

# Tiefemperaturtechnologie (Kryotechnik) und Supraleitung

Friedrich Haug und Thomas Eisel

CERN



# Ueberblick zum heutigen Thema

## Kryotechnik und Supraleitung

Vortrag 1. Teil (35 min), F. Haug

- Einfuehrung LHC Kryotechnik und Supraleitende Magnete
- Thermodynamik

Vortrag 2. Teil (20 min), T. Eisel

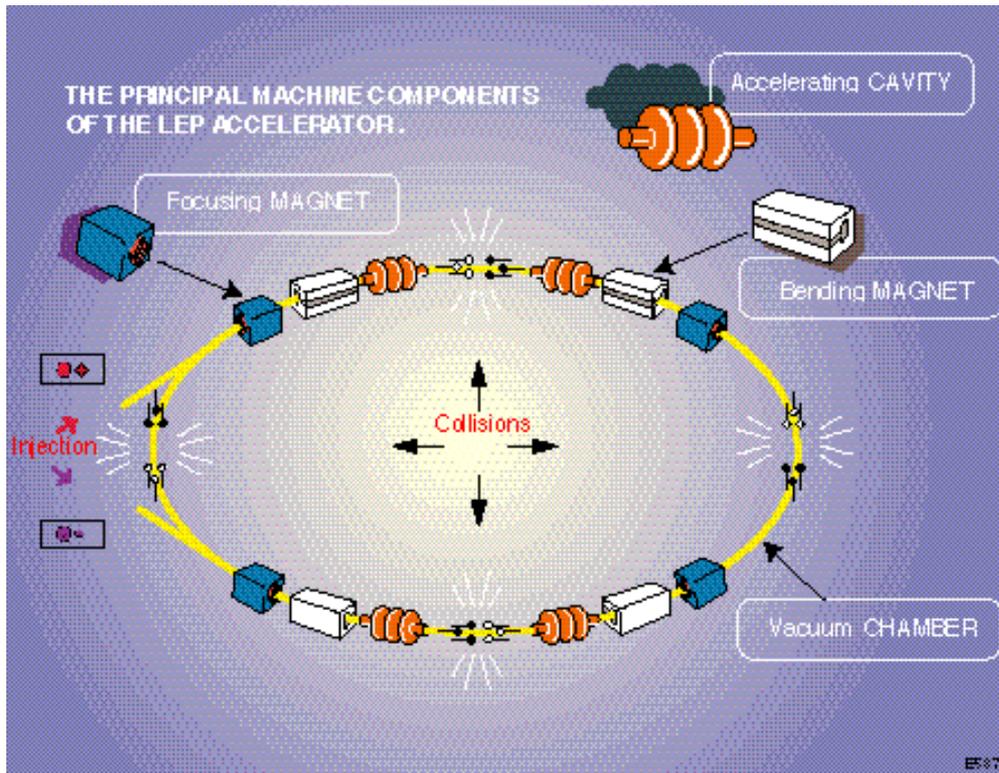
- Supraleitung, Theorie

-----

Nachmittag

- Kryo-Labor (Vortraege und Experimente)
- SM 18 Magnet Test Facilities (Fuehrung

# Teilchenbeschleuniger



Beschleunigung von geladenen Teilchen auf hohe Energien mit Hilfe von Radiofrequenz-Kavitäten.

Teilchen auf Kreisbahn gehalten mit Führungsmagneten (Dipolmagneten).

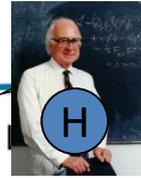
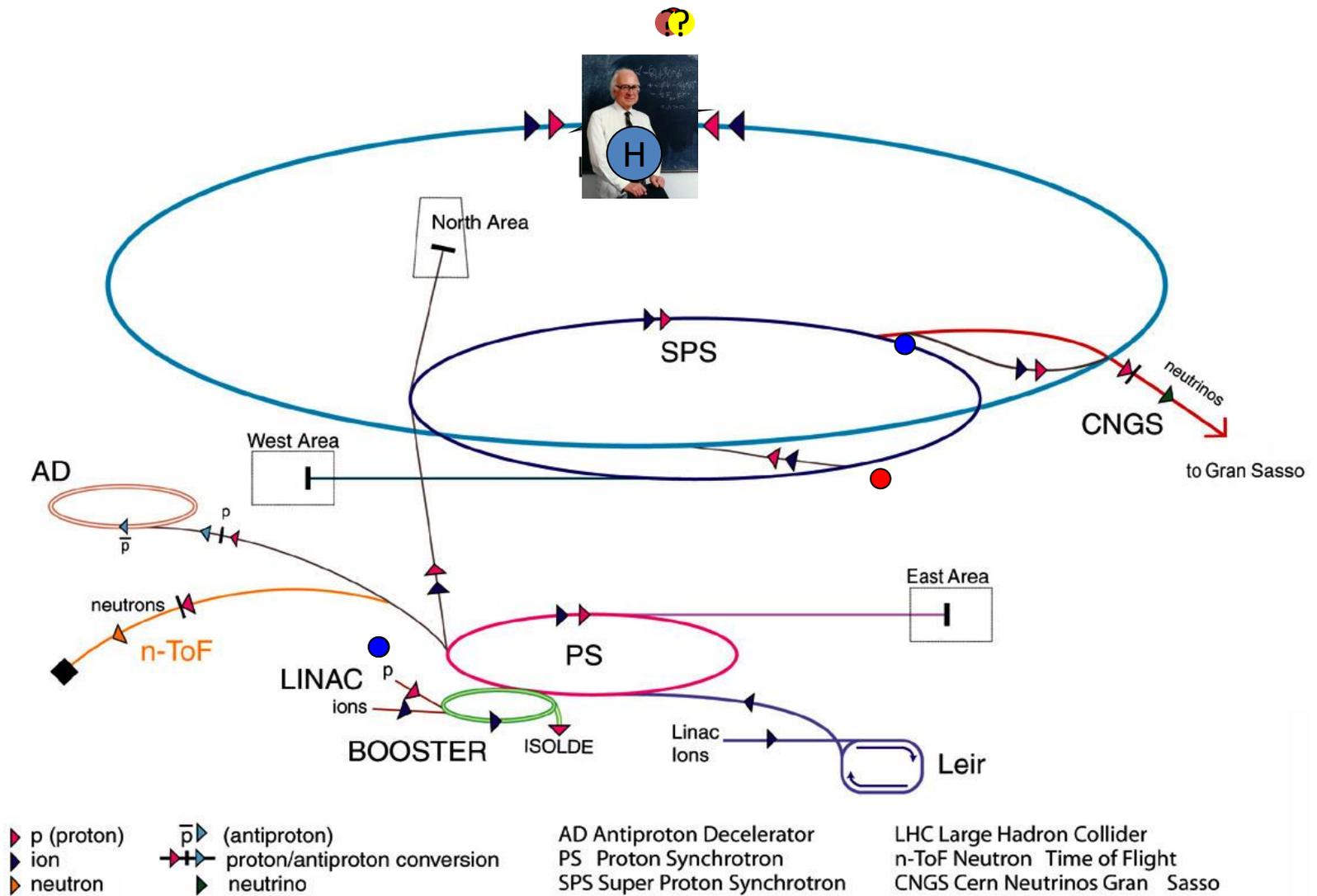
=Konzentration der Energie + anschließende Kollision



feststehendes Target

Gegenläufige Teilchenstrahlen



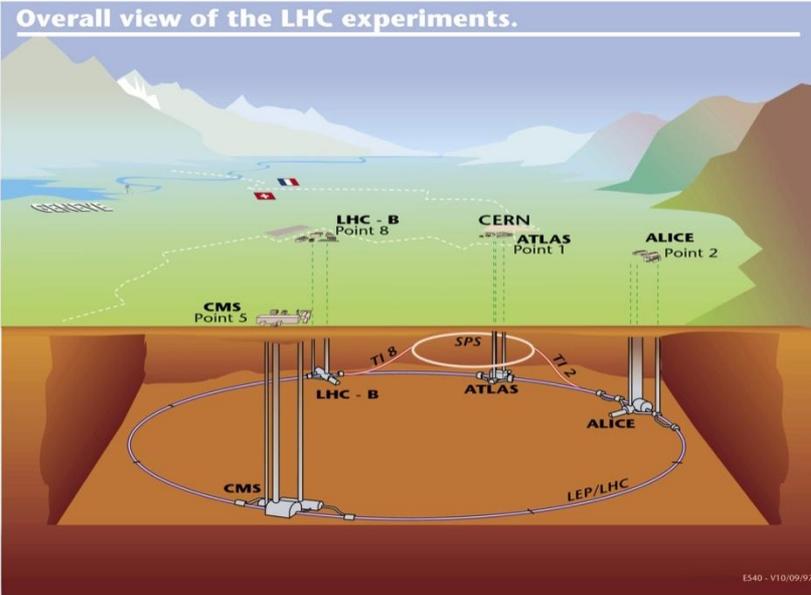


Findet man das Higgs Boson ?

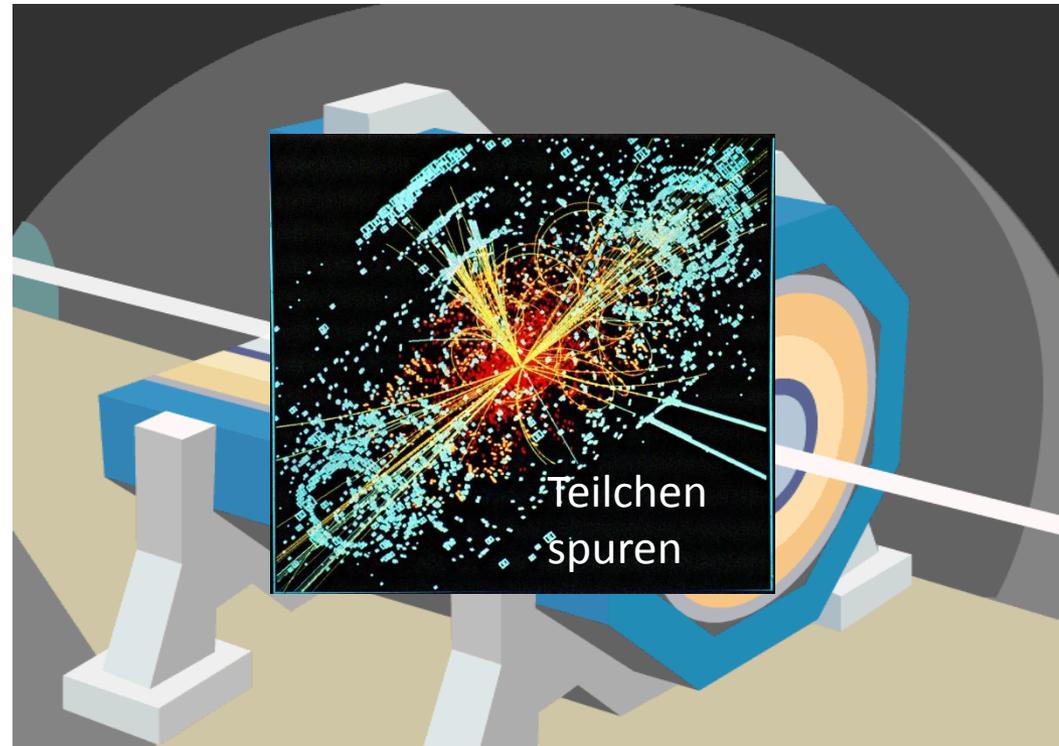
**CERN's Teilchenbeschleunigerkomplex**

# LHC Collider

- LHC: Beschleunigung von Protonen, Schwerionen
- Kollision in Detektoren
- Neue Teilchen, Teilchenspuren



Tunnel mit LHC



# Schlüsseltechnologien: Kryotechnik und Supraleitung (20 Jahre Forschung & Entwicklung)

## **LHC Beschleuniger:**

7 x 7 TeV Protonen  
erfordern sehr  
starke Magnetfelder.  
Nur durch Einsatz von  
Supraleitern erreichbar.

**Kuehlung mit  
fluessigem Helium  
bei 1.9 K**

## **LHC Detektoren:**

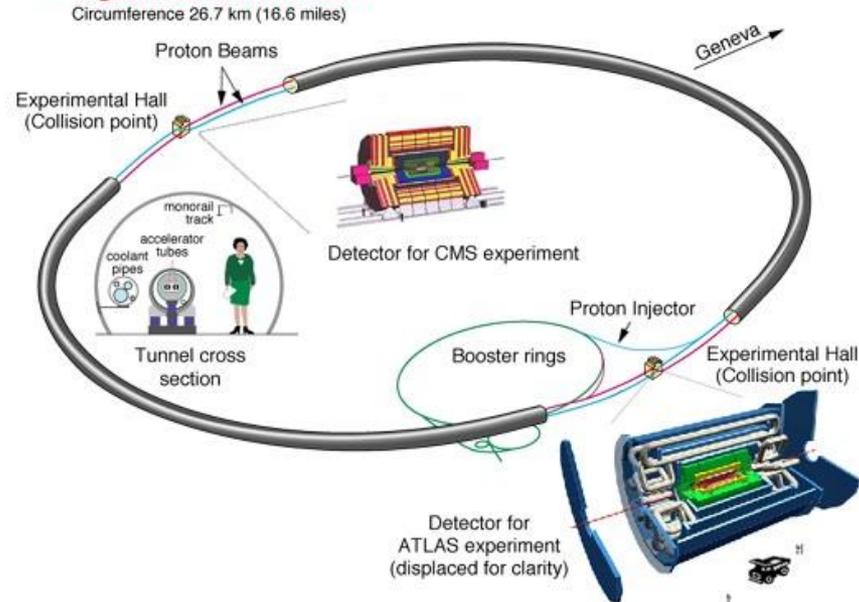
Die Detektoren **CMS** und  
**ATLAS** benoetigen  
sehr starke Magnetfelder.  
Nur durch Einsatz von  
Supraleitern erreichbar.

**Kuehlung mit  
fluessigem Helium  
bei 4.2K**

# Supraleitende Magnete, Kryotechnik

- auf 24 km Länge sind ueber 1800 supraleitende Hochfeldmagnete installiert
- Dipol-Magnetfeld bis 7 Tesla
- Magnete sind auf 1.9 Kelvin gekühlt...
- ... mit einer **Million Liter flüssigem Helium**
- ...erzeugt wird die Kälte...

