

Kühlung:

Verdampfer-Kühlschrank:

Das Arbeitsgas muss sich bei der gewünschten Temperatur verflüssigen lassen. (Frigen, NH_3 , SO_2 , Propan)

Ein Kompressor komprimiert das Gas.

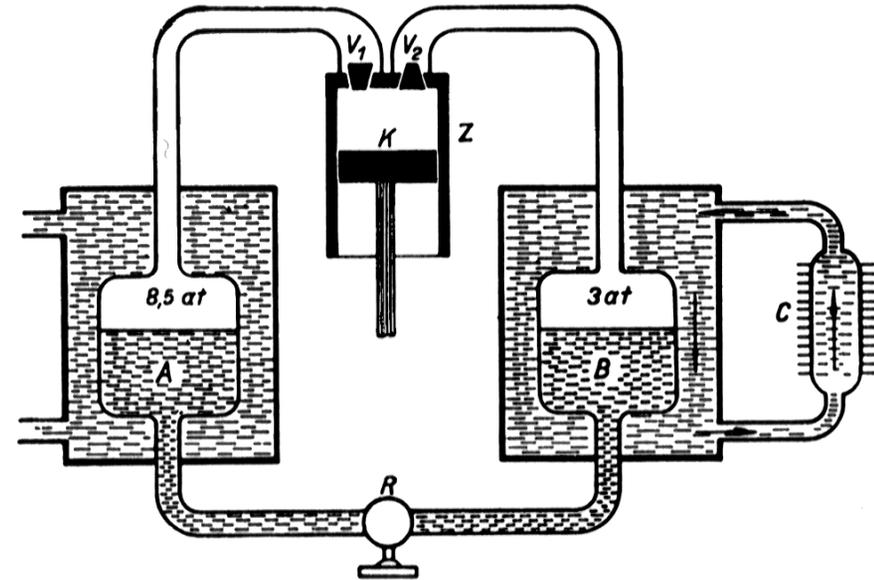
Bei Abkühlung auf Raumtemperatur verflüssigt es sich (A).

Dabei gibt es die Kondensationswärme ab.

An einer Düse (R) zum Niederdruckbereich verdampft die Flüssigkeit.

Dabei nimmt sie die Verdampfungswärme auf. → Kühlwirkung

Es sind Temperaturen von ca. $-40^\circ\text{C} = 233\text{ K}$ erreichbar.

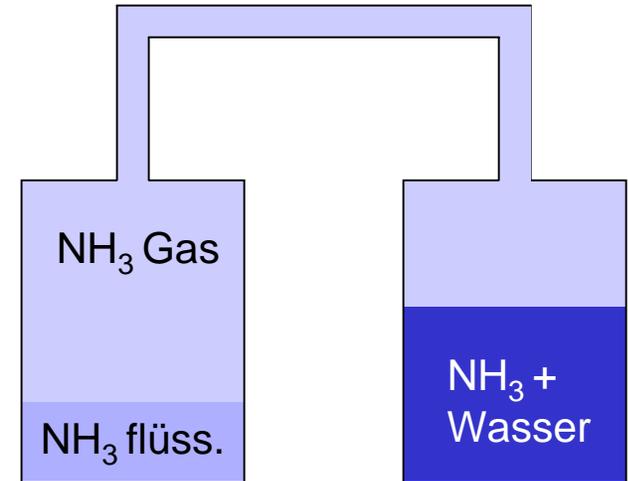


Absorberkühlschrank:

Ammoniak ist in Wasser gelöst (rechts).

Der rechte Behälter wird erhitzt.

Dadurch verringert sich Menge des gelösten Ammoniakgases.



Links steigt der Druck, bis sich dort das Ammoniakgas verflüssigt.

Die Heizung wird rechts wieder abgestellt.

Links verdampft der Ammoniak und nimmt die Verdampfungswärme auf.

→ Kühlwirkung

Kühlung ohne bewegliche Teile, leises arbeiten.

Tiefe Temperaturen

Verflüssigung von Gasen, Joule-Thomson Effekt

Entspannung eines komprimierten Gases in einer porösen Trennung



Die poröse Trennung hält den Druckunterschied aufrecht und verhindert einen Temperatúrausgleich.

