

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

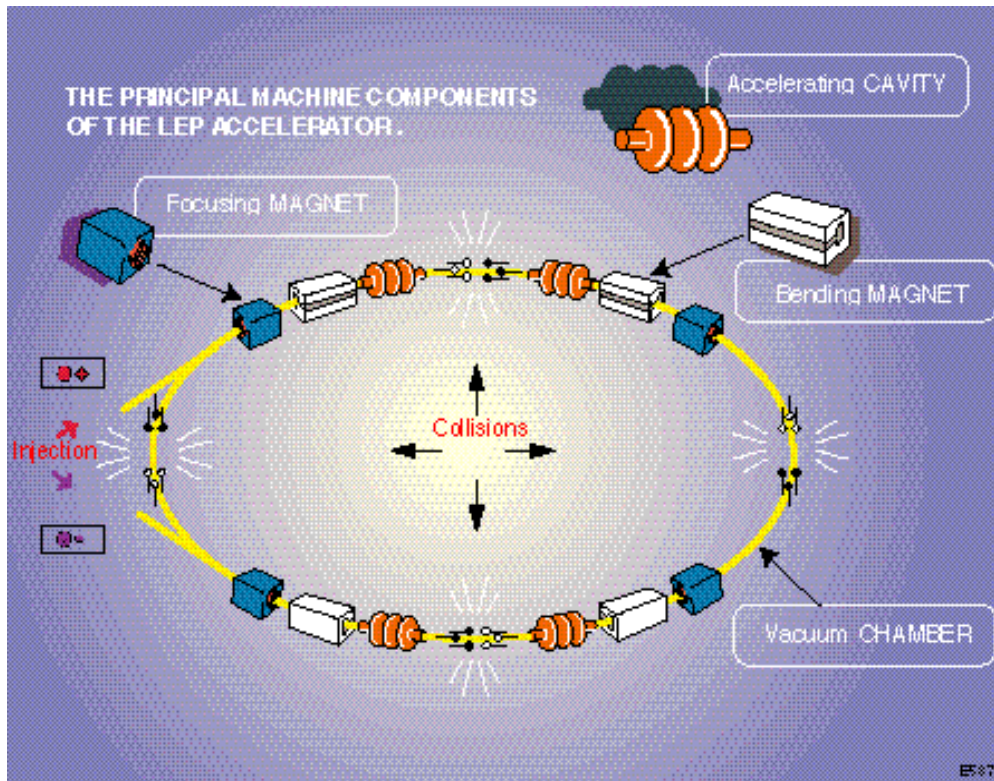
Vortrag 2. Teil (20 min), T. Eisel

- 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).

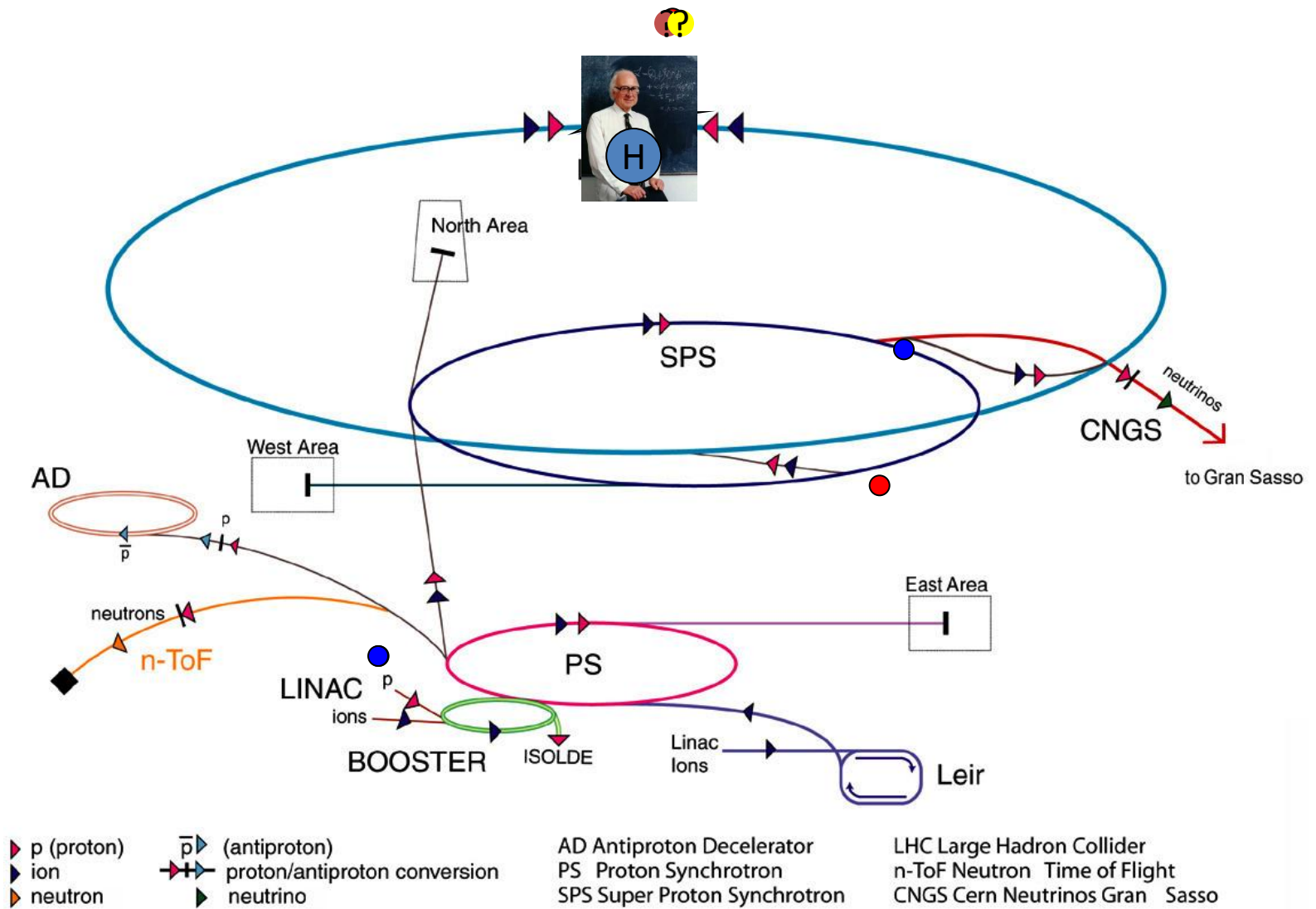
=Konzentration der Energie + anschließende Kollision



