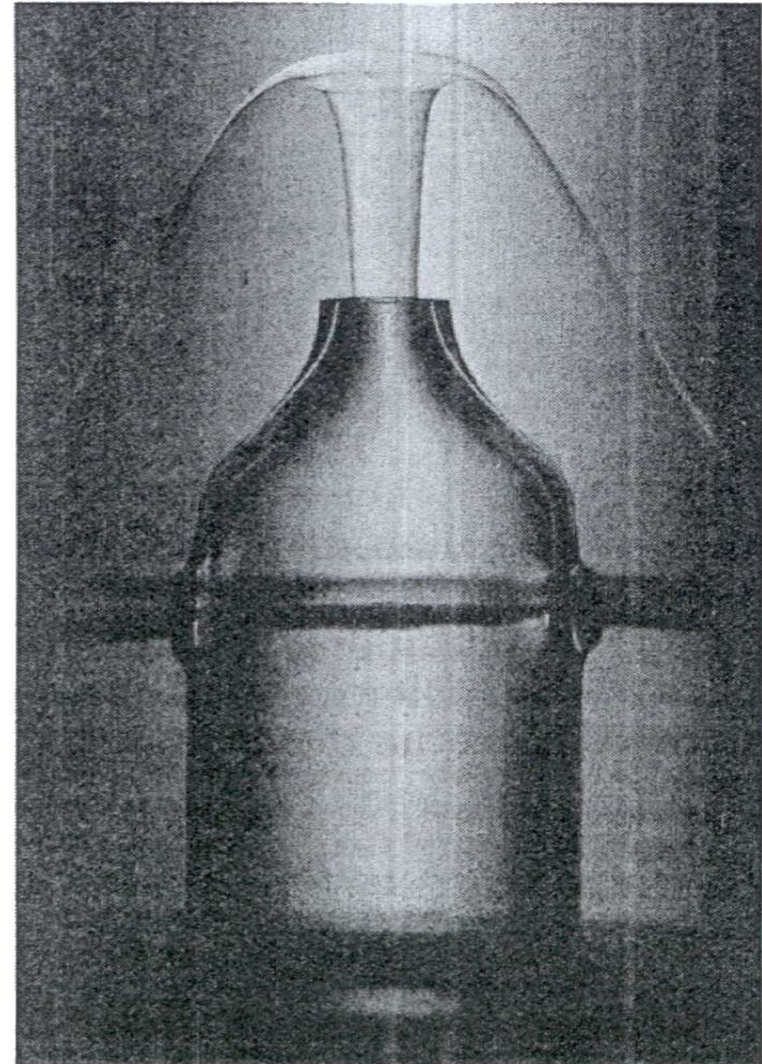
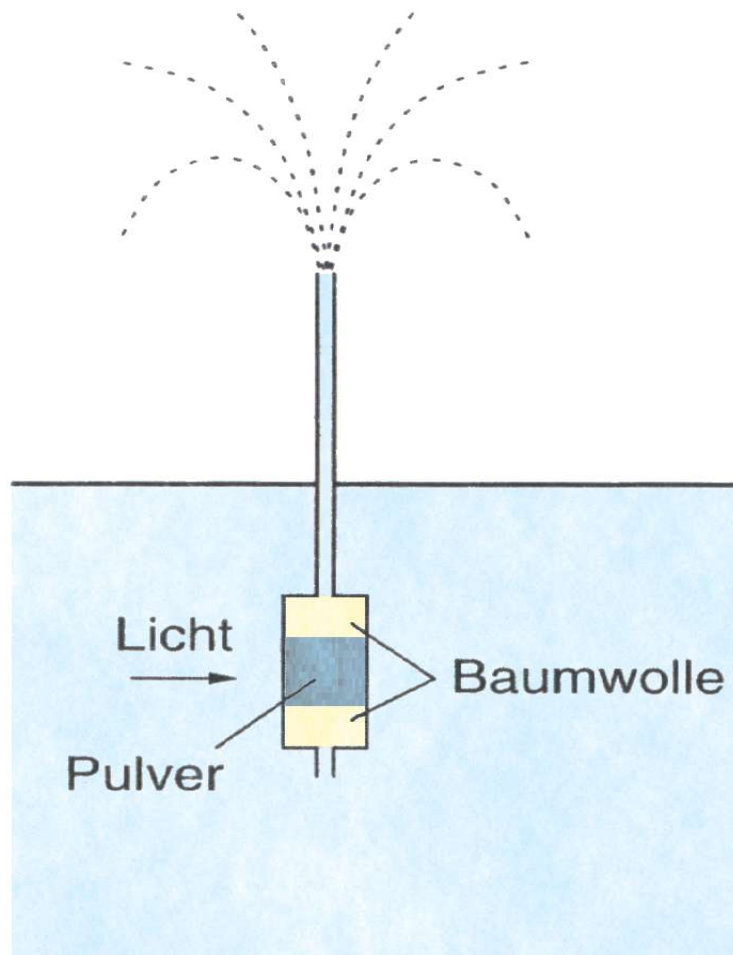
- Pegelausgleich
- Temperaturanstieg in A
- Temperaturabfall in B