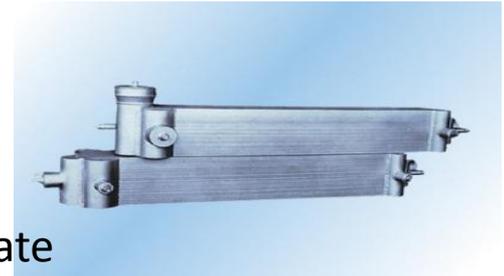
## Large Hadron Collider at CERN



Blick in den Tunnel: Beschleunigermagnete während der Installationsphase



# Neuartige Helium Refrigeratoren fuer den LHC

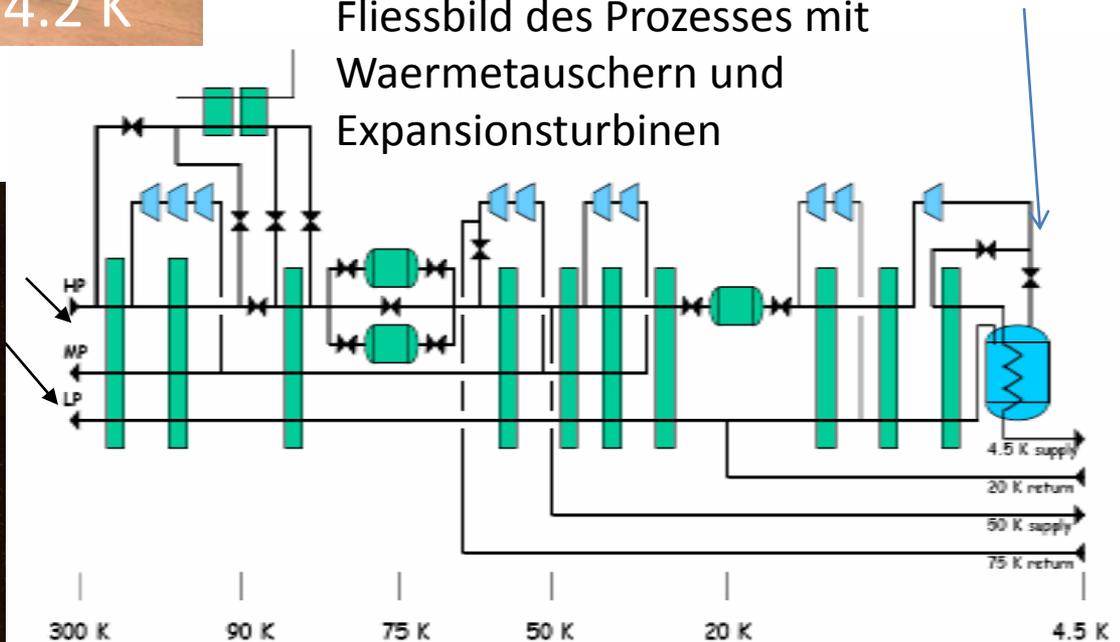


Aluminum fin plate  
Waermetauscher

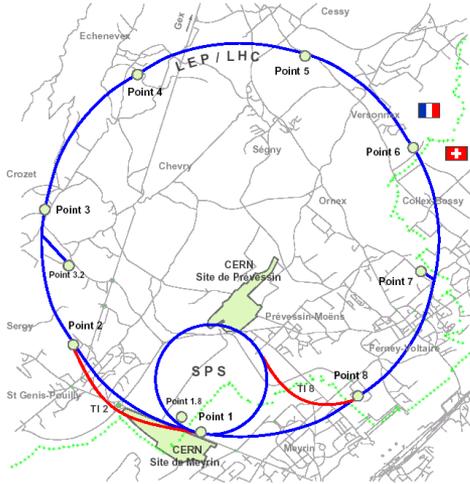
Kaltes Ende mit  
Phasenseparator und  
Fluessigkeitsproduktion



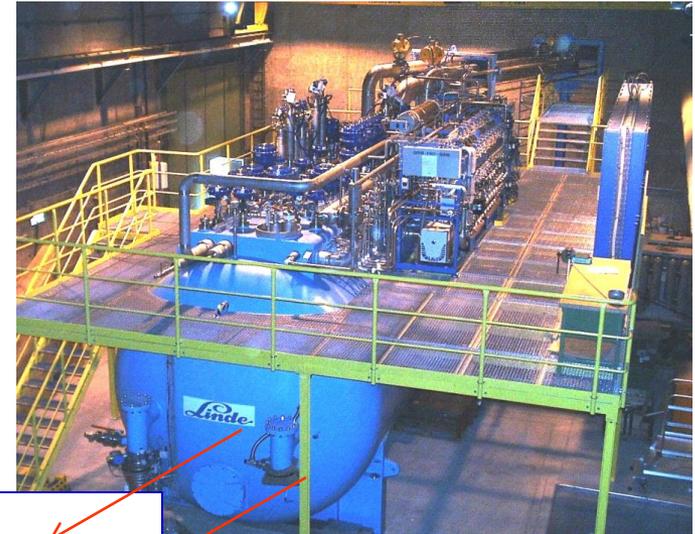
Flie ssbild des Prozesses mit  
Waermetauschern und  
Expansionsturbinen



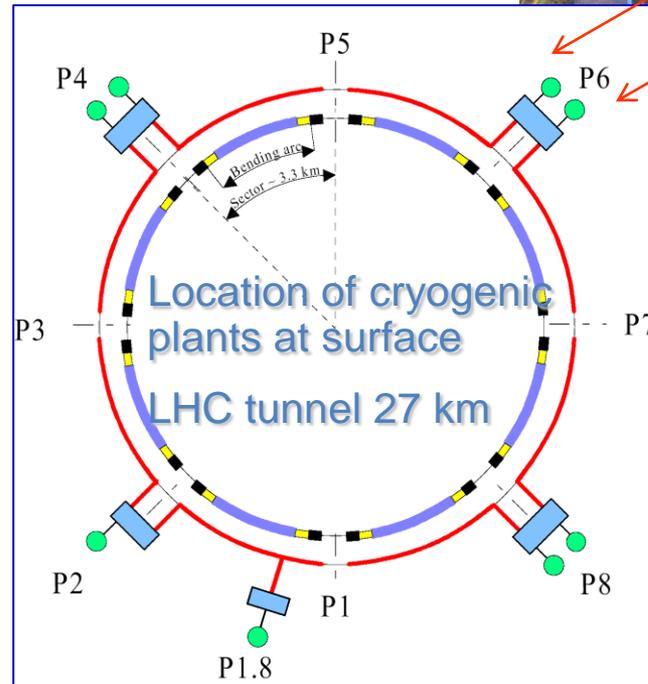
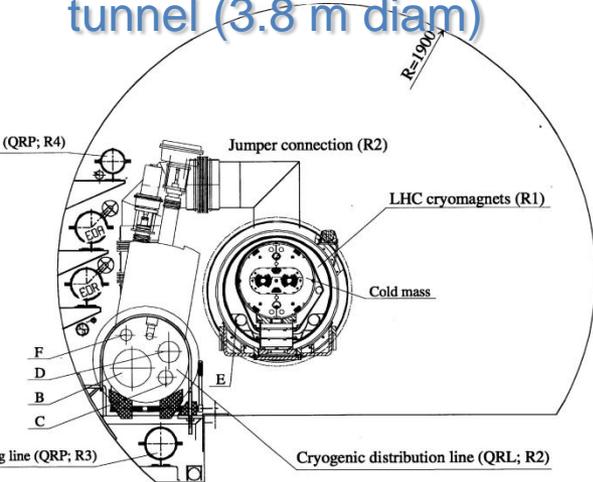
# Crogenics for the LHC collider magnets



**Oberirdisch:**  
 -8 Cryogenic Plants  
 (each 18 kW @ 4.5 K equivalent)

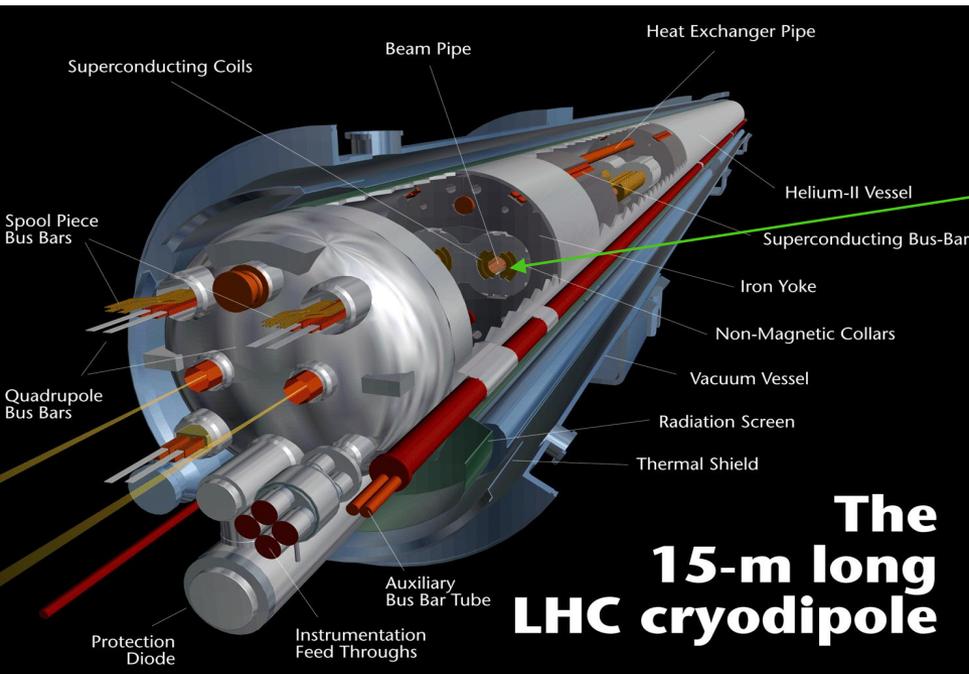


Cross section of LHC tunnel (3.8 m diam)



**In Untergrundhallen**  
 -8 Refrigerators 1.8 K  
 -Distribution systems  
 -24 km transfer lines  
 -24 km magnet string

# Dipolmagnete



The (bending) dipole magnets keep particle beams on their trajectory.

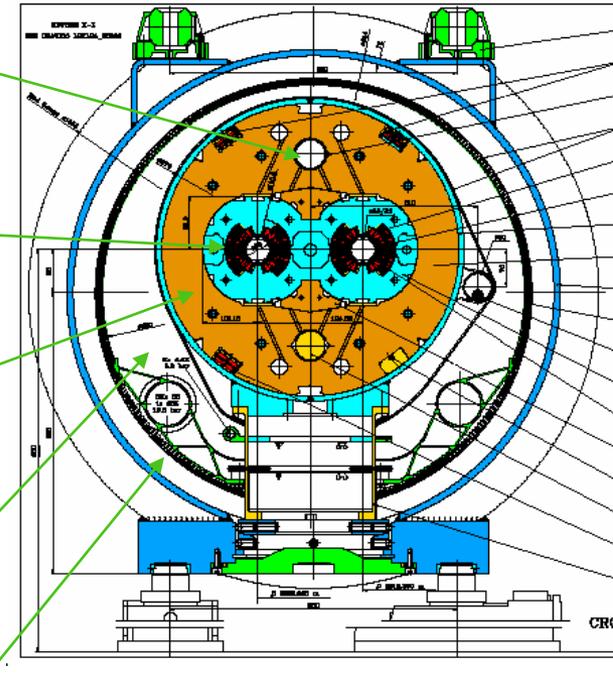
Heat exchanger with boiling helium at 1.9K

Bath cooled Superconducting coils at 1.9 K

1.9 K bath to cool cold mass

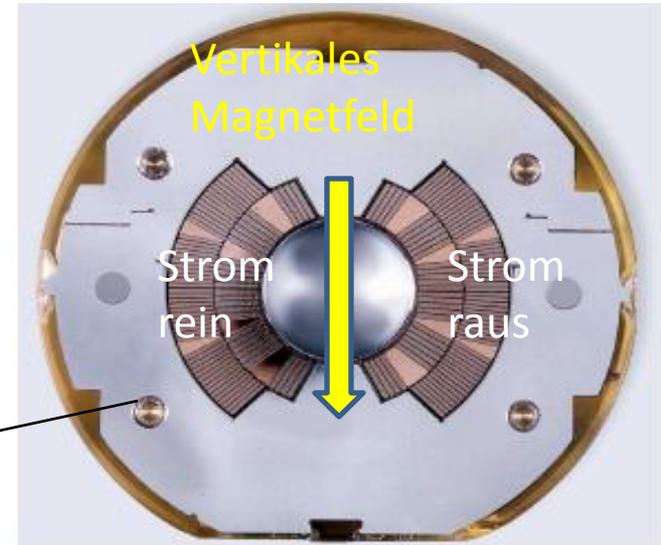
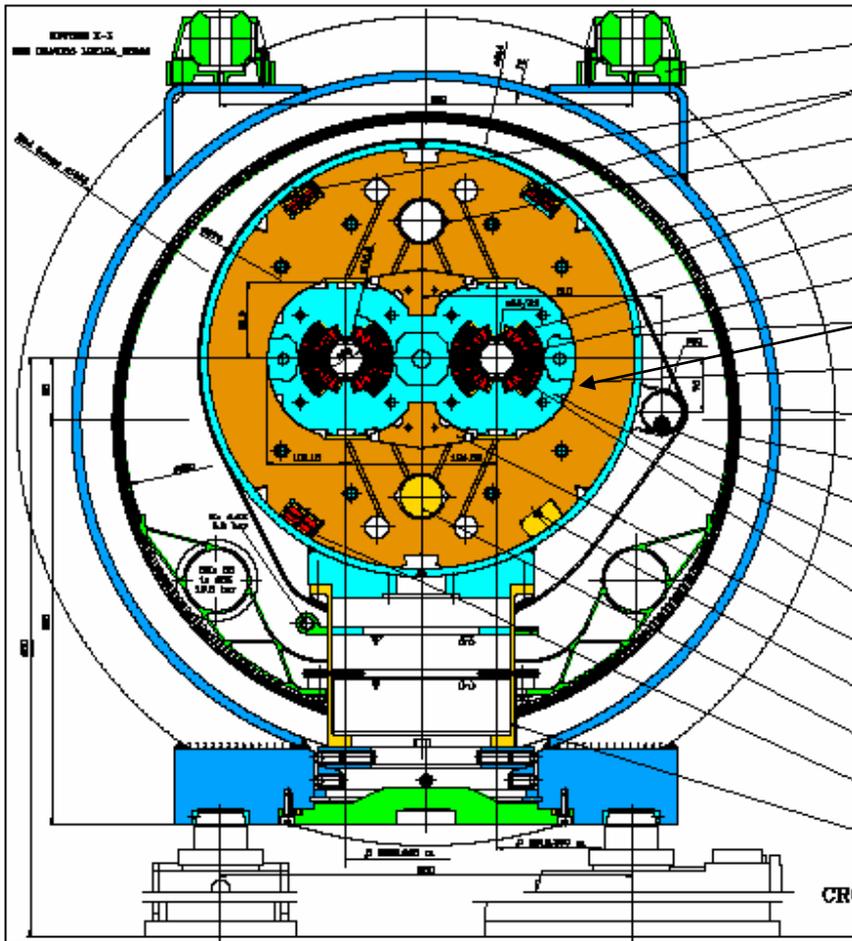
insulation vacuum,

Superinsulation to reflect thermal radiation to reduce thermal load to cold environment.



Cross section of a dipole magnet in its cryostat.

# Dipolmagnete



Die gewickelten Spule von bis zu 15 m Laenge werden von Klammern mechanisch zusammengehalten.

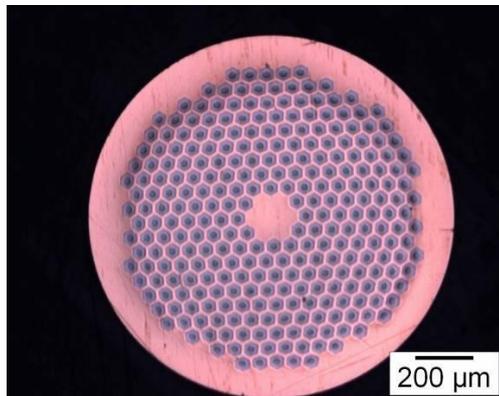
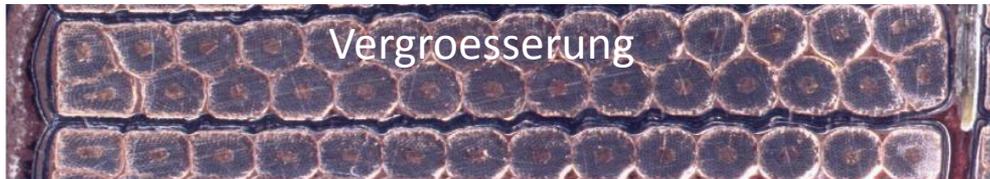
Eingebaut im Magnetbehaelter und Kryostat mit Kuehleinrichtungen Abkuehlung der Spule auf 1.9 K mit suprafluidem fluessigen Helium.