feststehendes Target

Gegenläufige Teilchenstrahlen



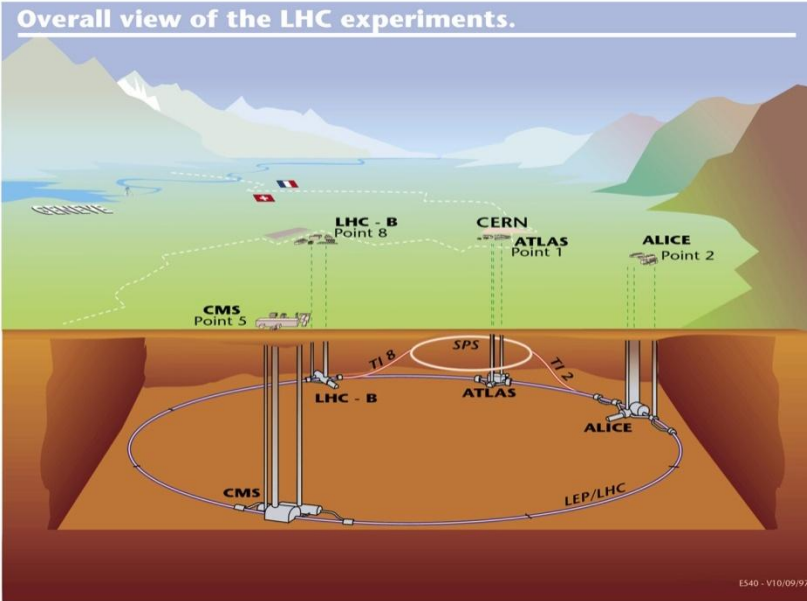


Findet man das Higgs Boson ?

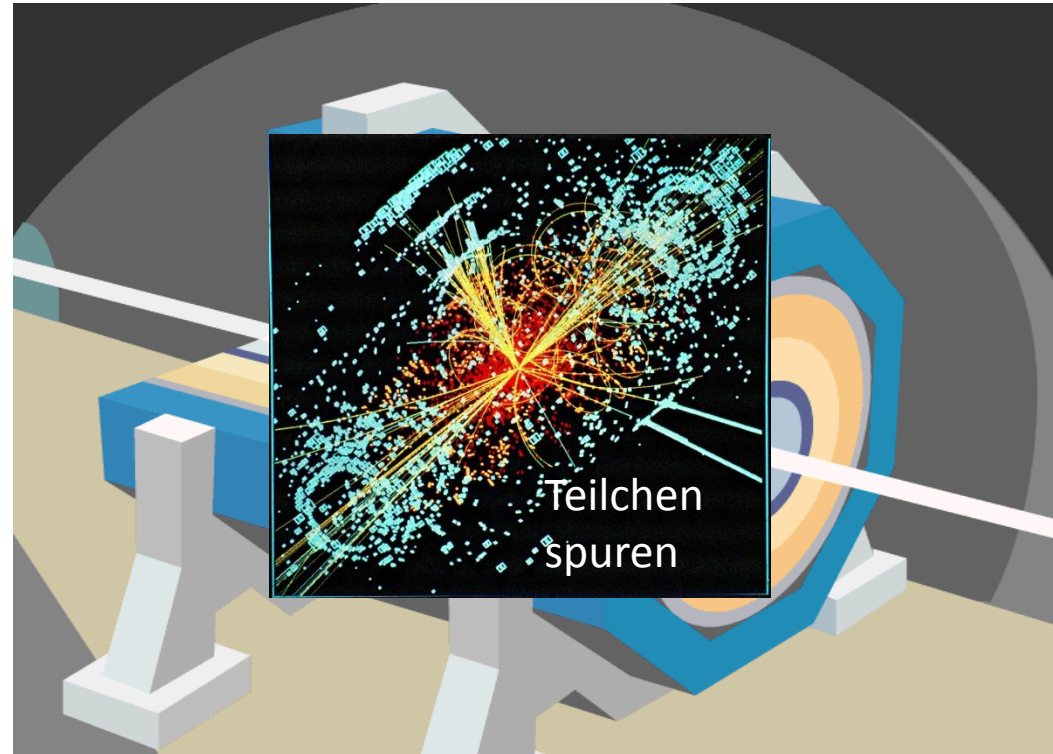
CERN's Teilchenbeschleunigerkomplex

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**

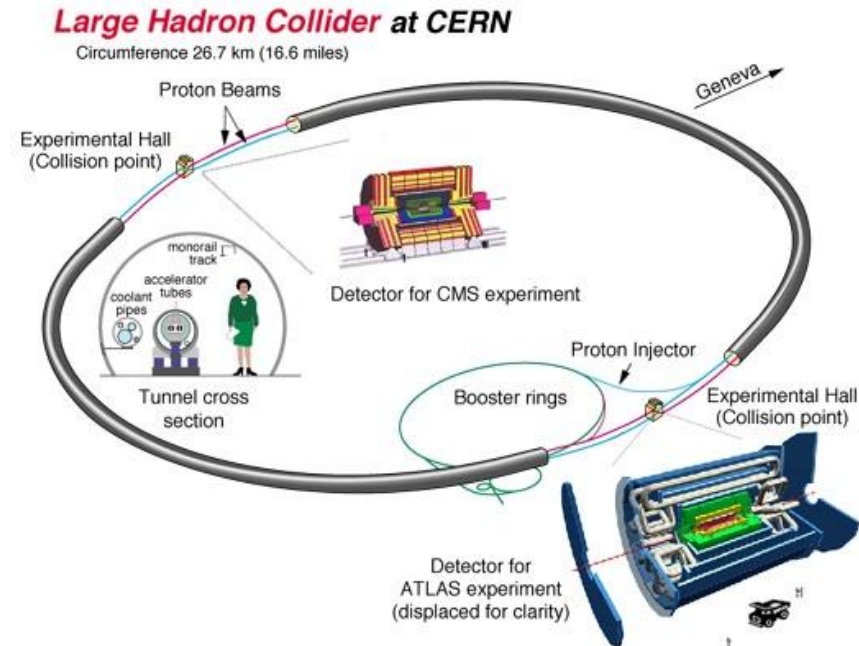
LHC Detektoren:

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

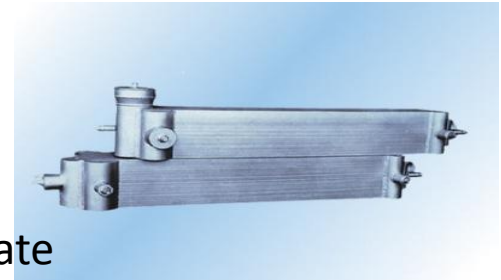
- auf 24 km Länge sind ueber 1800 supraleitende Hochfeldmagnete installiert
- Dipol-Magnetfeld bis 7 Tesla
- Magnete sind auf 1.9 Kelvin gekühlt...
- ... mit einer **Million Liter flüssigem Helium**
- ...erzeugt wird die Kälte...