Entfernen von Δp \longrightarrow Ausgangszustand wiederhergestellt

$$\frac{\Delta p}{\Delta T} = \rho S$$

London-Gleichung

Umkehrung des Thermomechanischen Effektes



Erwärmung des mit Helium durchsetzten Pulvers —————> Springbrunnen

4. Zwei-Flüssigkeits-Modell

Helium bestehend aus zwei verschiedenen Flüssigkeiten:

$$\rho = \rho_n + \rho_s$$

keine Einteilchenanregung, sondern
thermische Anregungen (Phononen, Rotonen)

normalfluide Komponente (He I)
suprafluide Komponente (He II)

Dichte

$$\rho_n$$

$$\rho_s$$

Viskosität

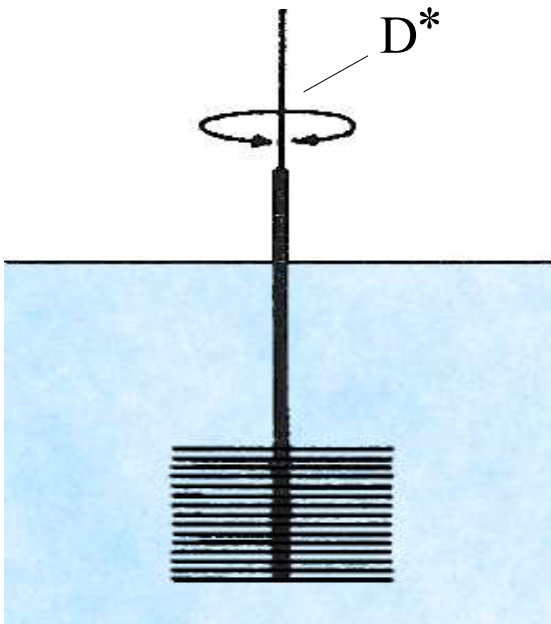
$$\eta_n = \eta$$

$$\eta_s = 0$$

Entropie

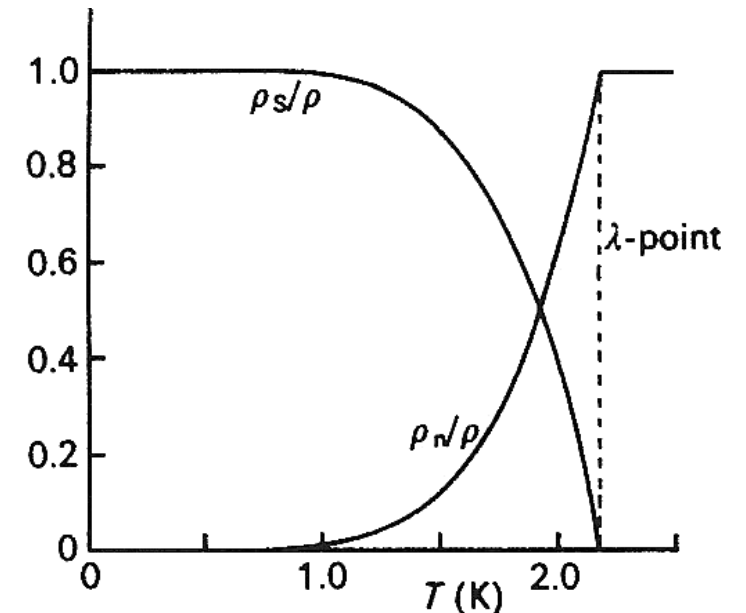
$$S_n = S$$

$$S_s = 0$$

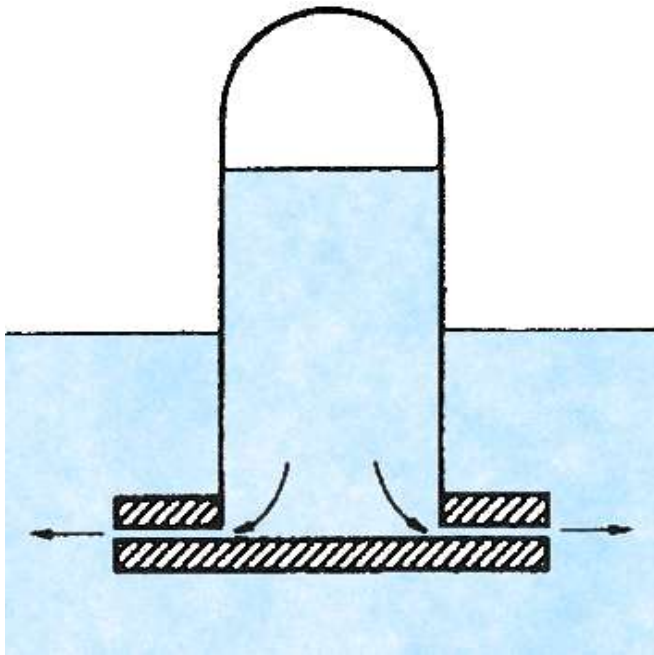


Bestimmung des Masse-
verhältnisses mittels
Pendelfrequenz
eines Plattenstapels

$$\omega_0(T) = \sqrt{\frac{D^*}{J(m_n(T))}}$$

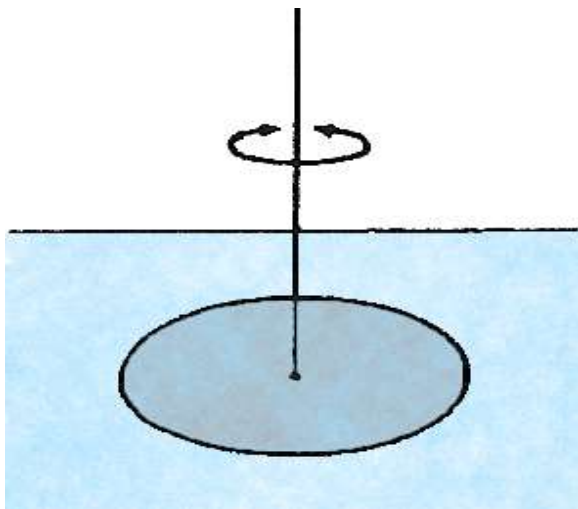


Erklärung der Experimente



schmaler Austrittsspalt

- normalfluide Komponente blockiert, nur suprafluide Komponente fließt
- $\eta = \eta_s < 10^{-12} \text{ Pa s}$