Strom bis 14 kA fliesst OHNE elektrischen Widerstand

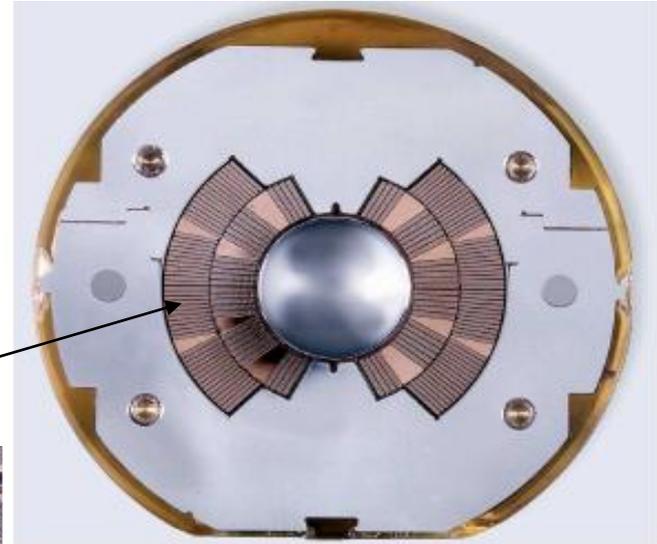
# Einfuehrung in die Supraleitung



Isolierung des supraleitenden Kabels



Einzelner Draht mit supraleitenden Filamenten in Kupfermatrix

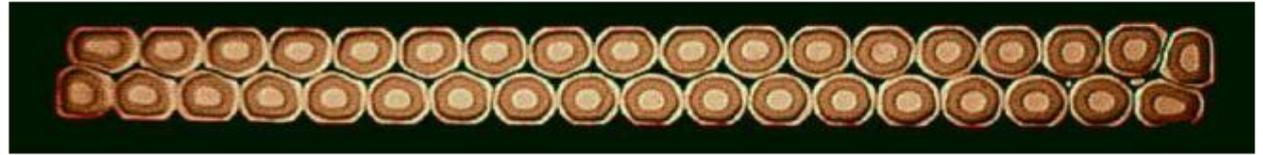


Im Querschnittsbild eines Dipolmagneten ist die "Schichtung" der Kabelwicklung zu erkennen

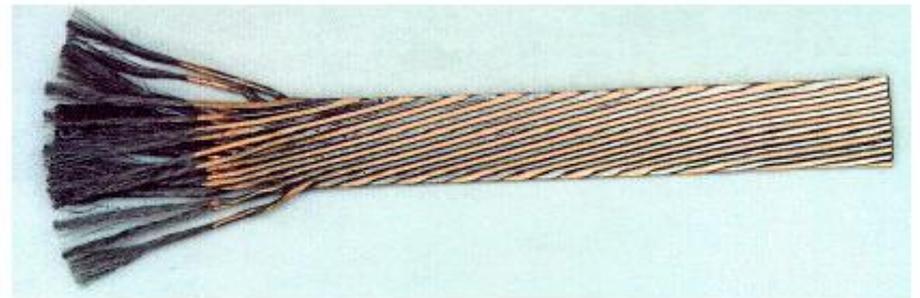
Ein Kabel von 15 mm x 1.5 mm hat eine Stromtragfaehigkeit von ungefaehr 15 kA.

# Supraleiter-Kabel

Weiteres zum Thema:  
Vortrag Thomas  
Fuehrung SM 18



Eine Reihe von Draehten werden zusammengefasst und mit geeigneten Maschinen zu einem duennen Kabel geformt, das sich zu Spulen wickeln laest.



Zur Sichtbarmachung der Nb-Ti Filamente ist mit chemischen Verfahren das Kupfer entfernt worden

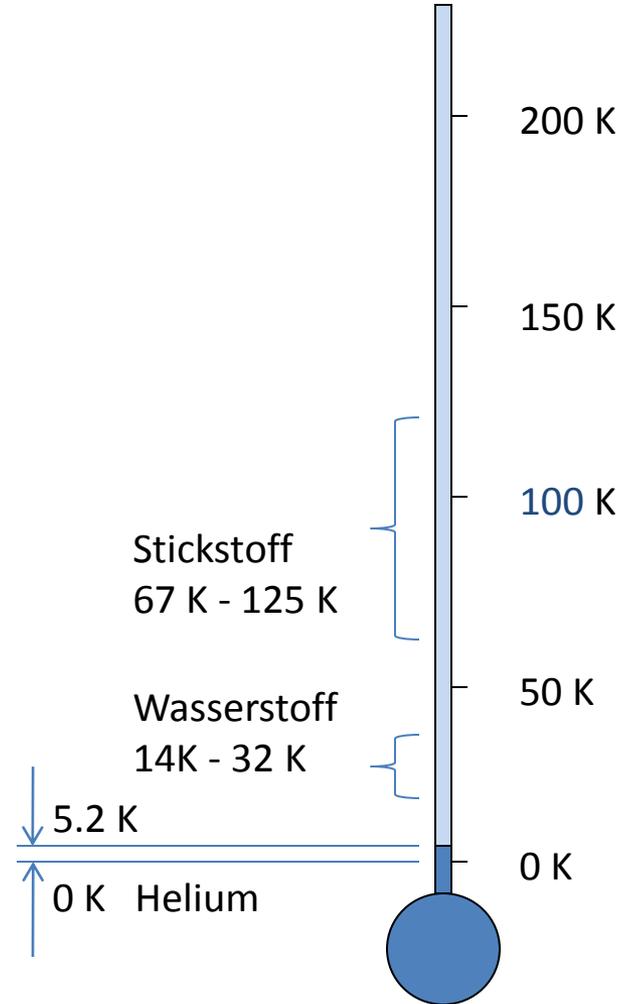
Trotz Isolierung muss ein Fluid in das Innere eines Kabels und in die feinsten eindringen koennen, um effizient zu kuehlen.

**DAS KANN NUR SUPRAFLUIDES HELIUM**

# 1. Frage: warum Helium?

## Antworten:

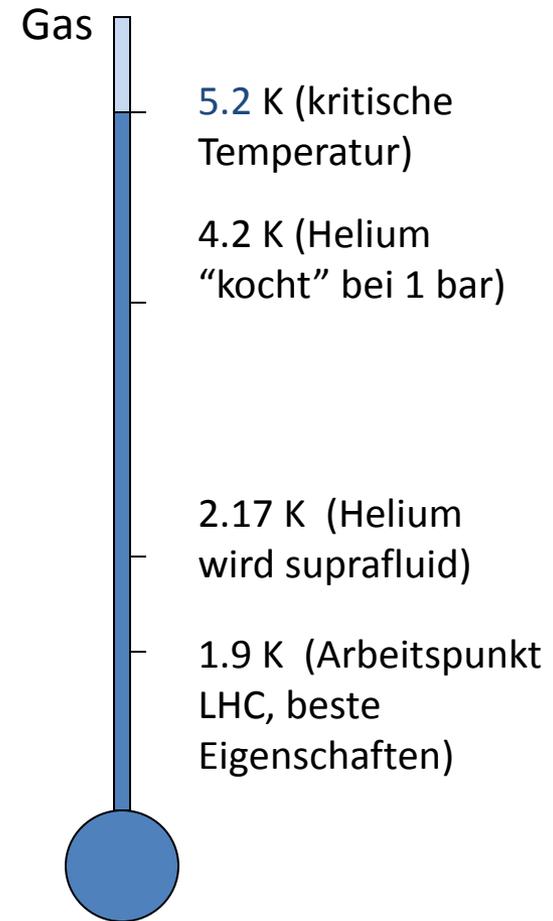
1. Weil alle anderen Stoffe einschliesslich aller bei Umgebungstemperatur gasfoermigen und bei niedrigen Temperaturen verfluessigter Gase letztendlich zu Feststoffen werden (EIS )
2. Weil Supraleiter erst unter einer bestimmten Temperatur, der Sprungtemperatur supraleitend werden. Am CERN verwendete Legierung NbTi :  $T = 9 \text{ K}$ . Man braucht fluessiges Helium zur Kuehlung.



# 2. Frage: warum brauchen die LHC Beschleunigermagneten Helium bei 1.9K ?

Antwort:

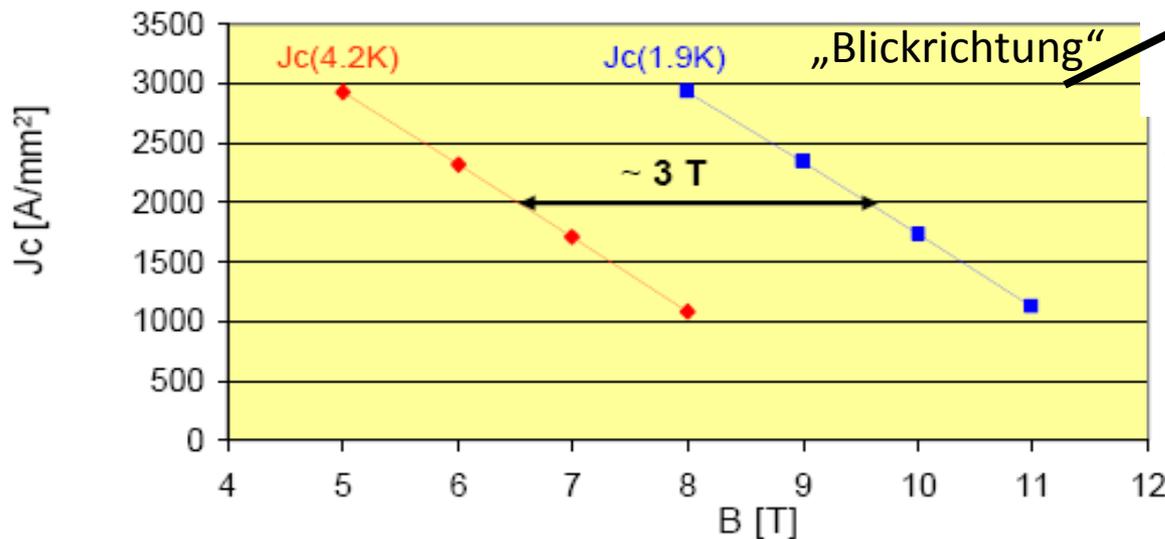
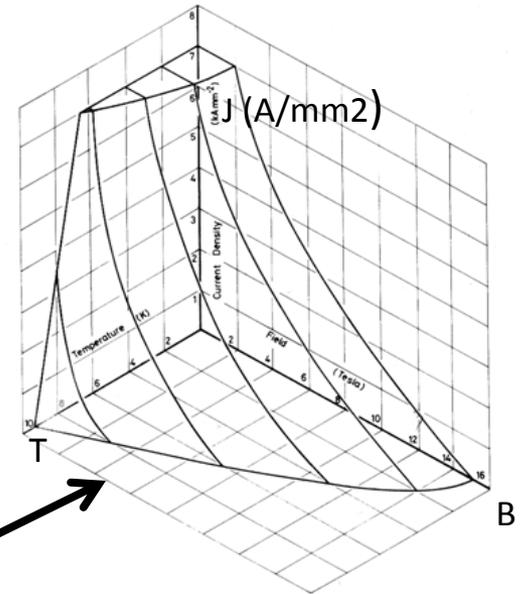
1. Weil Helium bei 1.9 K hervorragendste Transporteigenschaften hat: Eine Million mal höhere Wärmeleitfähigkeit und...Viskosität Null.
2. Weil Supraleiter bei tieferen Temperaturen höhere Ströme und höhere Magnetfelder erreichen



# Supraleiter am CERN, kritische Stromdichte

Fuer die Magnete am LHC wurde eine Arbeitstemperatur von 1.9 K gewaehlt.

- 1.) eine Erhoehung der kritischen Stromdichte und damit hoeheres Magnetfeld gegenueber 4.2 K
- 2.) bei 1.9 K besitzt Helium suprafluide Eigenschaften und ist ein ausgezeichnetes Kuehlmittel



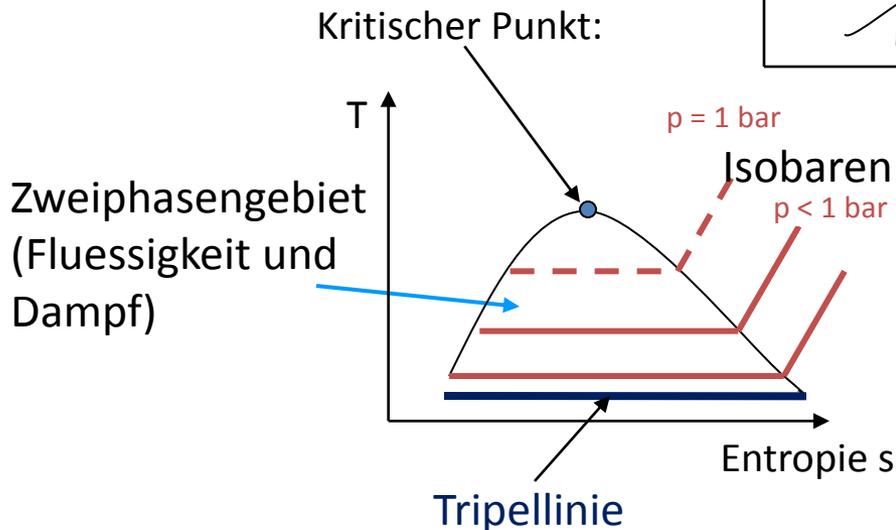
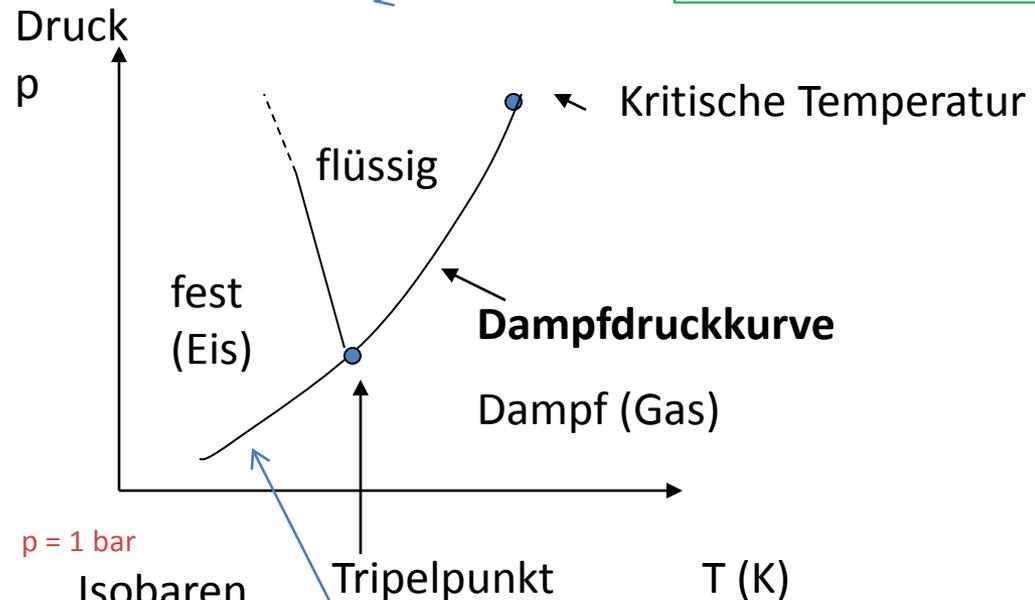
supraleitende/normaleitende Phase verschiebt sich mit niedrigeren Temperaturen zu hoeheren Stromdichten und Magnetfeldern