Mit der Umgebung finde kein Wärmeaustausch statt.

Nach dem ersten Hauptsatz wird die Druckarbeit der inneren Energie entzogen.

Beim Durchtritt einer bestimmten Stoffmenge gilt:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = -p_2 V_2 + p_1 V_1$$

Also bleibt die Enthalpie erhalten:

$$U_1 + p_1 V_1 = U_2 + p_2 V_2 = H_1 = H_2$$

Ein ideales Gas würde sich nicht abkühlen, da die innere Energie nicht vom Volumen abhängt.

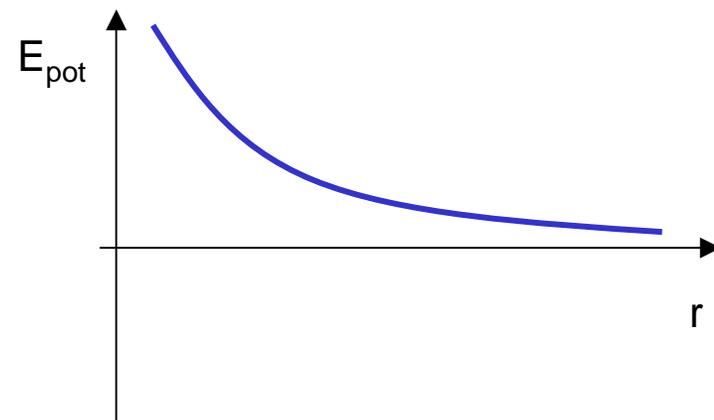
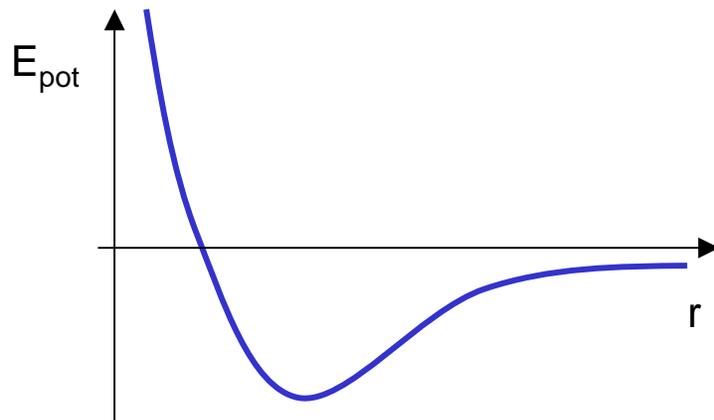
Dadurch kann durch die Entspannung keine innere Energie entzogen werden.

Bei einem realen Gas wirken anziehende Kräfte zwischen den Atomen. Kinetische Energie wird in potentielle Energie zum Trennen der Atome umgewandelt.

Das Gas kühlt sich ab (Abnahme der kinetischen Energie der Atome).

Wenn zwischen den Atomen nur abstoßende Kräfte wirken, kehrt sich der Effekt um, und es tritt Erwärmung auf.

(Umwandlung potentieller Energie in kinetische Energie bei der Expansion.)