Blick in den Tunnel: Beschleunigermagnete waehrend der Installationsphase



Neuartige Helium Refrigeratoren fuer den LHC

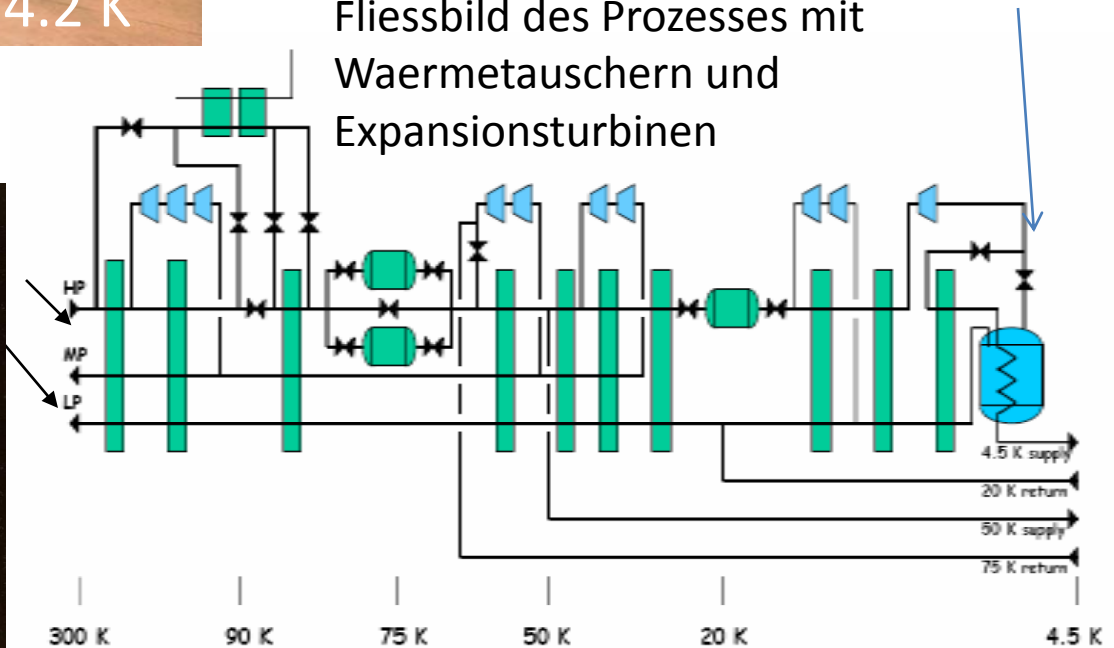


Aluminum fin plate
Waermetauscher

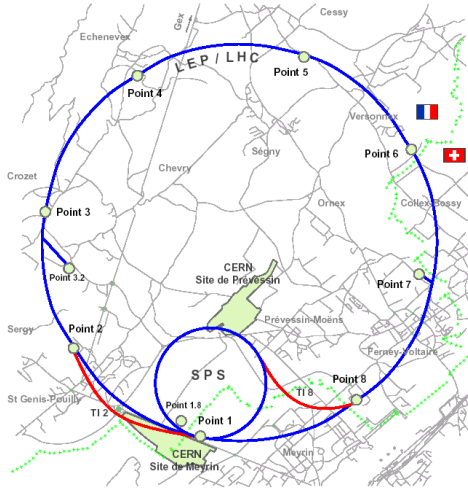
Kaltes Ende mit
Phasenseparator und
Fluessigkeitsproduktion



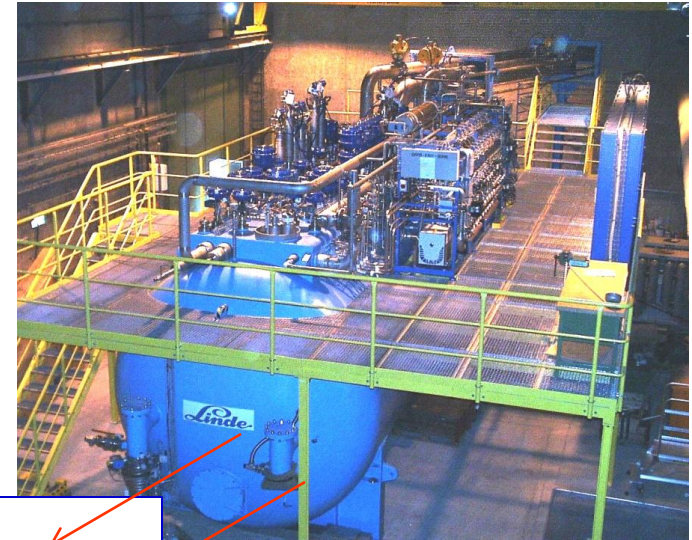
Flie ssbild des Prozesses mit
Waermetauschern und
Expansionsturbinen