# Phasendiagramm eines (normalen) Fluids

Phasendiagramm eines  
"normalen" Fluids

Das nennt man  
Phasendiagramm

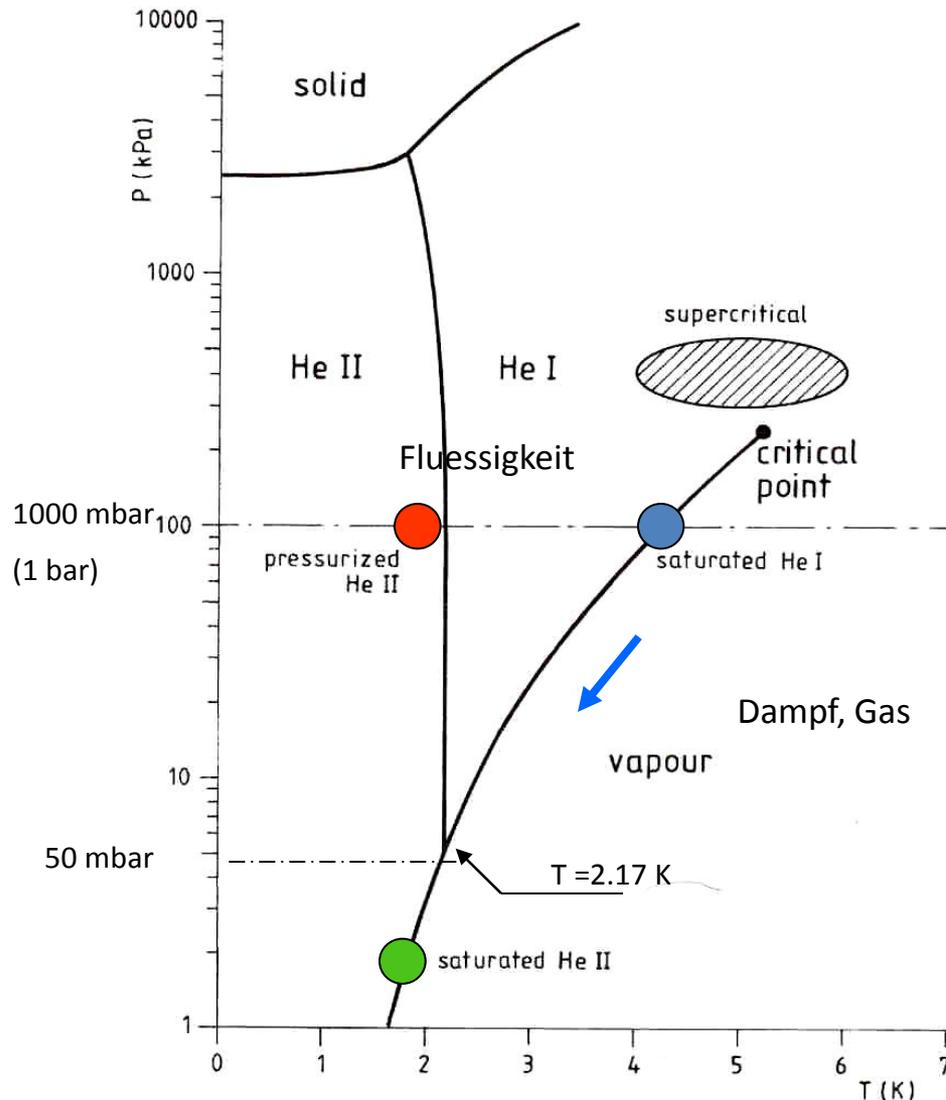
Reduzierung des Drucks  
=> Erniedrigung der  
Sättigungstemperatur



Sublimationslinie (Eis/Dampf)

Das nennt man Temperatur-  
Entropie Diagramm

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



Die Sättigungstemperatur bei 50 mbar ist 2.17 K.

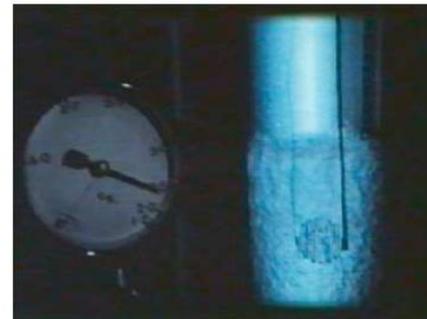
Phasenubergang, kein Tripelpunkt: das Helium bleibt flüssig.

Diese Temperatur wird  **$T_{\lambda}$**  genannt,..

Bei dieser Temperatur findet eine « radikale » Änderung der Eigenschaften des Heliums statt. Es findet eine Transformation von einem normalen in ein sogenanntes suprafluides Medium statt.

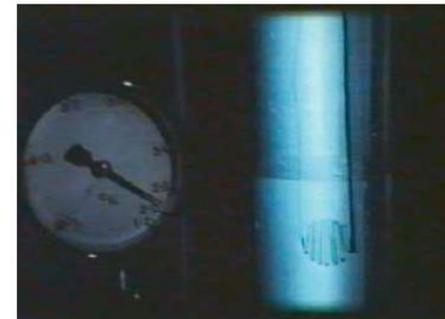
**Quantenfluid.**

**normales Helium = He I**



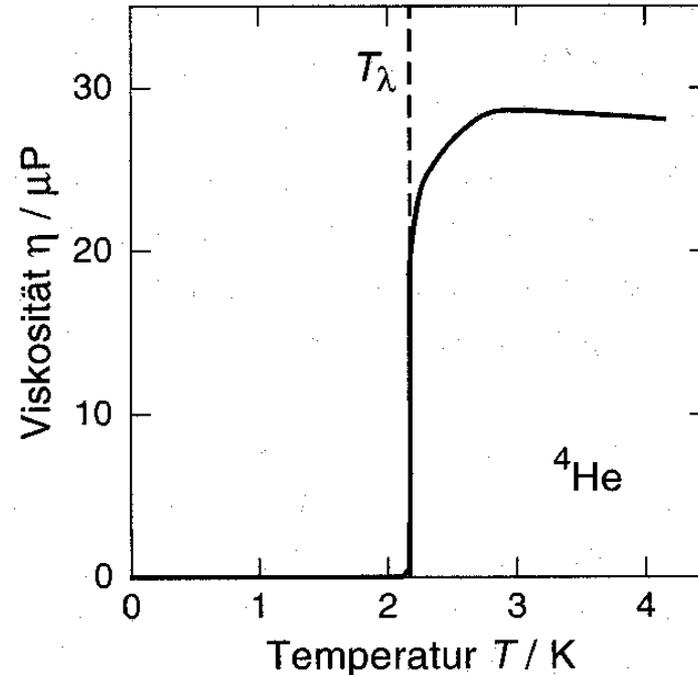
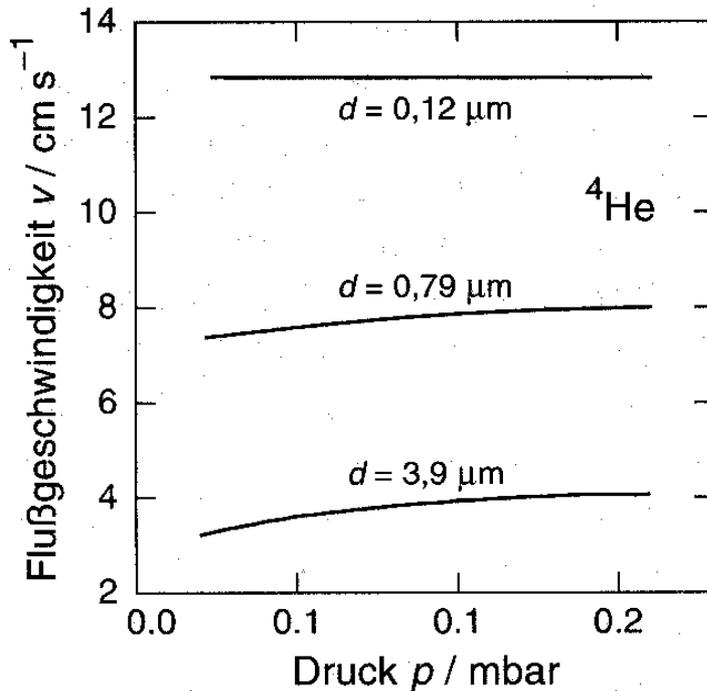
He I ( $T=2,4 \text{ K}$ )

**suprafluides Helium = He II**



He II ( $T=2,1 \text{ K}$ )

# Ungewöhnliche Eigenschaften: Viskosität HeII geht gegen Null



Die Fließgeschwindigkeit in Kapillaren nimmt mit abnehmendem Durchmesser zu und ist unabhängig vom Druck. Viskosität in Spalten geht gegen Null.

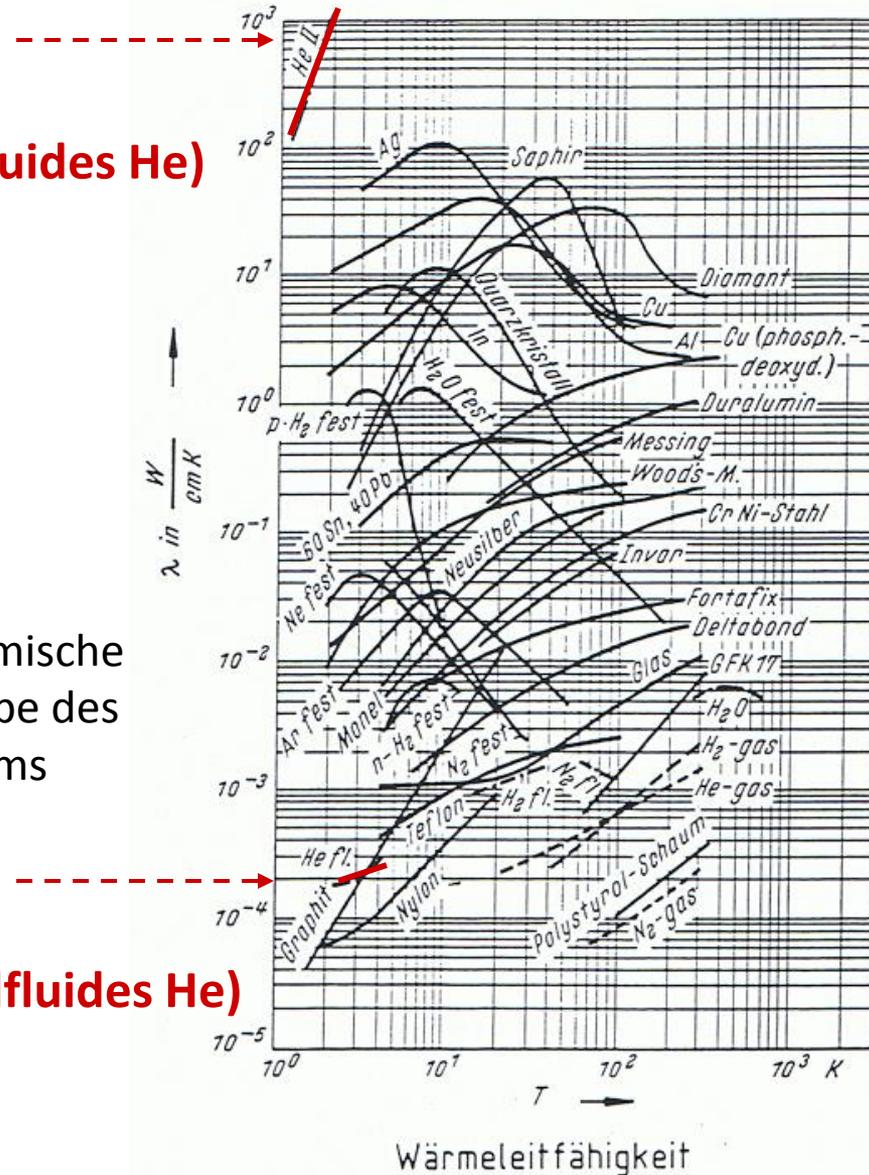
**Fluid dringt hervorragend in unsere supraleitenden Spulen ein!**

# Ungewöhnliche Eigenschaften: Eine Million mal hoehere Waermeleitfaehigkeit

**Suprafluides Helium (He II)  
leitet Waerme um 6  
Grossenordnungen besser als  
normalefluides Helium (He I) in  
der Fluessigphase.**

**Beste Leitfaehigkeit bei 1.9 K .**  
Das ist die Temperatur , bei der das  
Mischungsverhaeltnis suprafluide  
zu normalfluide Komponente 1 ist.  
Gleiche Anteile.

*Suprafluides Helium ( $T < 2,17$  K)  
weist mit Abstand die beste  
Waermeleitfaehigkeit aller Stoffe  
auf. Mit bis zu ueber 1000 W/cmK  
uebertrifft es sogar bestleitende  
Metalle um mehrere  
Grosseneordnungen.*