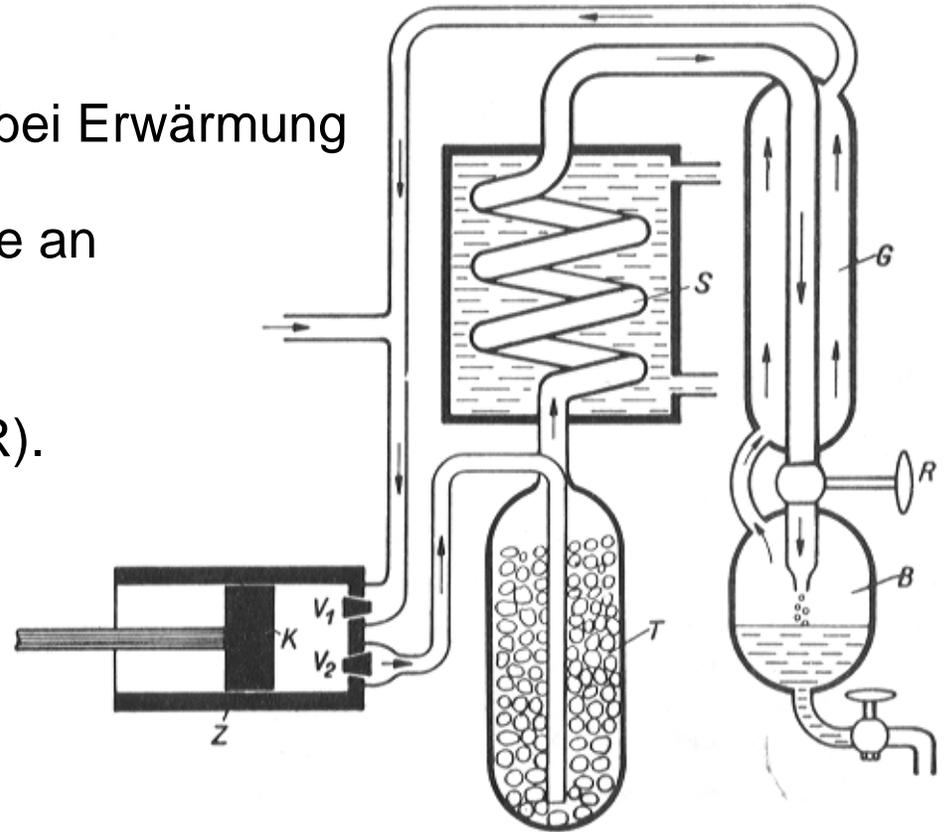
Verfahren nach Linde und Hampson

1. Kompression auf ca. 200 bar dabei Erwärmung
2. Abgabe der Kompressionswärme an den Wärmetauscher (S)
3. Entspannung im Drosselventil (R).
(Enthalpie bleibt konstant)