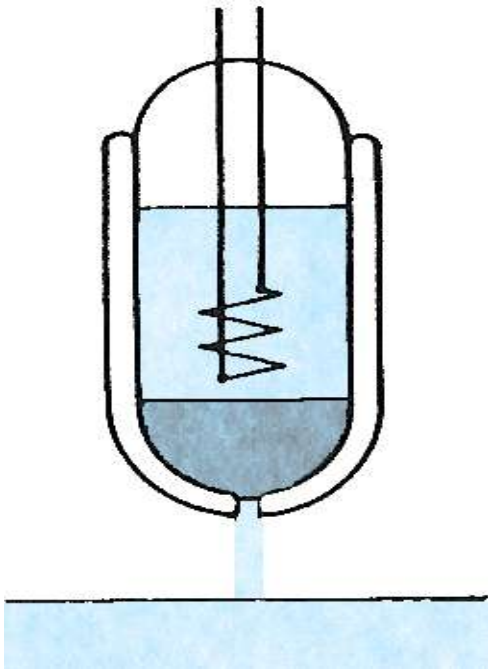


Drehmoment: $M = \pi \sqrt{\eta \rho} \omega^{3/2} r^4 \Theta(\omega)$

Auslenkwinkel

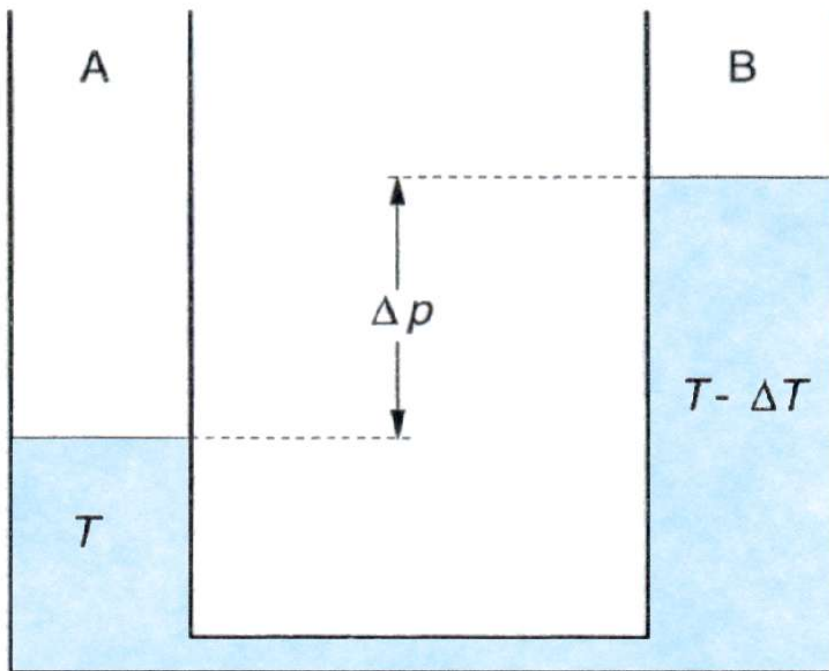
Dämpfung der Schwingung nur durch Reibung an der normalfluiden Komponente möglich

- $\eta = \eta_n \approx 10^{-6} \text{ Pa s}$