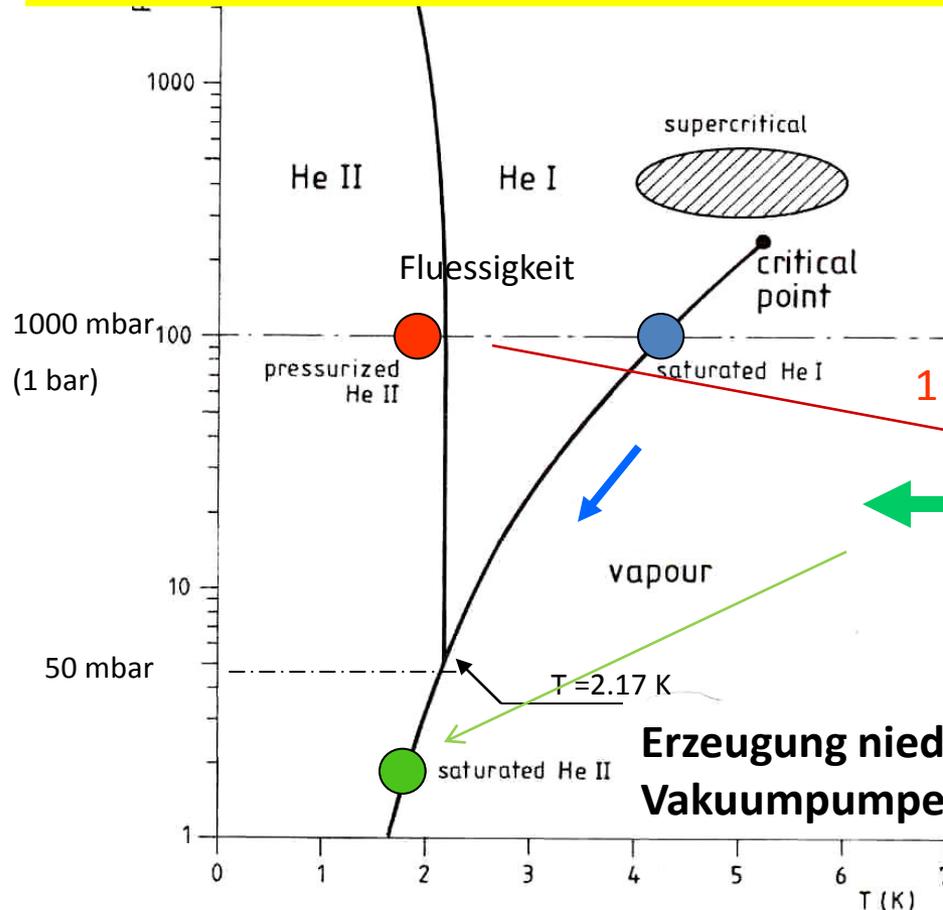
**He II  
(suprafluides He)**

**He I  
(normalfluides He)**

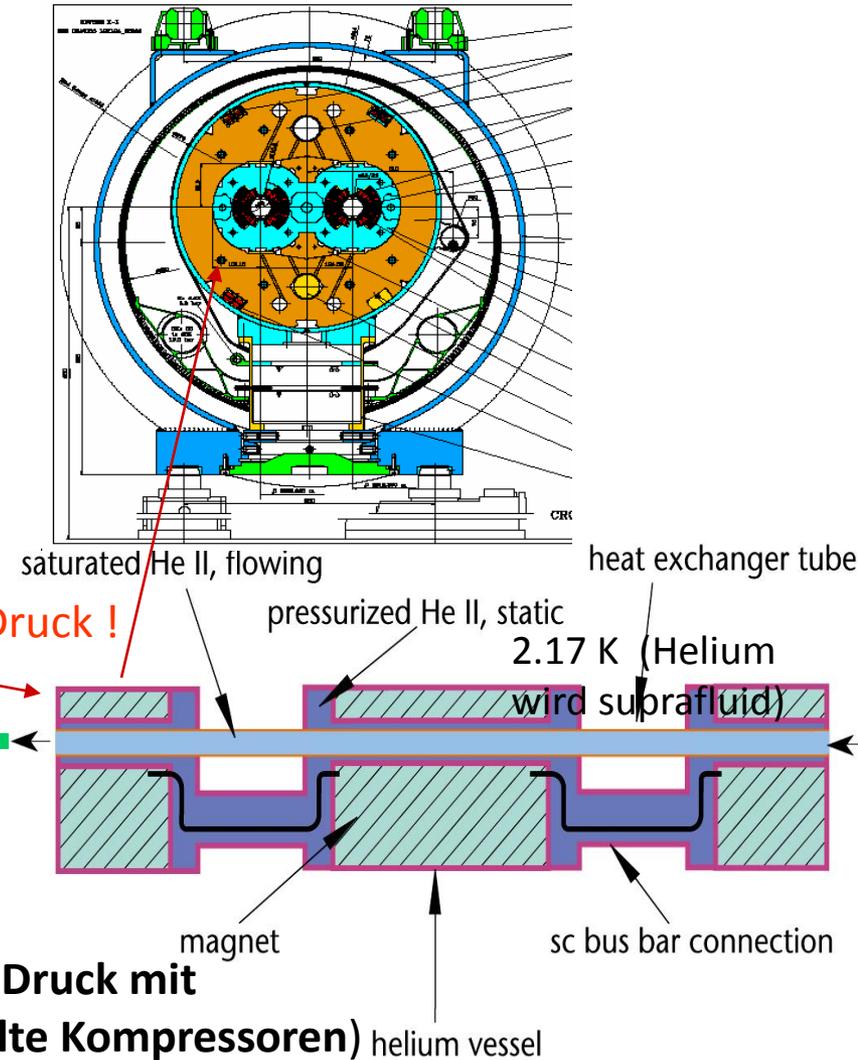
# LHC Magnete bei 1.9 K suprafluidem Helium

Die kalte Masse mit Magnet ist in einem unterkuehlten 1.9 K Bad bei 1 bar

Kuehlung ueber Waermetauscher mit gesaettigtem Helium bei 15 mbar (1.9 K)

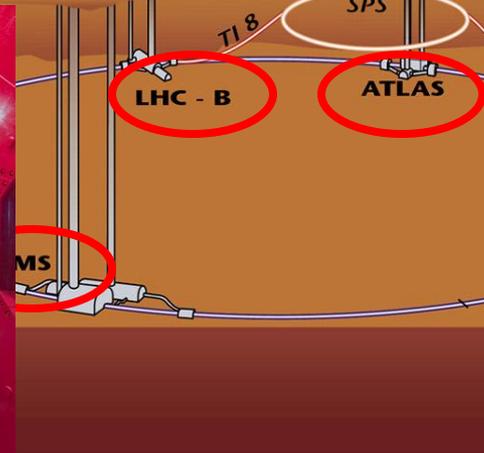
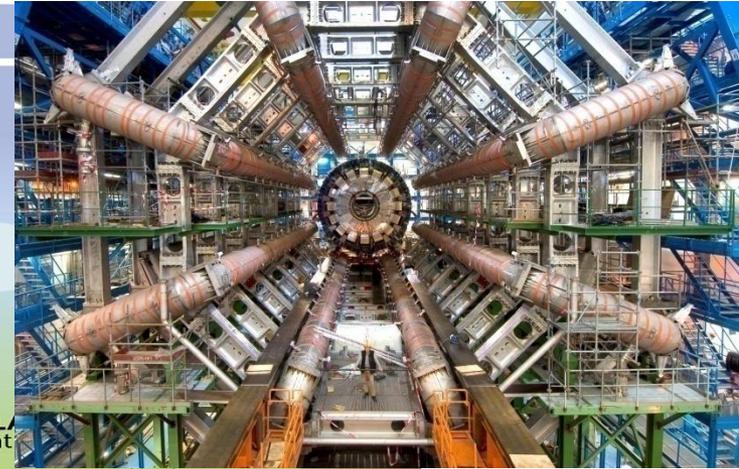
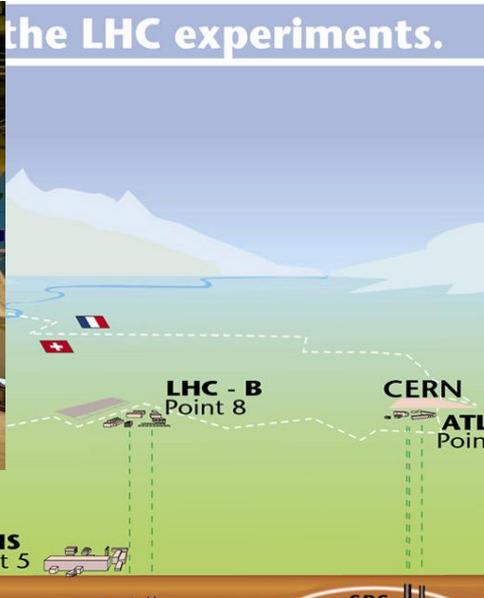


**Erzeugung niedriger Druck mit Vakuumpumpen (kalte Kompressoren)**



# Die vier grossen LHC Detektor Experimente

ATLAS und CMS setzen Supraleitung und Kryotechnik ein zur Erreichung der hohen geforderten Feldstaerken



# Supraleitende CMS Spule



## Solenoid

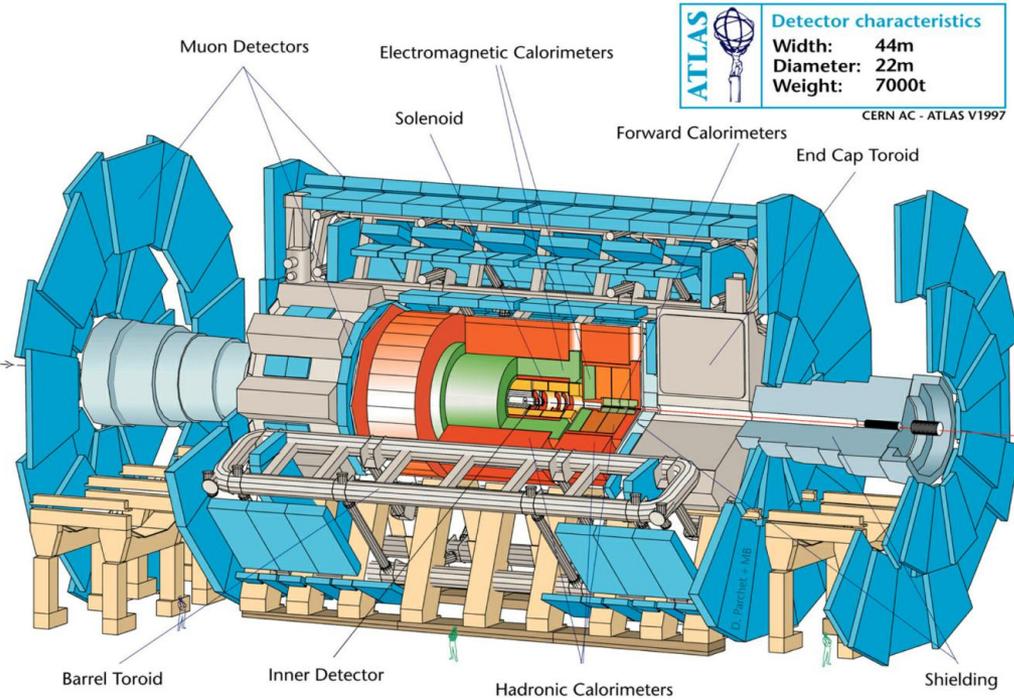
6 m Durchmesser  
12 m Laenge

Stromstaerke 20 kA

Betriebstemp. 4.2 K  
Gespeicherte  
Energie: 2.5 GJ

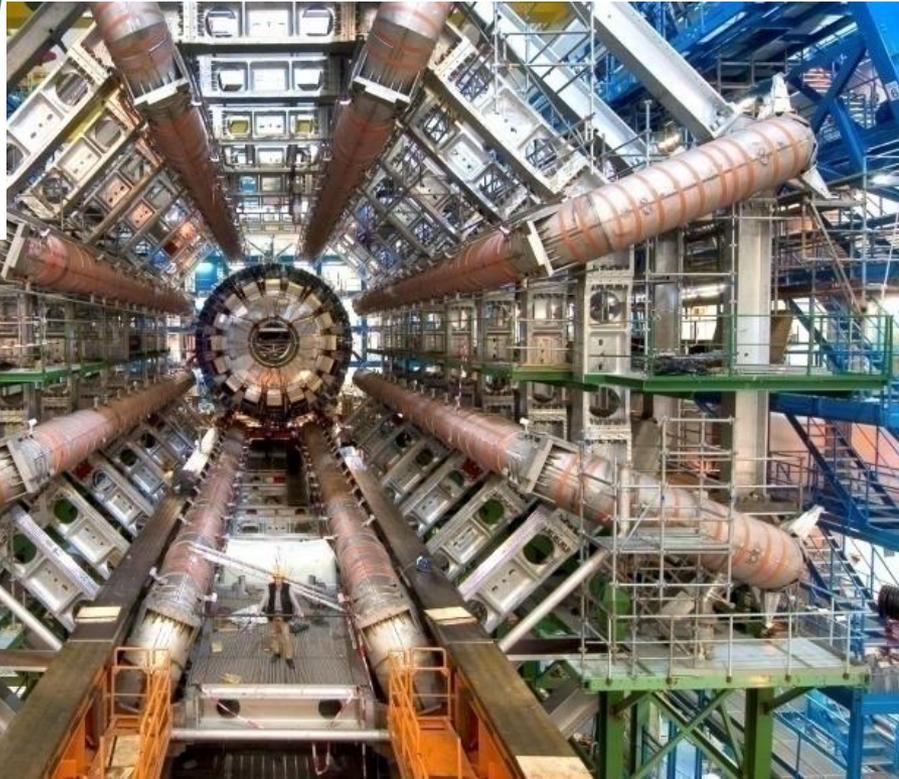
**Kuehlprinzip: Thermosyphon mit natuerlicher Konvektion in aufsteigenden Kuehlrohren (“kochendes Helium”)**

# ATLAS Supraleitende Magnete und Kryotechnik



## Supraleitende Magnete

- 1 Barrel (8 Spulen) 25 m x 20 m Durchmesser
- 2 End Cap 4 m x 11 m Durchmesser
- 1 Solenoid
- 2 Helium Refrigeratoren
- 2 Umwaelzpumpen (10 liter/sec)



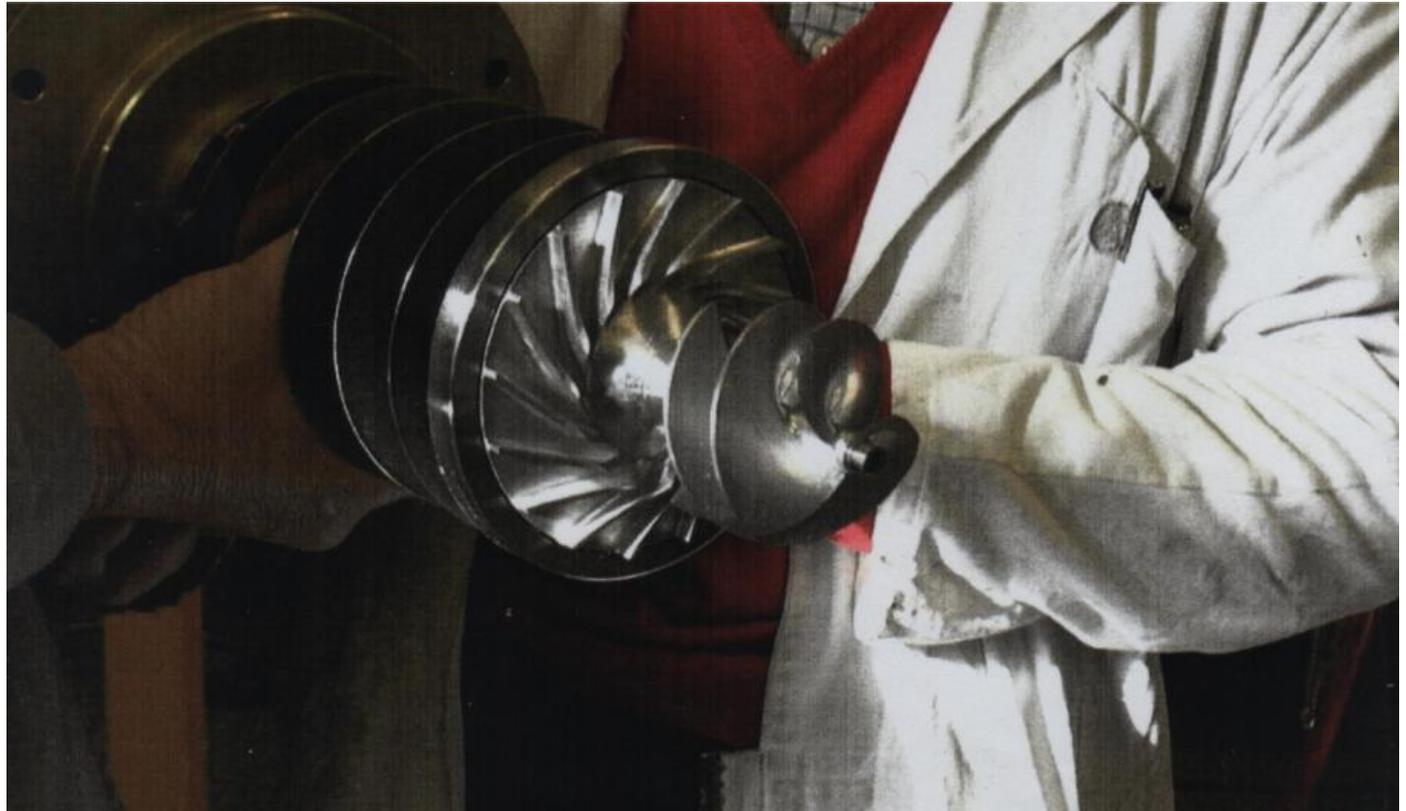
## Fluessig Argon Calorimeter

- 1 Barrel Kryostaten
- 2 End Cap Kryostaten
- < 100 m3 fluessiges Argon

## Fluessig Stickstoff Kuehlung (Refrigerator)

# ATLAS Supraleitende Magnete und Kryotechnik

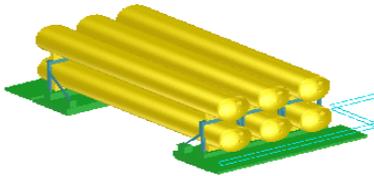
Kuehlprinzip der Magneten: Fluessiges Helium bei 4.2 K wird in Kuehlschlangen verdampft, das mit **10 l/s** Helium Umwaelzpumpen gefoerdert wird. (10 l/s ... 1 Eimer/sec)