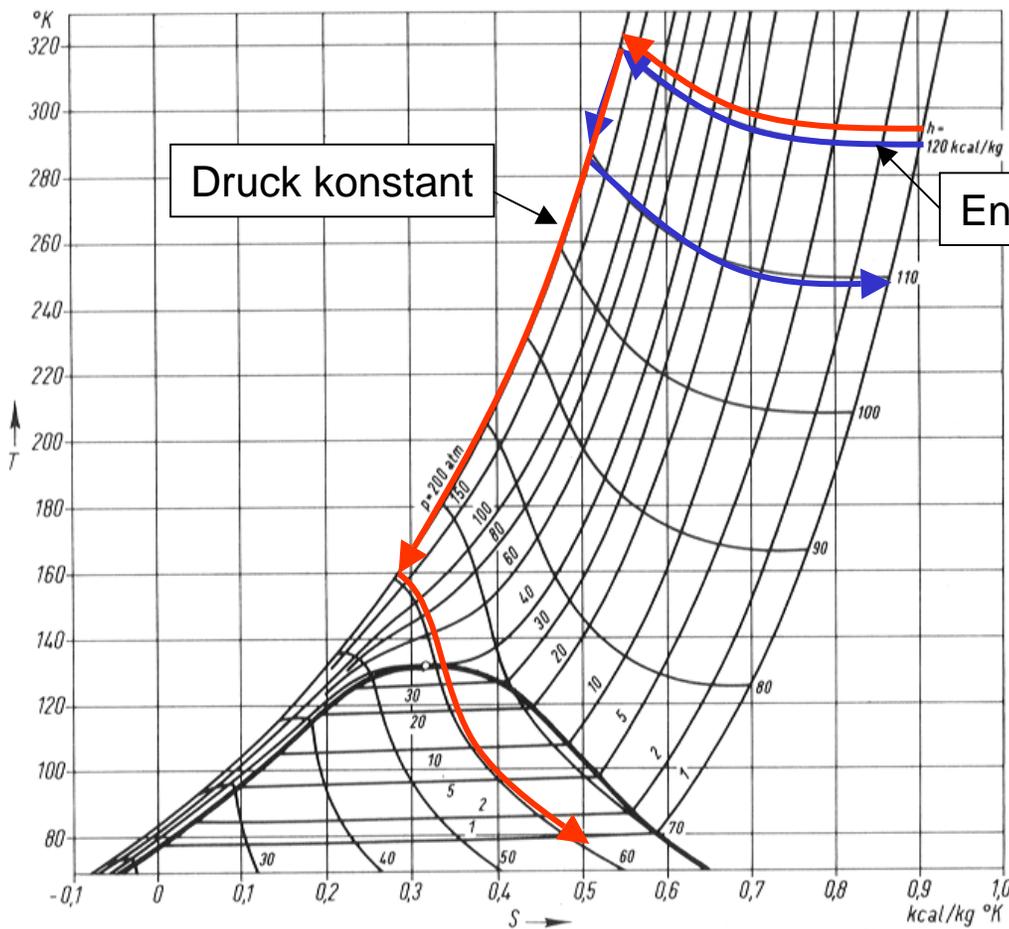
Verflüssigung ist nur mit

Gegenstromkühlung (G) möglich:

Das nicht verflüssigte Gas kühlt das komprimierte Gas vor, ehe es in das Drosselventil eintritt.



T(S)-Diagramm für Luft



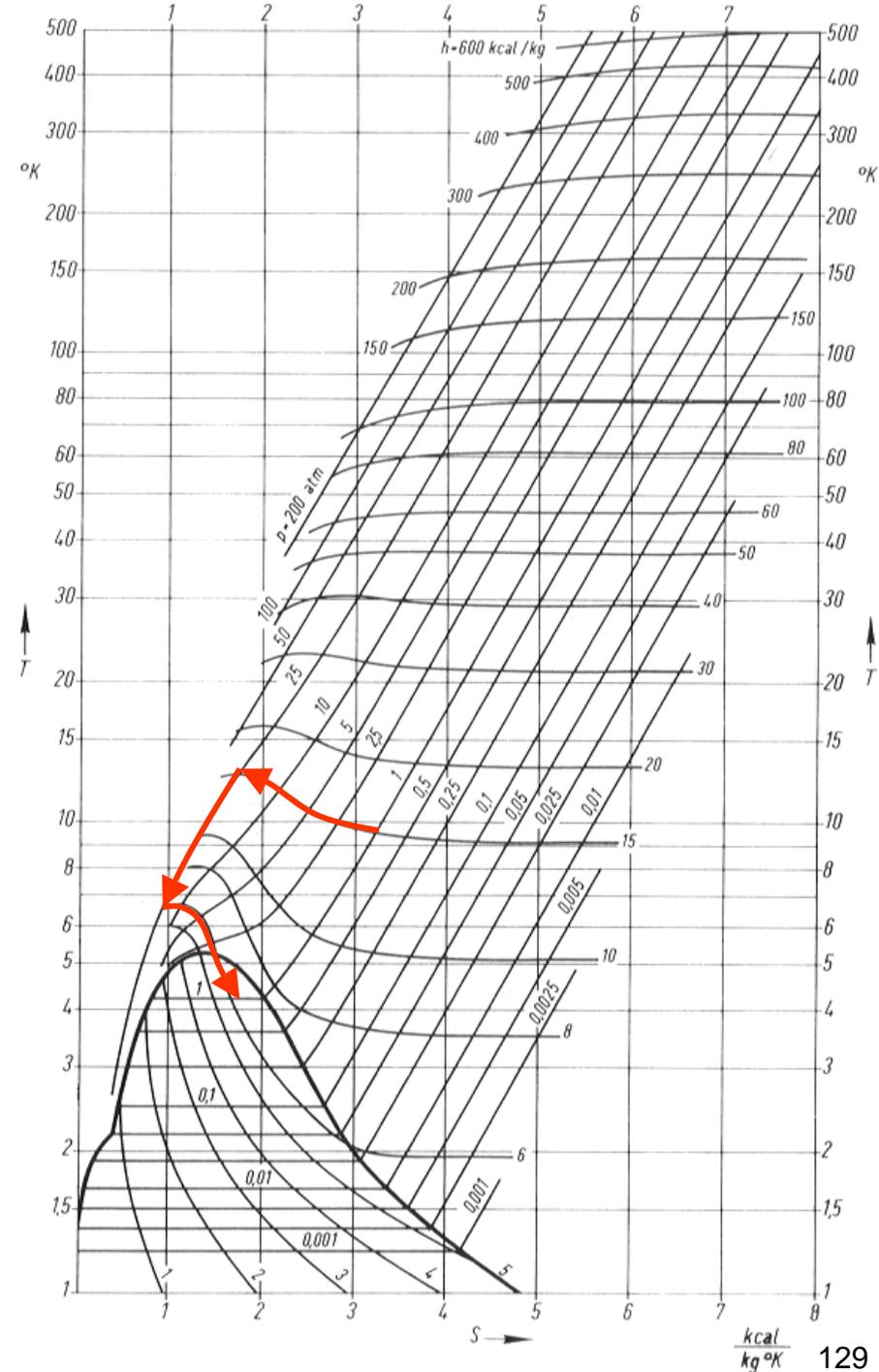
Blau: ohne Gegenstromkühlung
Rot: mit Gegenstromkühlung