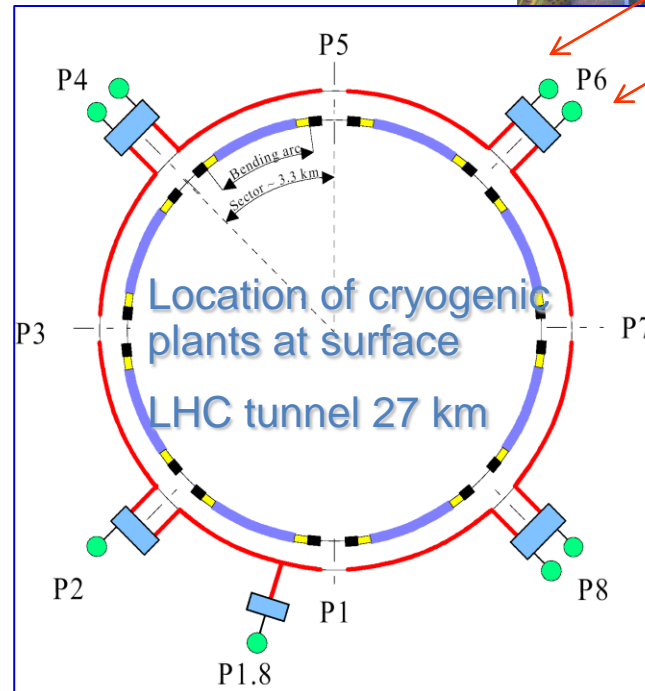
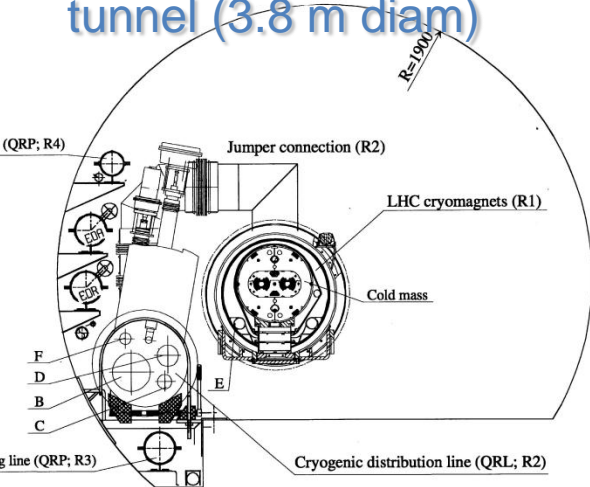
Crogenics for the LHC collider magnets



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

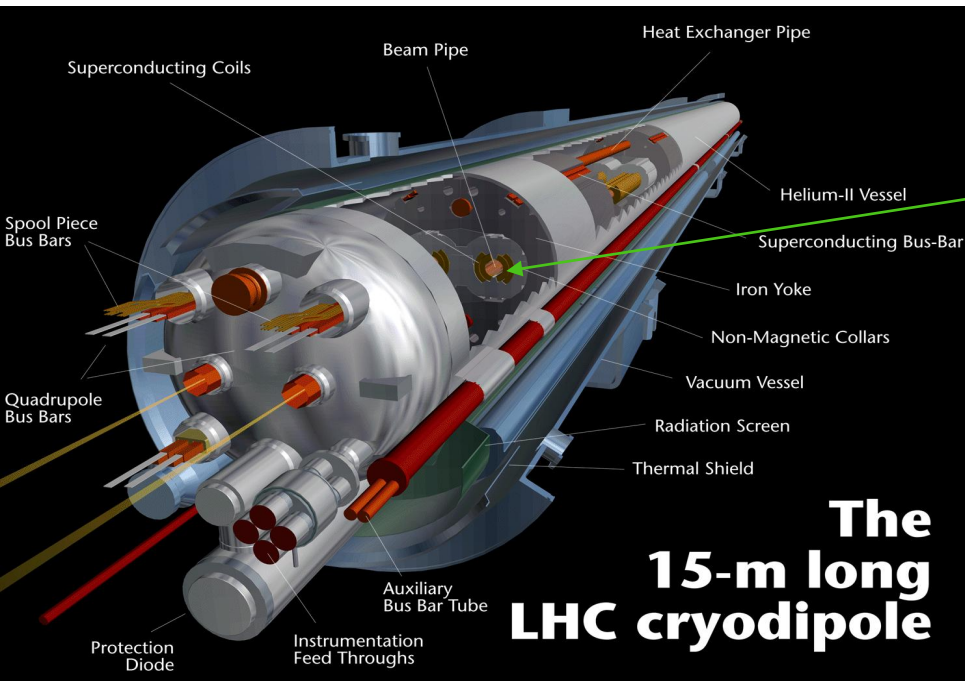


Cross section of LHC tunnel (3.8 m diam)



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.

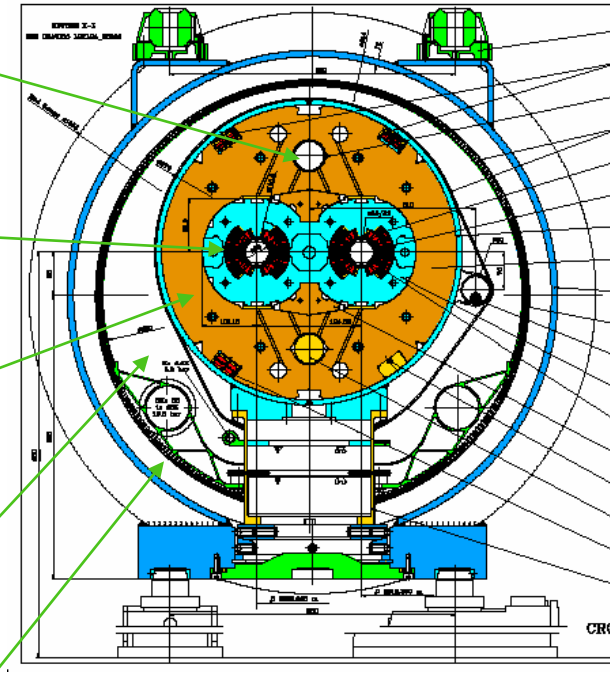
Heat exchanger with boiling helium at 1.9K