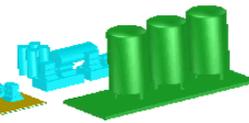
# ATLAS 3 D

Helium storage tanks for  
30.000 Nm<sup>3</sup> of Helium  
gas

Surface Area



2 x 50 m<sup>3</sup> Liquid Nitrogen  
Dewars at surface



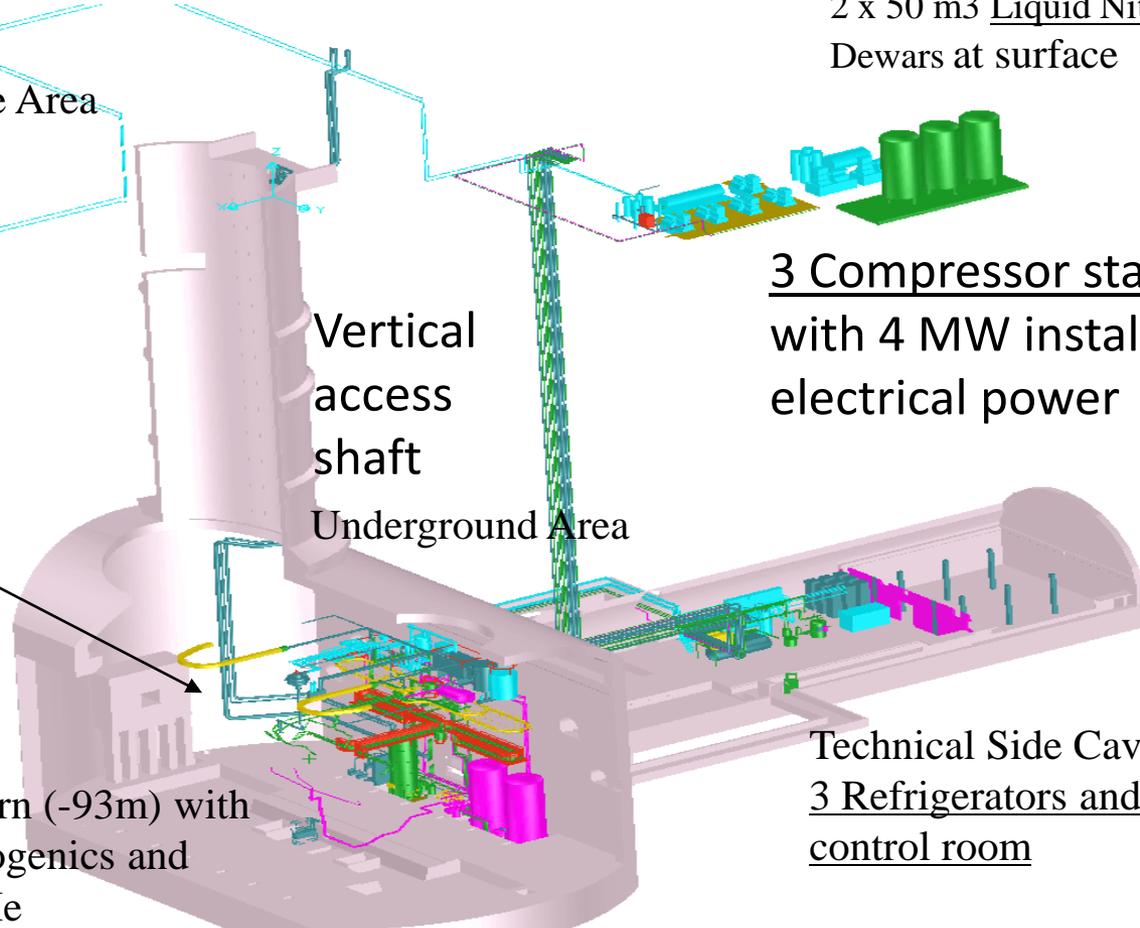
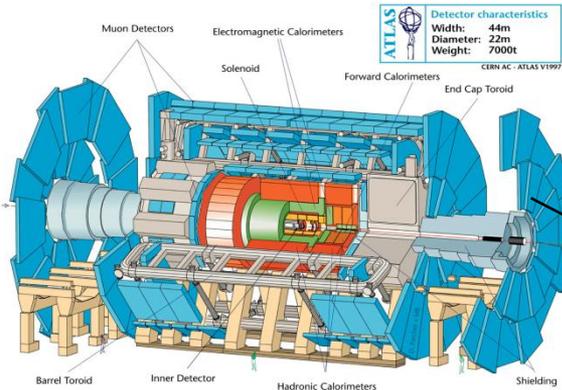
3 Compressor stations  
with 4 MW installed  
electrical power

Vertical  
access  
shaft

Underground Area

Technical Side Cavern with  
3 Refrigerators and local  
control room

Detector Cavern (-93m) with  
proximity cryogenics and  
11,000 l of LHe  
15,000 l of LN<sub>2</sub>  
90,000 l of LAr



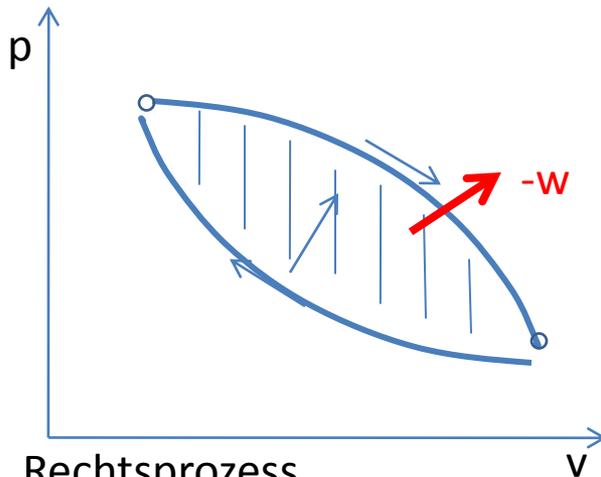
# Thermodynamik: Kontinuierlich Kaelte erzeugen durch Kreisprozesse!

Kreisprozesse durchlaufen Zustandsaenderungen eines Mediums (Gas, Dampf, ...)

Rechtsprozess

Umwandlung

Wärmeenergie  $\rightarrow$  mechanische Arbeit



Rechtsprozess

Wärmekraftmaschine (z.B. Otto-, Dieselmotor)



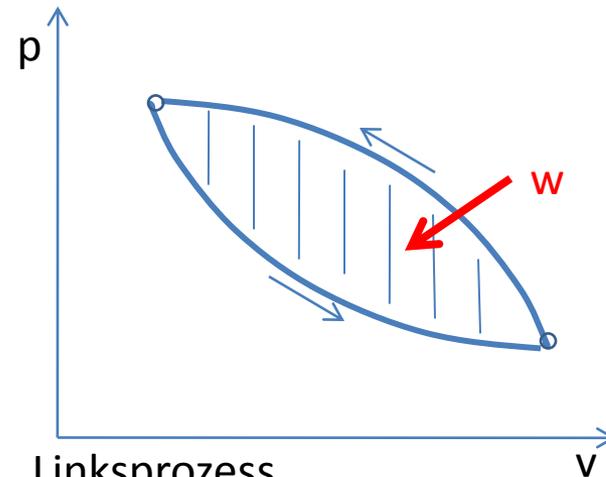
Zylinder.  
Kolben

Linksprozess

Q

Umwandlung

mechanische Arbeit  $\rightarrow$  Wärmeenergie



Linksprozess

„Kraftwärmemaschine“:  
Kältemaschine, Wärmepumpe

# Carnot Kreisprozesse

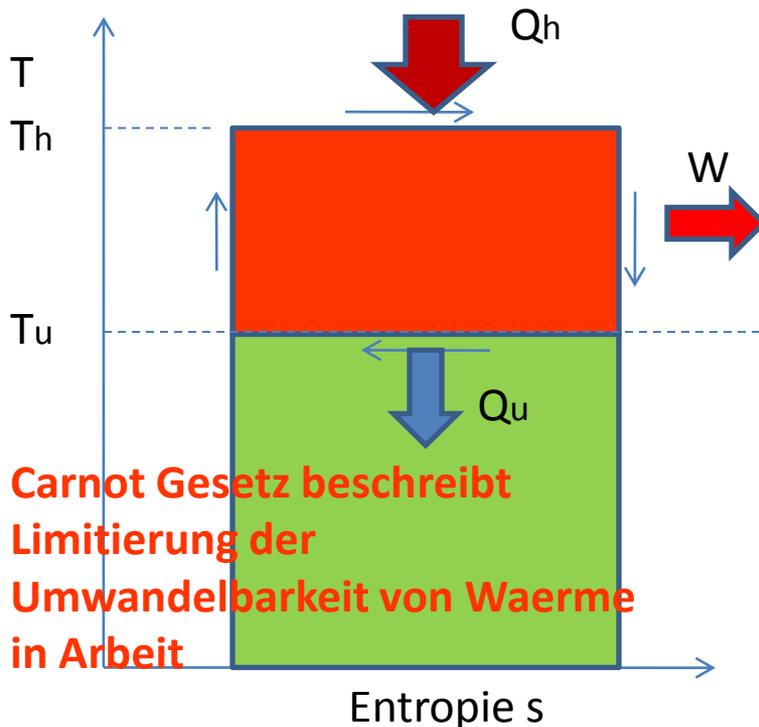
**Ideal reversibler Kreisprozess** zwischen zwei Isothermen und zwei Isentropen.  
Vergleichsprozess. Wird nicht realisiert.

Sadi Carnot  
1796-1832



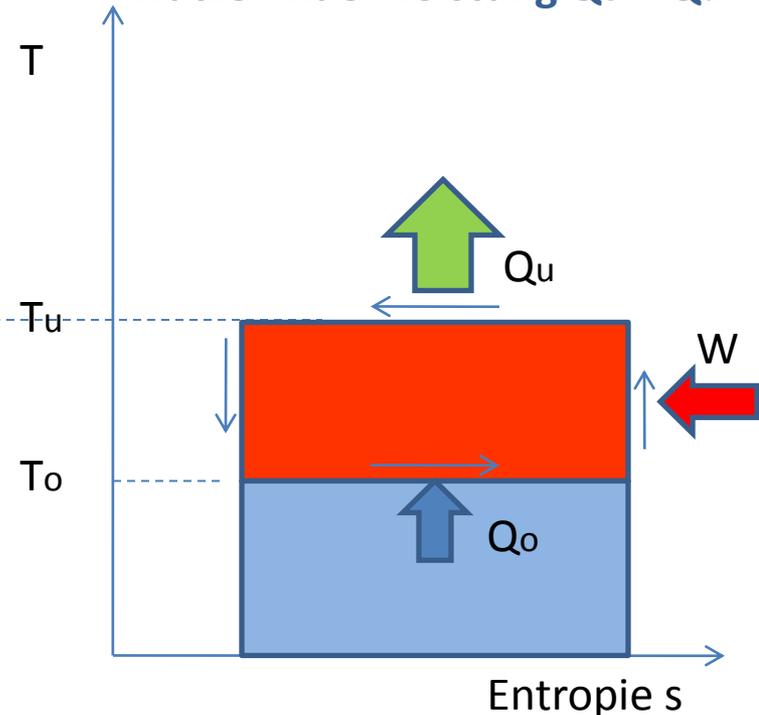
## Waermekraftmaschine

Rechtslaeufiger Kreisprozess,  
Waermeenergiezufuhr an Arbeitsmedium  
bei hoher Temp. **Nutzen Arbeit  $W = Q_h - Q_u$**



## Kaeltemaschine

Linkslaeufiger Kreisprozess,  
Arbeitsmedium nimmt Waerme bei  
niedriger Temp. auf  
**Nutzen Kuehlleistung  $Q_o = Q_u - W$**



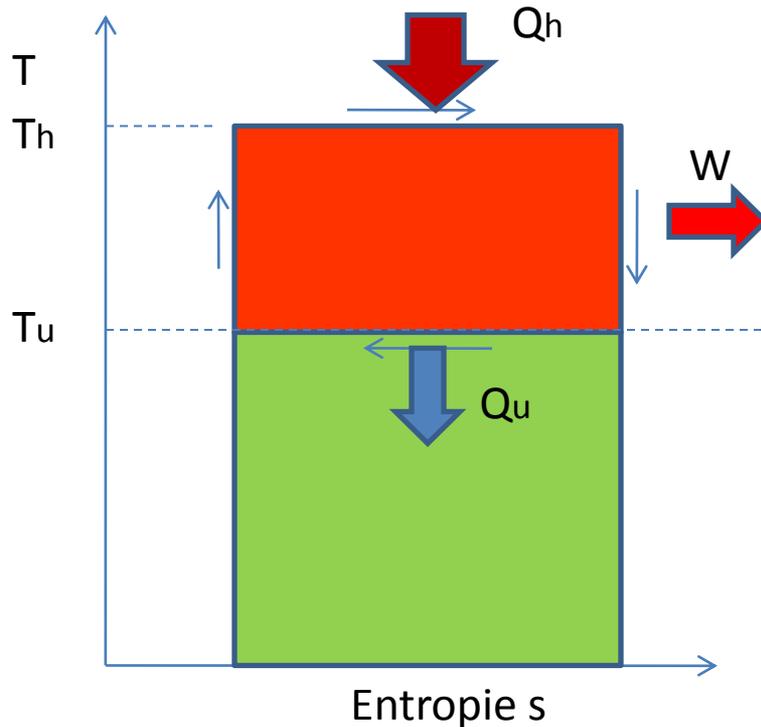
# Carnot Kreisprozesse

Waermekraftmaschine (Motor)

Nutzen Arbeit  $W = Q_h - Q_u$

Wirkungsgrad = Nutzen / Aufwand

$$\eta = W/Q_h = (T_h - T_u) / T_h$$



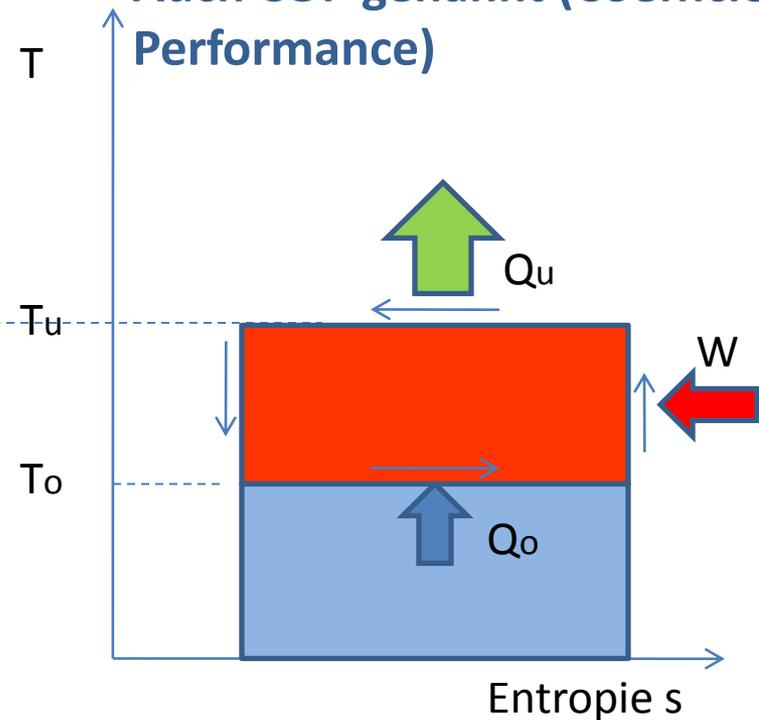
Kaeltemaschine (Kuehlschrank)