1. Kompression von 1bar auf ca. 200 bar (Enthalpie bleibt konstant)
2. Abgabe der Kompressionswärme an den Wärmetauscher
Anfangs ohne, später mit Gegenstromkühlung
3. Entspannung im Drosselventil.(Enthalpie bleibt konstant)

Linde Hampson-Verfahren ist für He nicht geeignet.

Keine abkühlende Wirkung des Joule-Thomson Effektes bei höheren Temperaturen.

1. Vorkühlung mit flüssigem Stickstoff
2. Zweistufige Vorkühlung mit Wärmepumpen $T = 30\text{K}$, $T = 10\text{K}$
3. Verflüssigung mit Joule-Thomson Effekt.



Temperaturen > 77 K

Flüssiger Stickstoff: Preis ca. 1.- DM/Liter

Temperaturen > 4.2 K

Flüssiges Helium: Preis ca 10.- DM/Liter

Beobachtung der Supraleitung (Nb: 9.50K, Pb: 7.19K, Ta: 4.48K, Hg: 4.15K)

Temperaturen > 1.7 K

Siedepunktniedrigung des Heliums
durch Abpumpen des Dampfes.

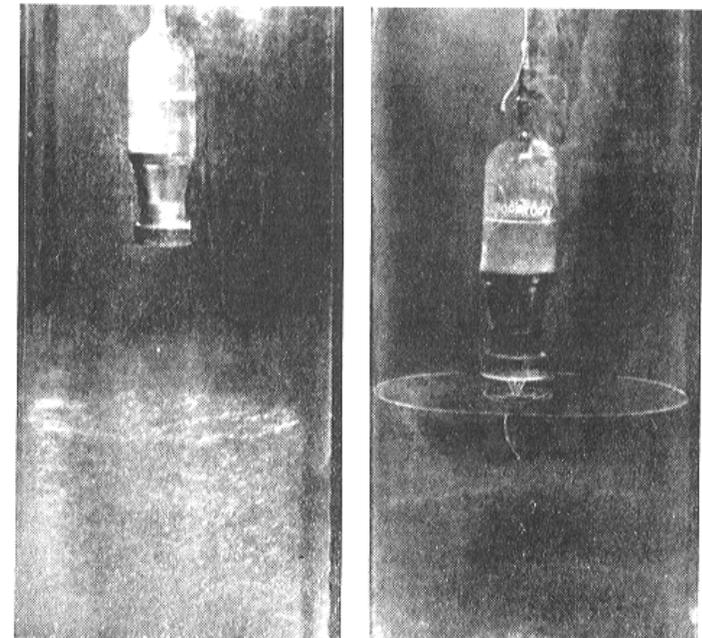
Helium wird suprafluid bei $T = 2.18\text{K}$.

Zähigkeit wird Null.

Durchtritt durch feinste Poren möglich.

Wärmeleitfähigkeit wird sehr groß.

Keine Blasenbildung.



Adiabatische Entmagnetisierung

Bei einem paramagnetischen Salz werden die magnetischen Momente in einem äußeren Magnetfeld ausgerichtet.