Bath cooled Superconducting coils at 1.9 K

1.9 K bath to cool cold mass

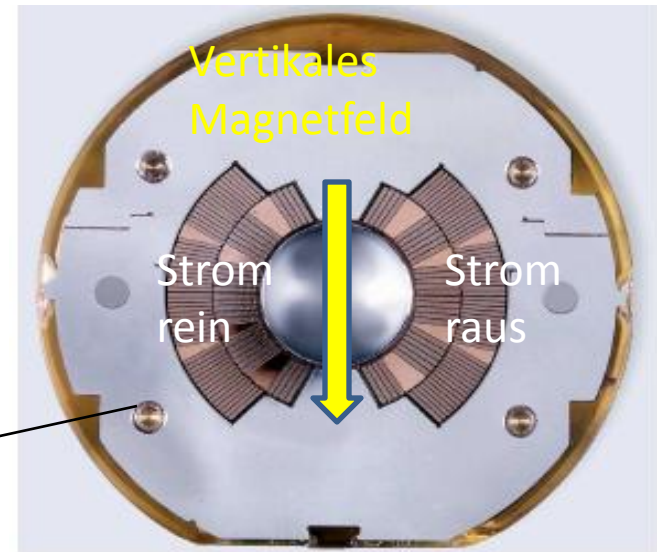
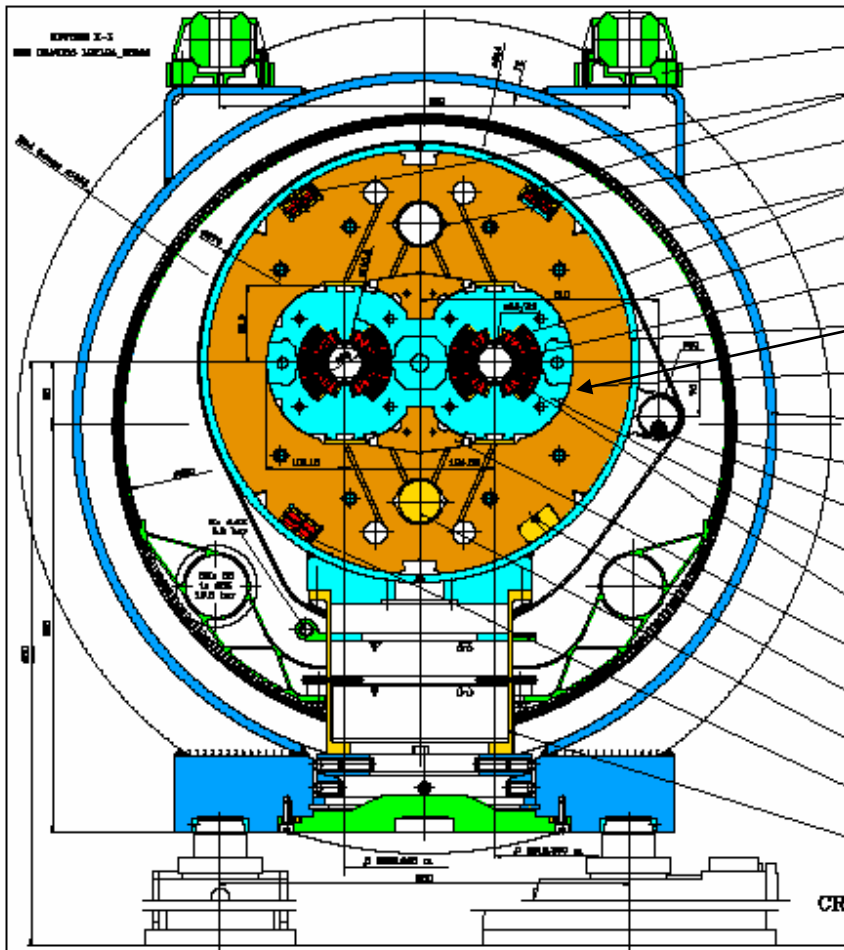
insulation vacuum,

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



Cross section of a dipole magnet in its cryostat.

Dipolmagnete

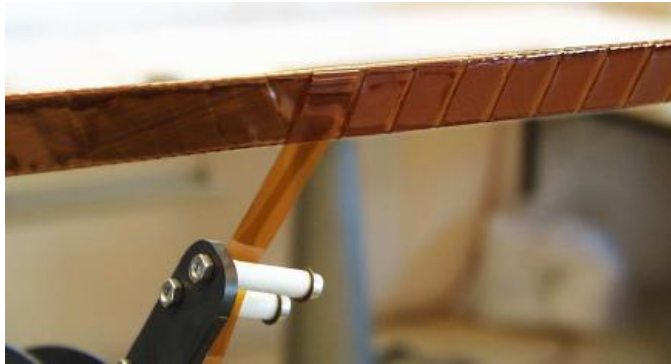


Die gewickelten Spule von bis zu 15 m Laenge werden von Klammern mechanisch zusammengehalten.

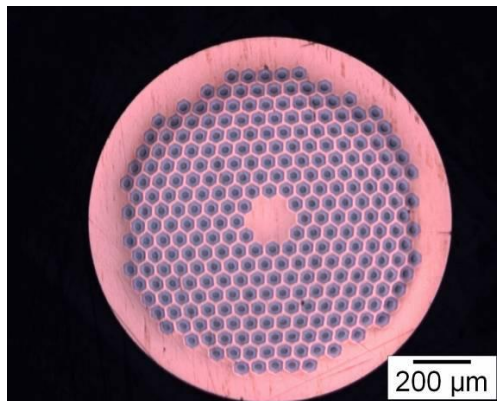
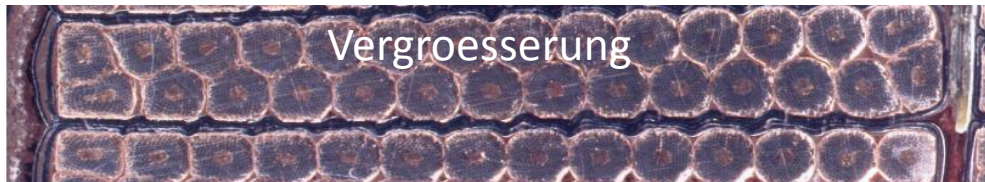
Eingebaut im Magnetbehaelter und Kryostat mit Kuehleinrichtungen Abkuehlung der Spule auf 1.9 K mit suprafluidem fluessigen Helium.