Nutzen Kuehlleistung  $Q_o = Q_u - W$

Leistungszahl = Nutzen / Aufwand

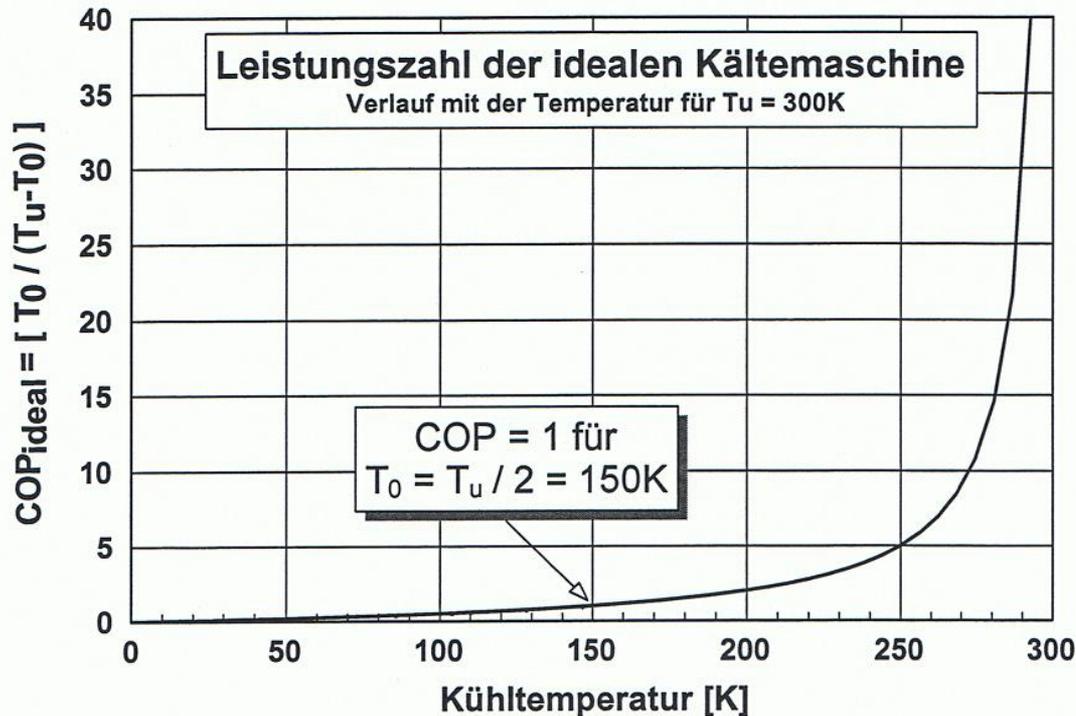
$$\varepsilon = Q_o/W = T_o / (T_u - T_o)$$

Auch COP genannt (Coefficient of Performance)



# Leistungszahl COP (ideal Carnot)

	Household freezer (-20 degr C, 253 K)	Nitrogen refrigerator (80 K)	Helium refrigerator (4.2 K)	Dilution refrigerator(10 mK)
COP	6.3	0.37	0.014	0.00035
W(input)/Qo	0.16 W/W	2.7 W/W	70 W/W	29300 W/W



Mit abnehmender Temperatur nimmt COP (Nutzen zu Aufwand) ab und Aufwand in **W/W** geht bei sehr tiefen Temperaturen gegen Unendlich .

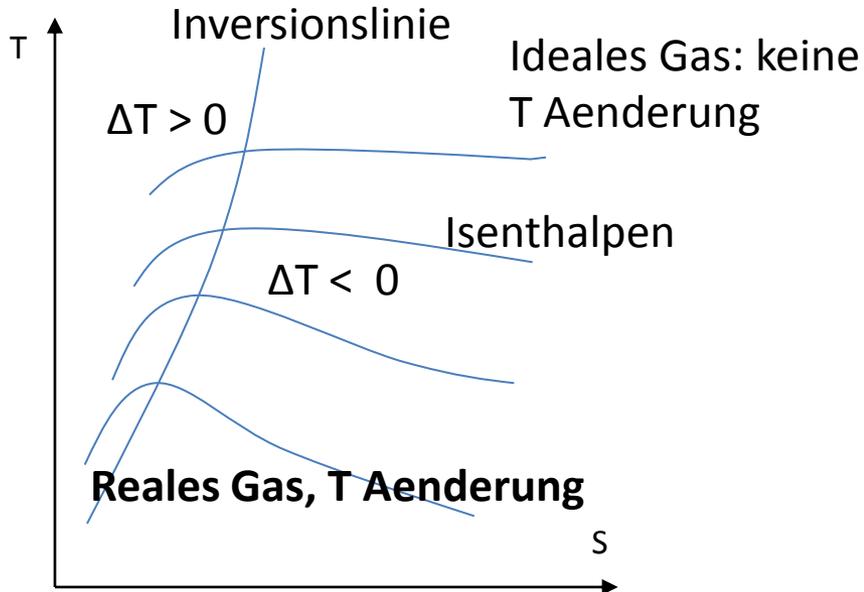
In der Praxis....mal sehen...

# Adiabate Entspannung

Zur Erreichung tiefer Temperaturen: Entspannung eines "Kreislauf"-Gases

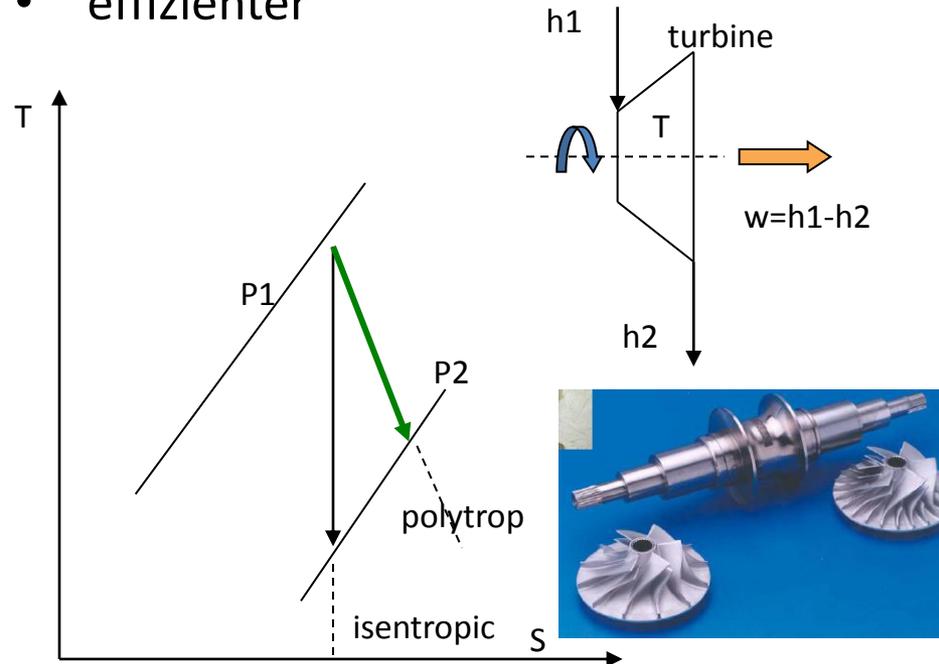
## Joule-Thomson Entspannung

- Temperaturraenderung kann positiv, null oder negativ sein bei Entspannung



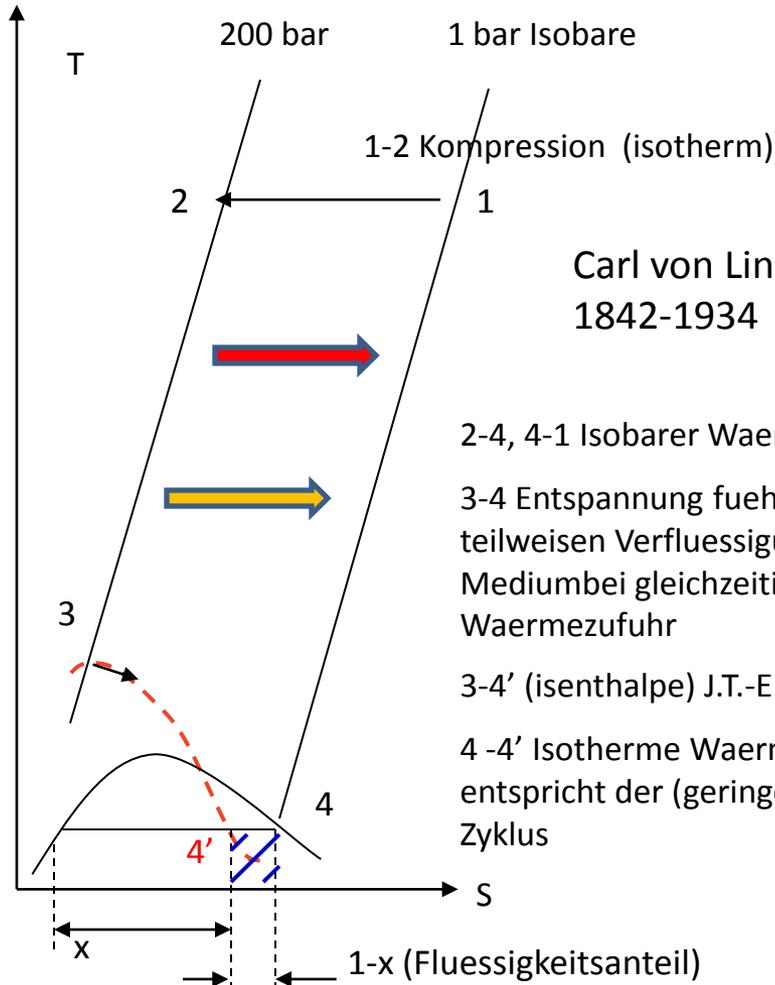
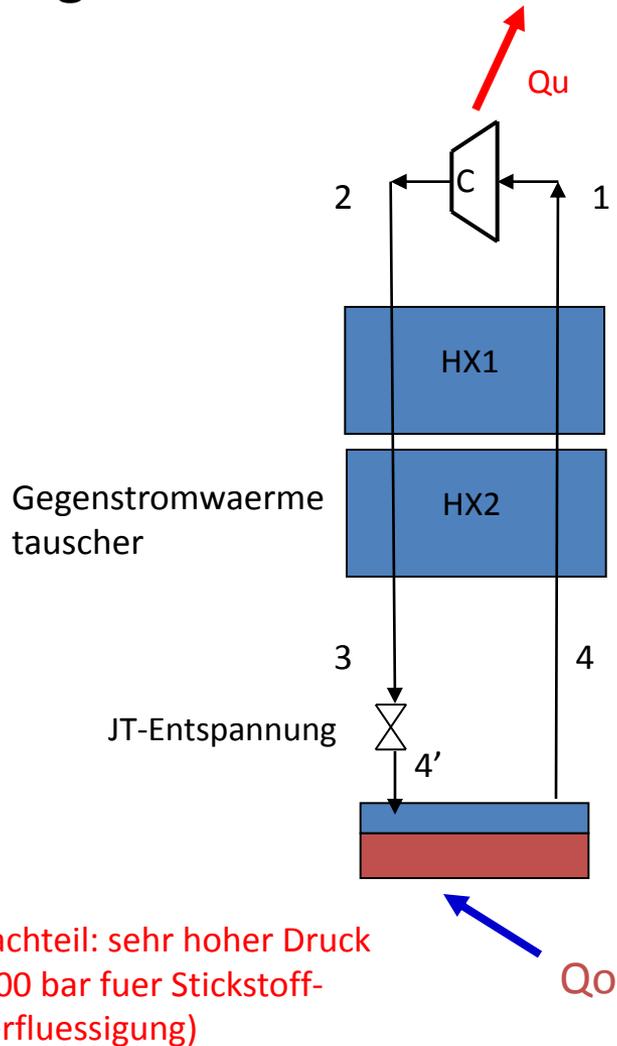
## Entspannungsmaschine (Turbine)

- Funktioniert immer , auch bei idealem Gas
- effizienter

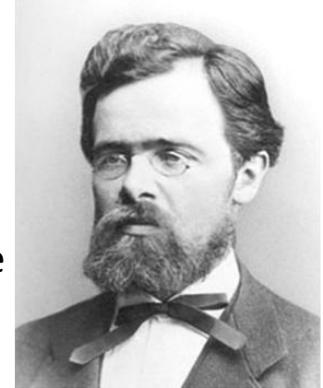


# Verfahren: Linde Kreisprozess (Idealisiert)

Die erste systematische Anwendung eines rekuperativen Verfahrens (Gegenstromwaermetauscher) zur Luftverfluessigung ( $\sim 80\text{ K}$ )