Dabei wird Energie freigesetzt, die an ein Wärmebad abgeführt wird (isotherme Magnetisierung).

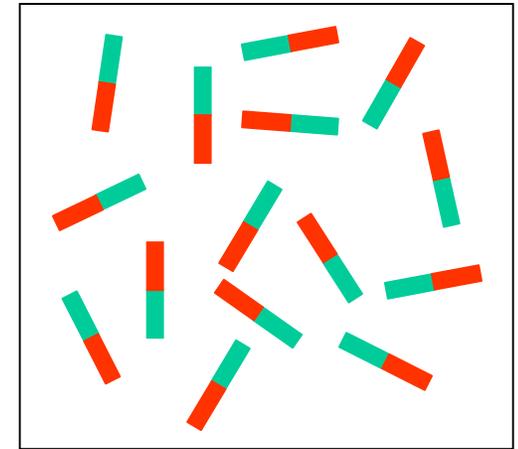
Nach Entkoppelung vom Wärmebad wird das Magnetfeld abgeschaltet (adiabatische Entmagnetisierung).

Die magnetischen Momente geraten in Unordnung, um die Entropie zu erhöhen.

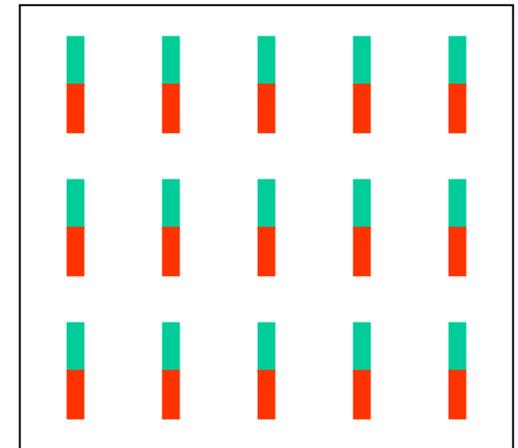
Dies geht auf Kosten der Inneren Energie.

Dadurch Abkühlung des Salzes.