- durch Pulver tritt nur suprafluide Komponente aus
- normalfluide Komponente inkl. Entropie bleiben im Gefäß

Temperaturerhöhung beim Ausfluss von He



A

- suprafluide Komponente fließt durch Kapillare
- normalfluide Komponente bleibt zurück

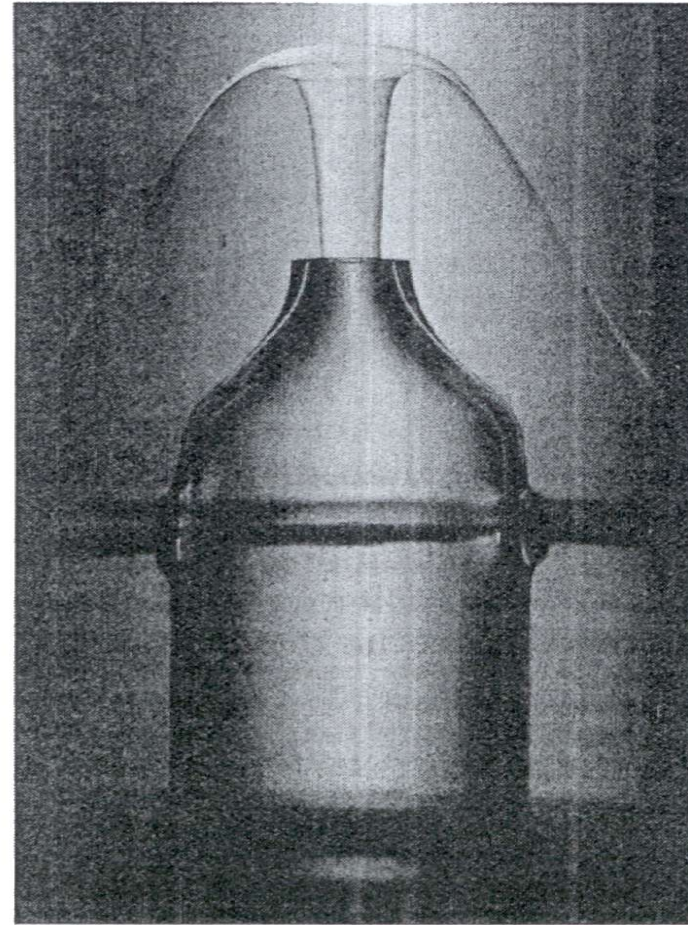
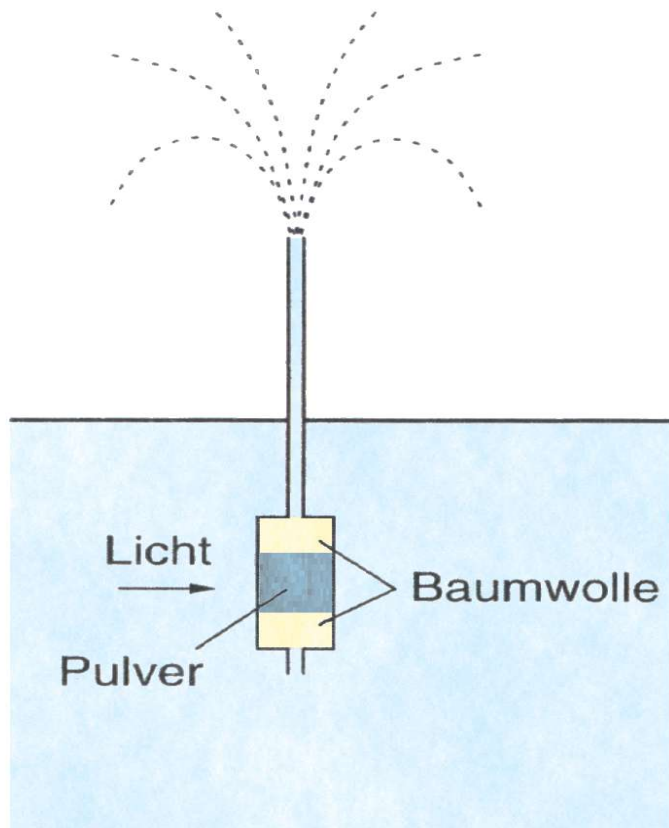
→ Temperaturanstieg