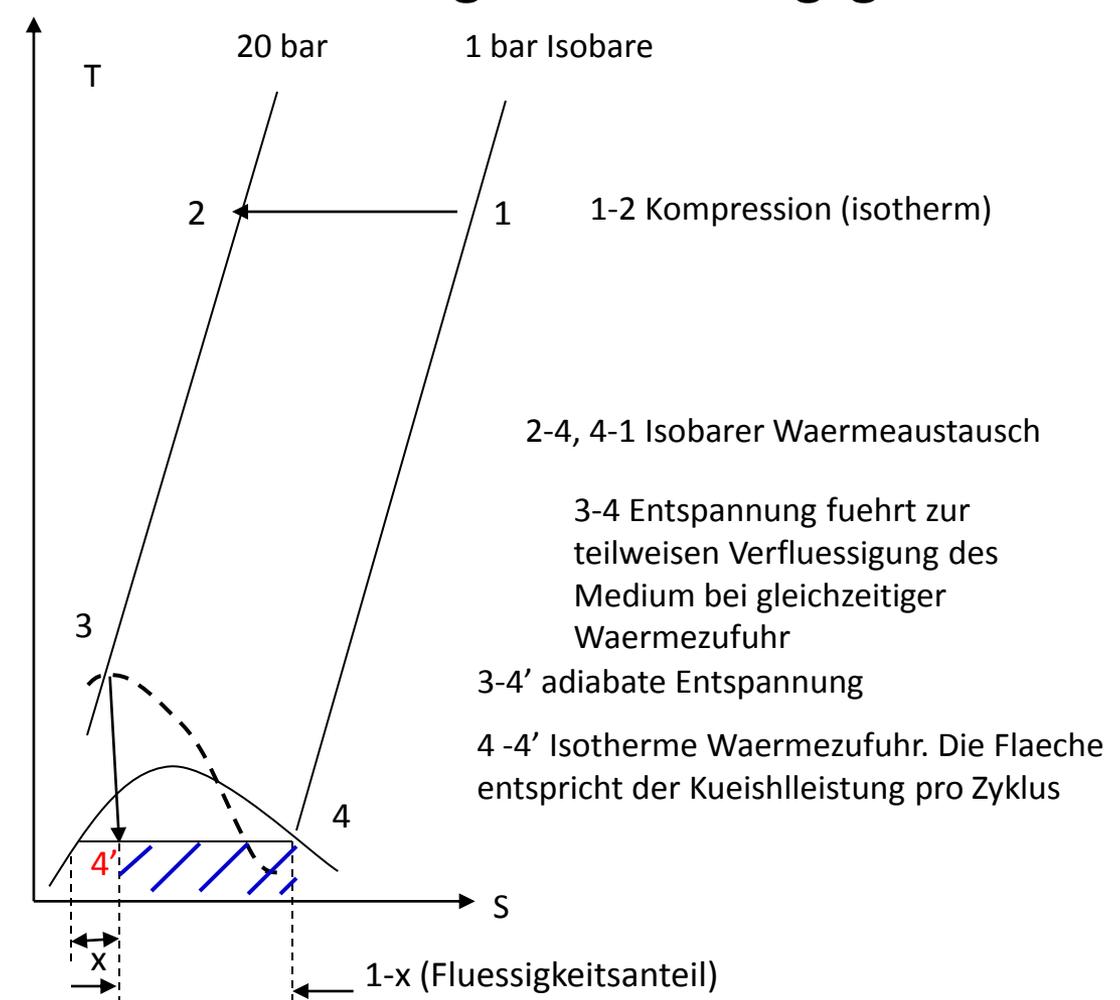
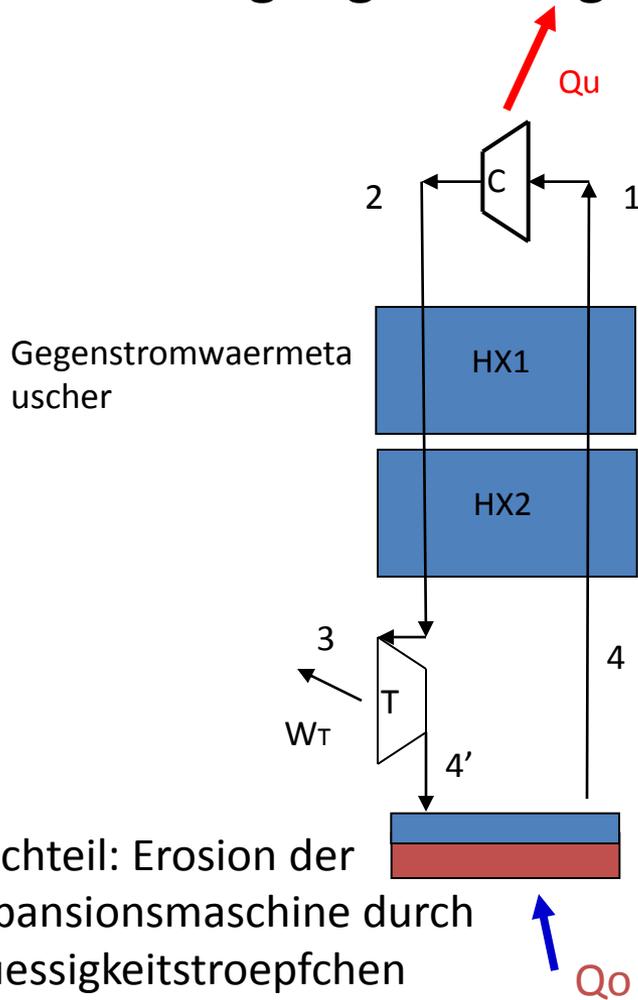


Carl von Linde  
1842-1934

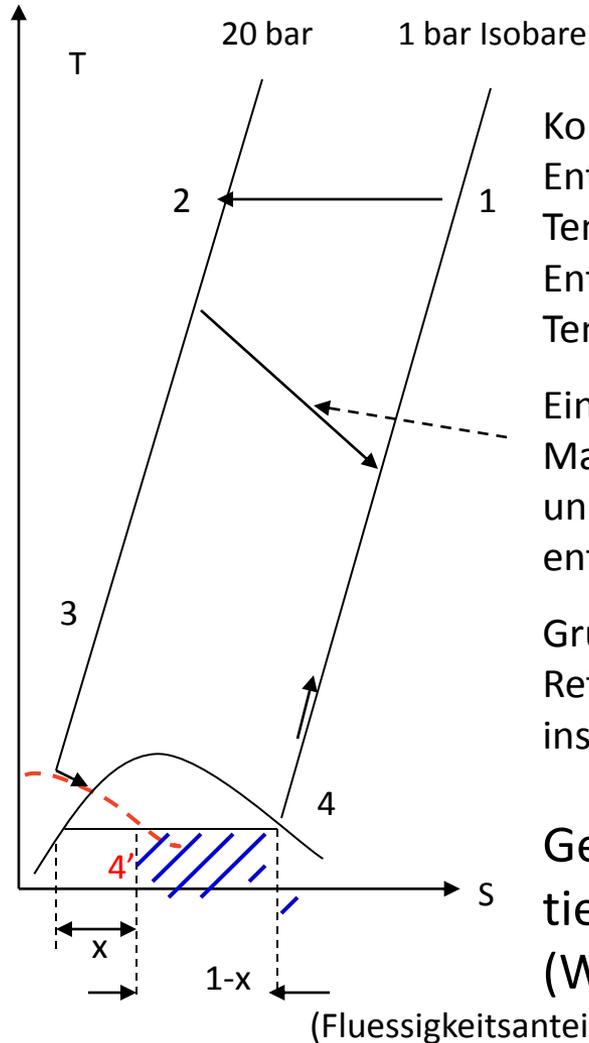
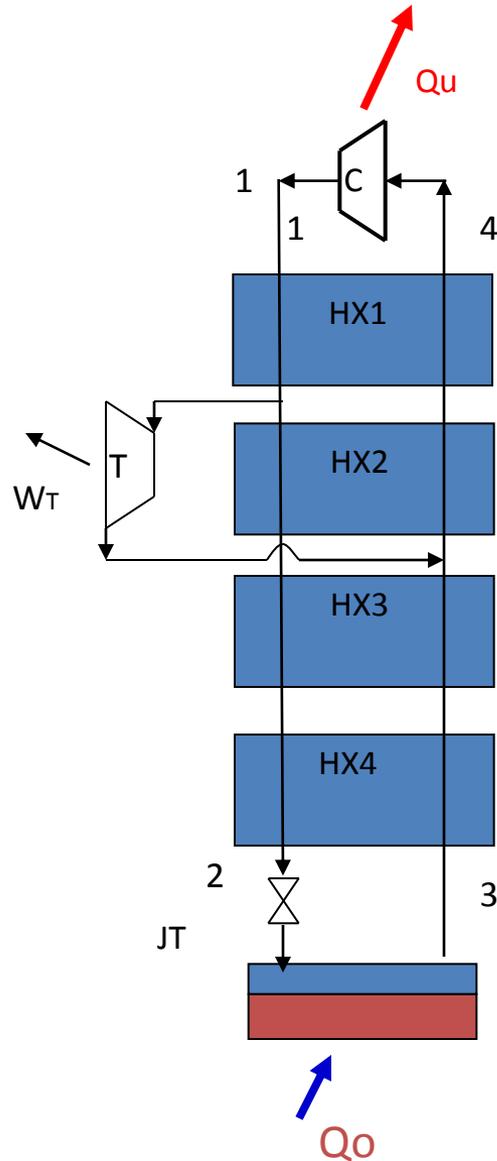


# Modifizierter Kreisprozess

Eine arbeitsleistende Expansionsmaschine erlaubt hoehere Verfluessigungsleistungen und Verbesserung des Wirkungsgrades



# Verfahren: Claude Kreisprozess



Kombination arbeitseffiziente Entspannungsturbine bei höheren Temperaturen mit J.-T.-Entspannung bei niedrigen Temperaturen. Optimal.

Ein Teilstrom des gesamten Massenstroms wird abgezweigt und mit Hilfe der Turbine entspannt.

Grundlage moderner Refrigeratoren und Verflüssiger insbesondere Helium Anlagen

Geeignetes Verfahren fuer tiefsiedende Fluide (Wasserstoff, Helium)

(Fluessigkeitsanteil)

# Claude Kreisprozess (Helium Verflüssigung)

Temperatur-Entropie Diagramm  
von Helium (logarithmische Darstellung)

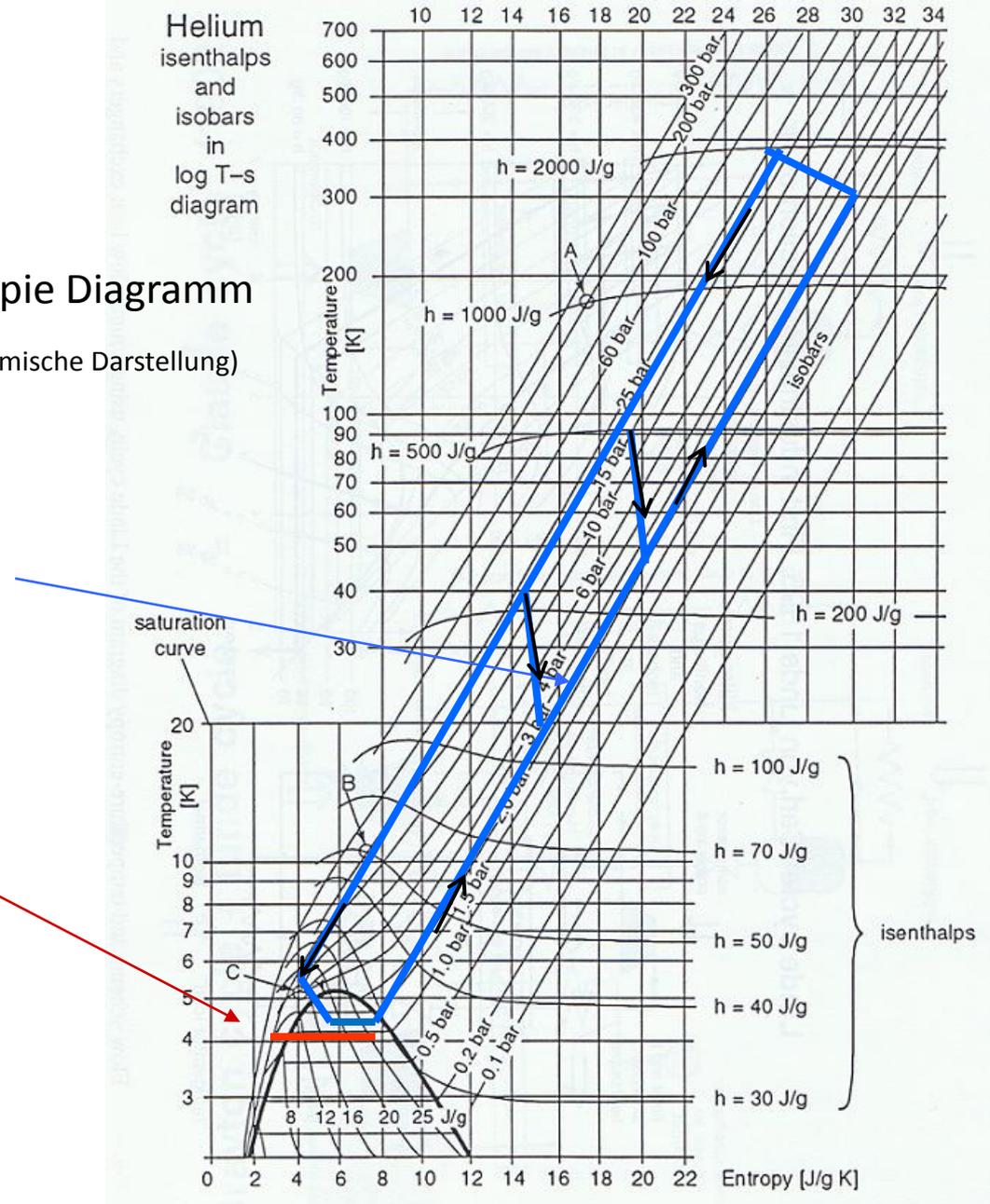
Sehr grosse **Enthalpiedifferenz** des Gases zwischen 300 K und 4.2 K mit **1540 J/g**.

Die rekuperativen Waermetauscher muessen effizient sein mit kleinster Graedigkeit !

Die **Verdampfungsenthalpie** ist sehr klein mit nur **21 J/g**.  
(Zum Vergleich Wasser 2200 J/g)

Das bringt grosse Probleme mit sich

1. Helium zu verfluessigen und
2. Helium vor vorschnellem Verdampfen zu bewahren



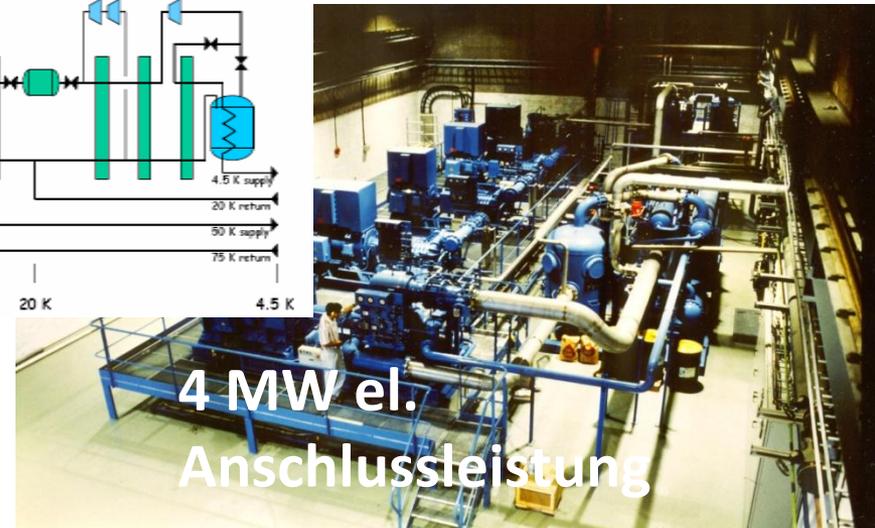
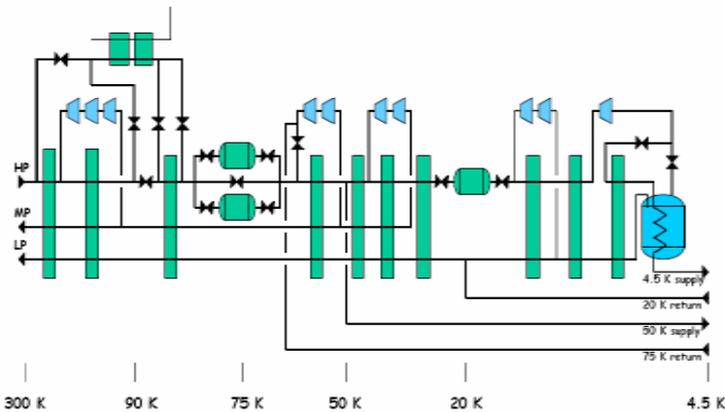
# Wirkungsgrad der 8 CERN 18 kW Refrigeratoren

Gesamt-Carnot-Wirkungsgrad = 30 % (Nicht schlecht! Vergleich Pkw Motor !)

Coldbox Wirkungsgrad = 60 %

Kompressorwirkungsgrad = 50 %

18 kW @ 4.5 K  
refrigerator cold box



230 W/W

COP=0,0043

70 W/W theoretisch

# Ende erster Teil

Mit Thomas geht es weiter...