Strom bis 14 kA fliesst OHNE elektrischen Widerstand

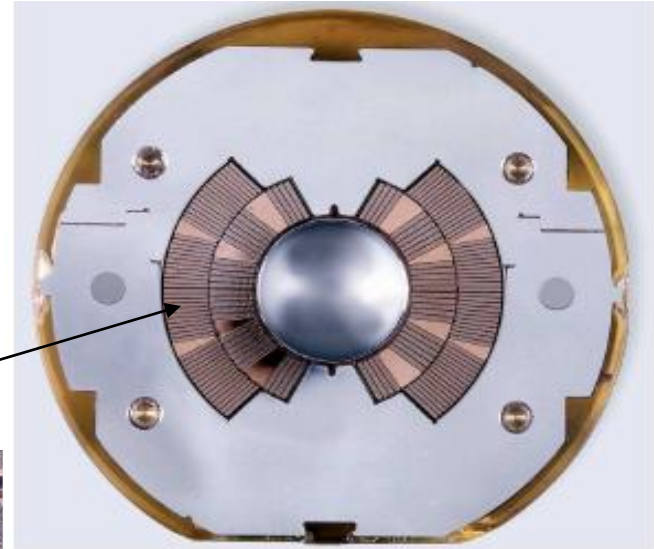
Einfuehrung in die Supraleitung



Isolierung des supraleitenden Kabels



Einzelner Draht mit
supraleitenden
Filamenten in
Kupfermatrix

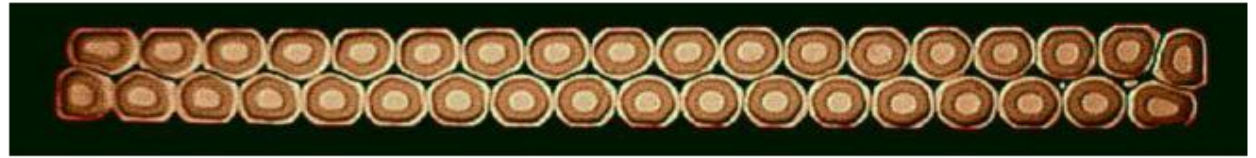


Im Querschnittsbild eines
Dipolmagneten ist die "Schichtung"
der
Kabelwicklung zu erkennen

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

Supraleiter-Kabel

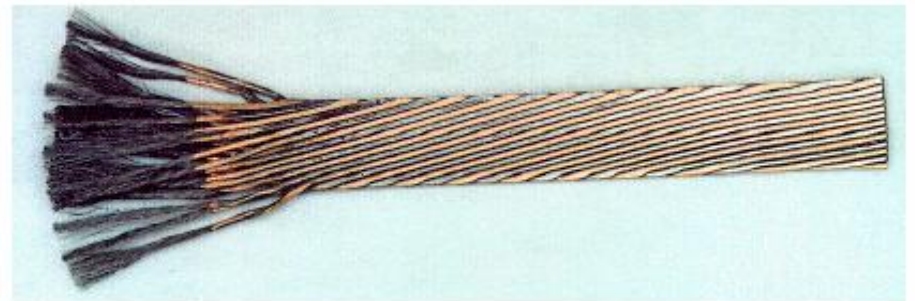
Weiteres zum Thema:
Vortrag Thomas
Fuehrung SM 18



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



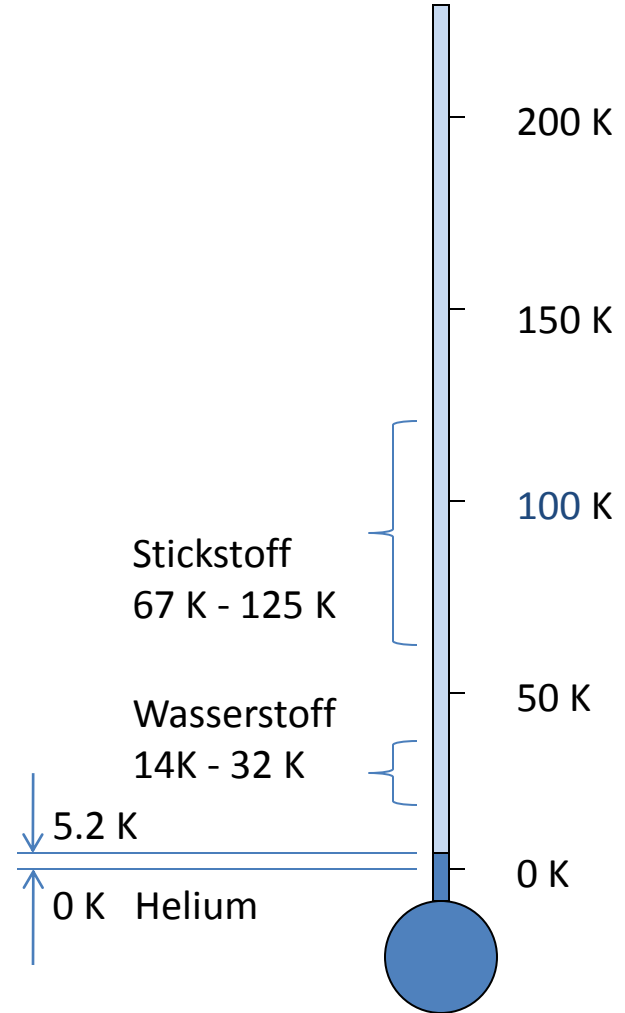
Trotz Isolierung muss ein Fluid in das Innere eines Kabels und in die feinsten eindringen koennen, um effizient zu kuehlen.

DAS KANN NUR SUPRAFLUIDES HELIUM

1. Frage: warum Helium?

Antworten:

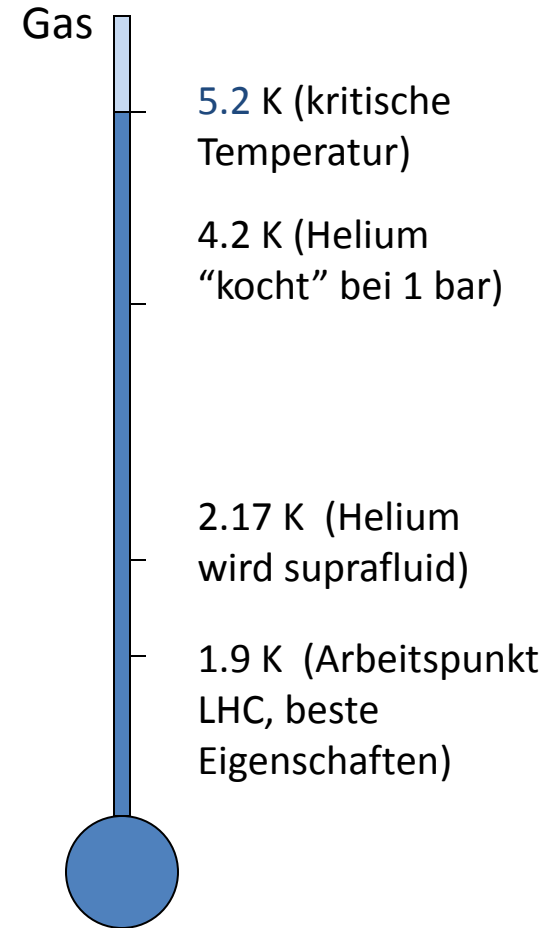
1. Weil alle anderen Stoffe einschliesslich aller bei Umgebungstemperatur gasfoermigen und bei niedrigen Temperaturen verfluessigter Gase letztendlich zu Feststoffen werden (EIS)
2. Weil Supraleiter erst unter einer bestimmten Temperatur, der Sprungtemperatur supraleitend werden. Am CERN verwendete Legierung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