B

- ρ_n / ρ_s wird geringer

→ Energiedichte fällt

→ Temperatur sinkt

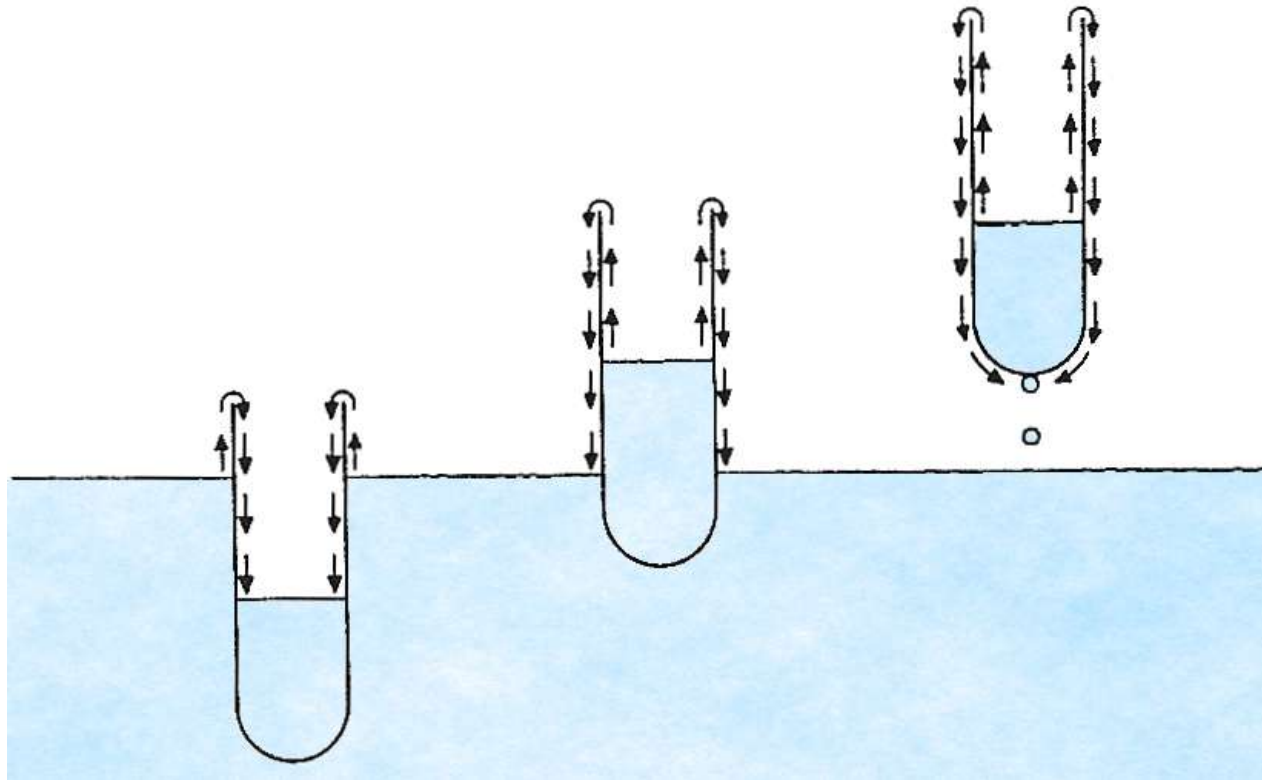


Erwärmung des Pulvers

Druckerhöhung

suprafluide Komponente
kann immer nachfließen

Springbrunnen



Erwartung: Temperaturänderung beim Ein- und Ausfließen,
da suprafluide Komponente keine Entropie transportiert

Temperaturausgleich mit dem Helium in der Gasphase

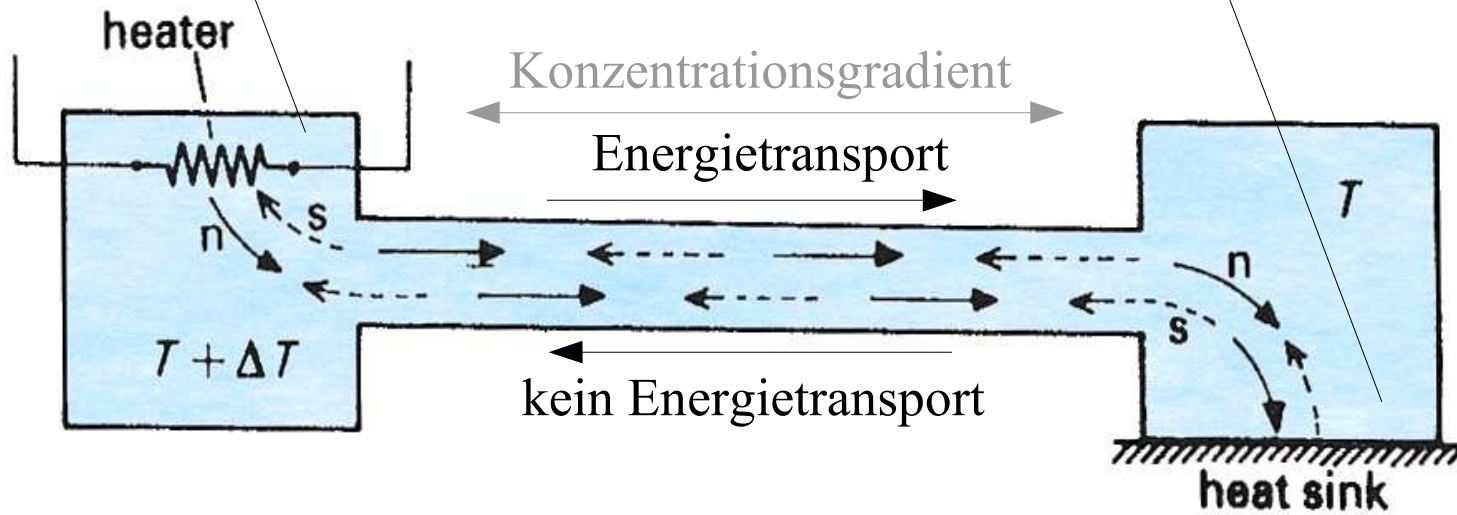


keine Temperaturänderung

Wärmeleitung

Erzeugung von normalfluidem Helium

Erzeugung von suprafluidem Helium



Konzentrationsgradient \longleftrightarrow Temperaturgradient

—► Wärmeleitung mit Massentransport verbunden

$$\dot{Q} = \frac{\beta T (\rho S)^2}{\eta_n L} \Delta T$$

Kapillarlänge

$$\beta \propto d^3$$

Kapillardurchmesser

5. Zusammenfassung

- ^4He und ^3He verhalten sich sehr unterschiedlich
- Übergang Flüssig \rightarrow Suprafluid ist Phasenübergang 2. Art
- Suprafluidität = keine Viskosität + hohe Wärmeleitfähigkeit
- viele Effekte mit 2-Flüssigkeits-Modell erklärbar