große Entropie



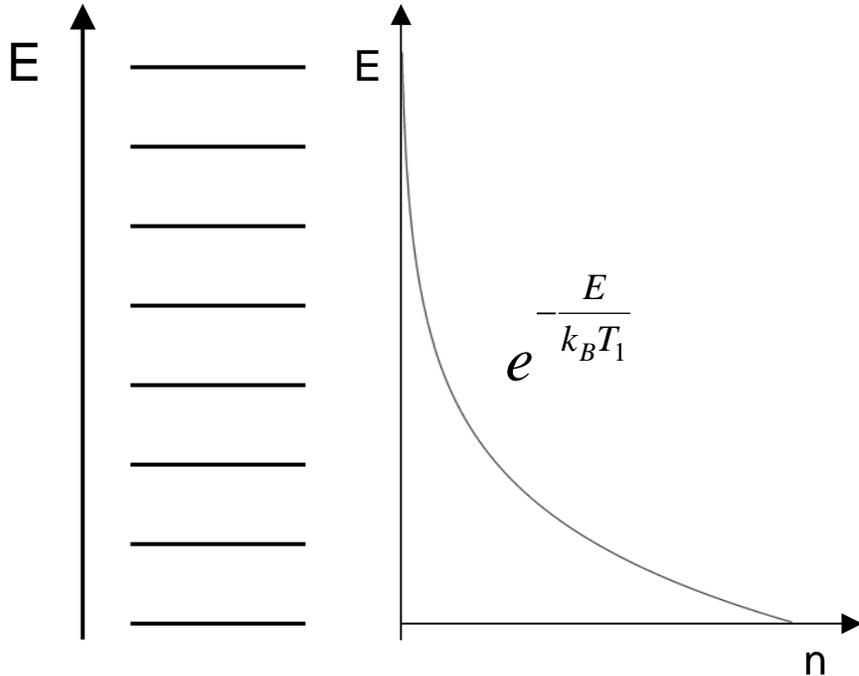
kleine Entropie



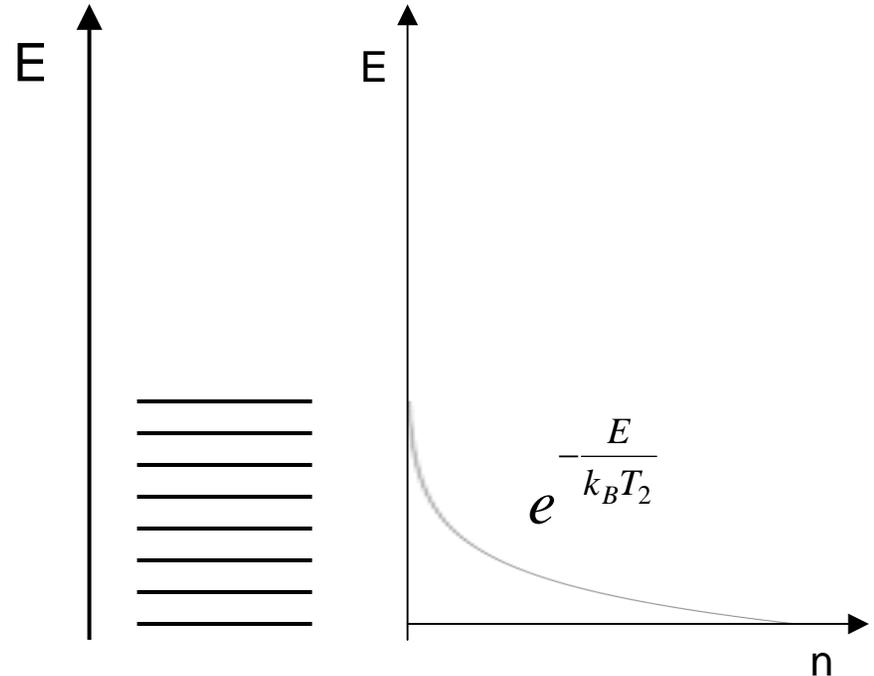
Erreichbare Abkühlung: von $T = 1\text{K}$ auf $T = 0.001\text{K}$. Begrenzt durch selbstständige Ausrichtung der magnetischen Momente (Ferromagnetismus) 131

Adiabatische Entmagnetisierung:

Energieniveaus der Magnete im starken Feld



Energieniveaus der Magnete im schwachen Feld



Im starken Magnetfeld (links) werden die Energieniveaus thermisch besetzt T_1

Beim Abschalten des Magnetfeldes bleibt die Besetzung erhalten.

Durch die Verringerung des Abstandes der Niveaus ändert sich die Verteilung.

Die neue Verteilung gehört zu einer tieferen Temperatur T_2

Adiabatische Kernentmagnetisierung:

Auch die Atomkerne haben magnetische Momente.

Diese sind um einen Faktor 1000 kleiner als bei den Elektronen.

Abstände der Energieniveaus sind auch sehr viel kleiner (Faktor 1000) (vgl. Feinstruktur, Hyperfeinstruktur).

Das Verfahren der Kernentmagnetisierung arbeitet daher bei Temperaturen, die um den Faktor 1000 kleiner sind als bei der normalen Entmagnetisierung.

Die Starttemperatur muss bereits kleiner als 0.01 K sein, dann sind Temperaturen von 10^{-6} K erreichbar.

^3He - ^4He Mischkryostat

Eine adiabatische Entmagnetisierung kann nur einmal vorgenommen werden, danach tritt wieder Erwärmung ein.

Mischkryostaten arbeiten kontinuierlich und können Temperaturen im milli-Kelvin Bereich erzeugen.

Eine Mischung aus den Heliumisotopen ^3He und ^4He im flüssigen Zustand bei $T < 0.5\text{ K}$ hat die Eigenschaft, dass sie sich selbst in zwei flüssige Phasen trennt: Eine ^3He reiche Phase und eine ^4He reiche Phase.

Verdünnst man die ^3He arme Phase weiter, treten ^3He Atome aufgrund des osmotischen Druckes aus der ^3He reichen Phase in die arme Phase über. Dabei nehmen sie Verdünnungswärme auf.

→ Kühlwirkung