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

Antwort:

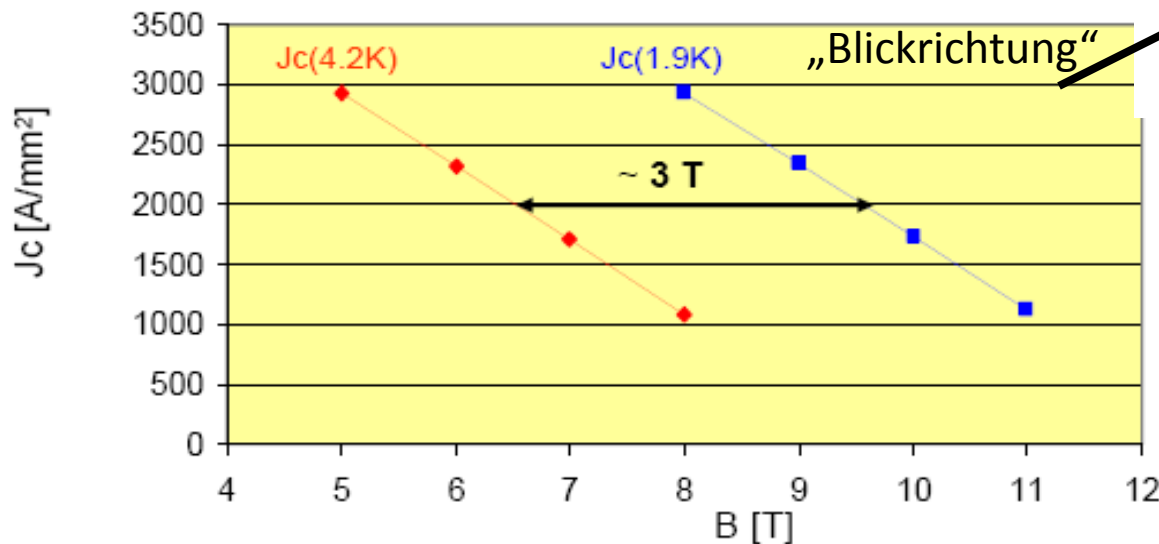
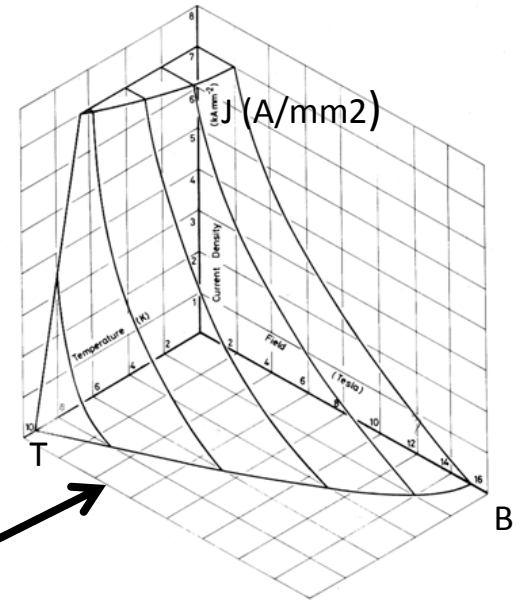
1. Weil Helium bei 1.9 K hervorragendste Transporteigenschaften hat: Eine Million mal höhere Wärmeleitfähigkeit und...Viskosität Null.
2. Weil Supraleiter bei tieferen Temperaturen höhere Ströme und höhere Magnetfelder erreichen



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



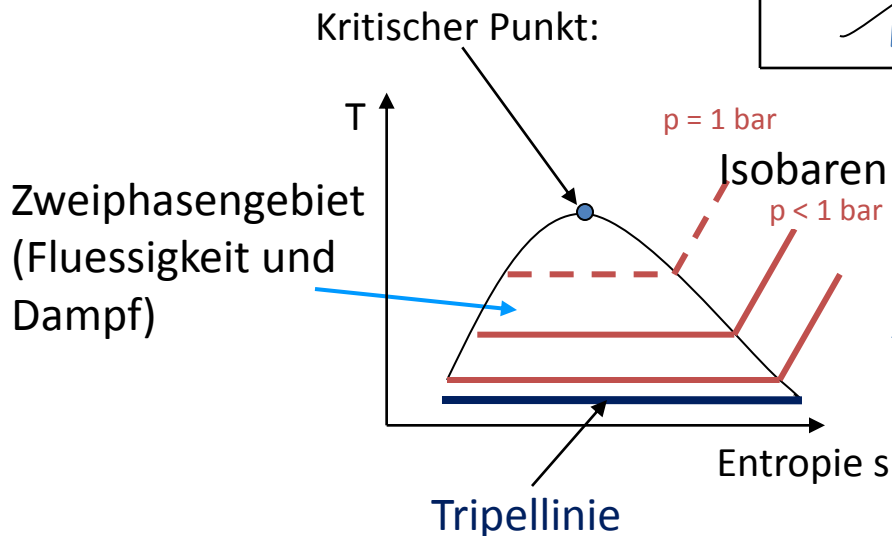
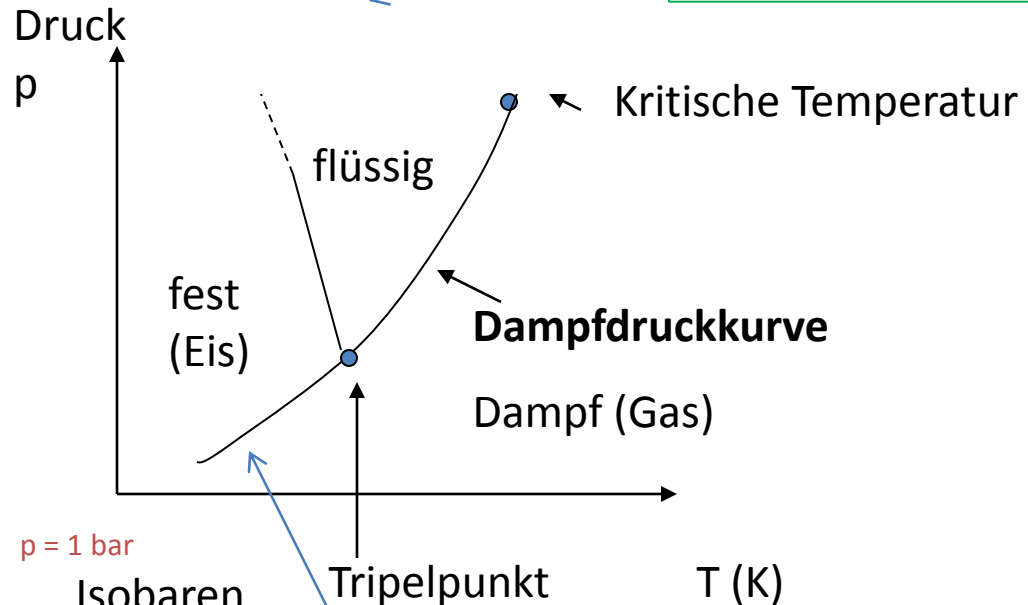
supraleitende/normaleitende Phase verschiebt sich mit niedrigeren Temperaturen zu hoeheren Stromdichten und Magnetfeldern

Phasendiagramm eines (normalen) Fluids

Phasendiagramm eines
"normalen" Fluids

Das nennt man
Phasendiagramm

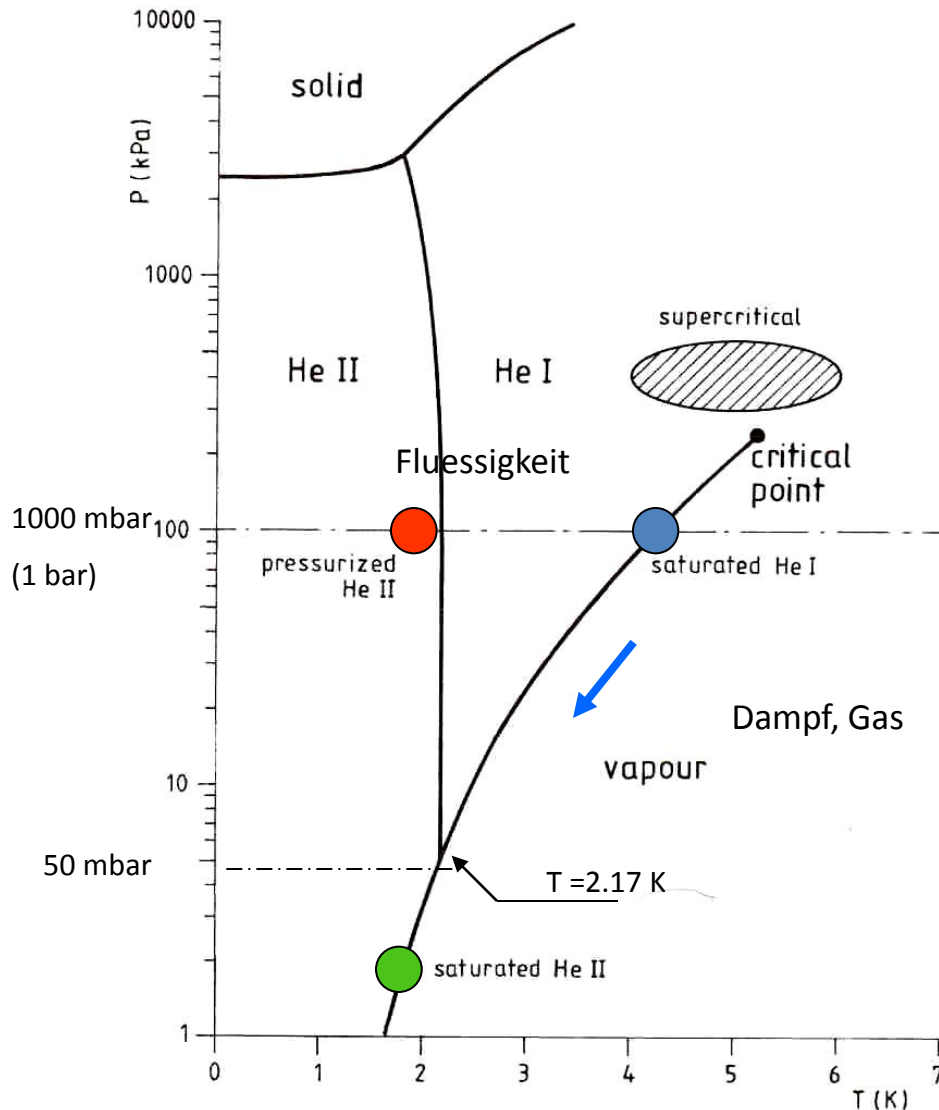
Reduzierung des Drucks
=> Erniedrigung der
Sättigungstemperatur



Sublimationslinie (Eis/Dampf)

Das nennt man Temperatur-
Entropie Diagramm

Phasendiagramm von ^4He



Die Sättigungstemperatur bei 50 mbar ist 2.17 K.

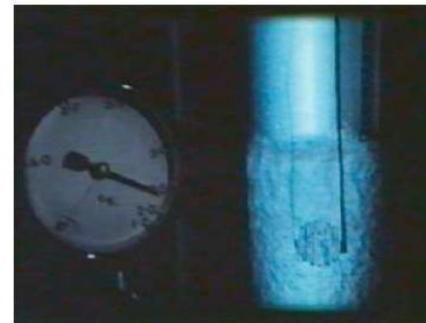
Phasenübergang, kein Tripelpunkt: das Helium bleibt flüssig.

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.

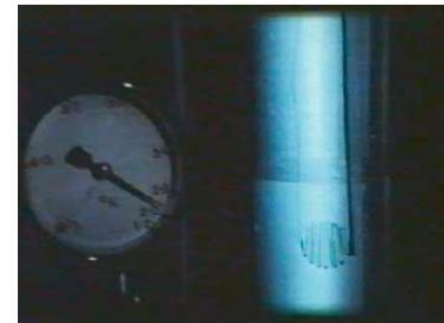
Quantenfluid.

normales Helium = He I



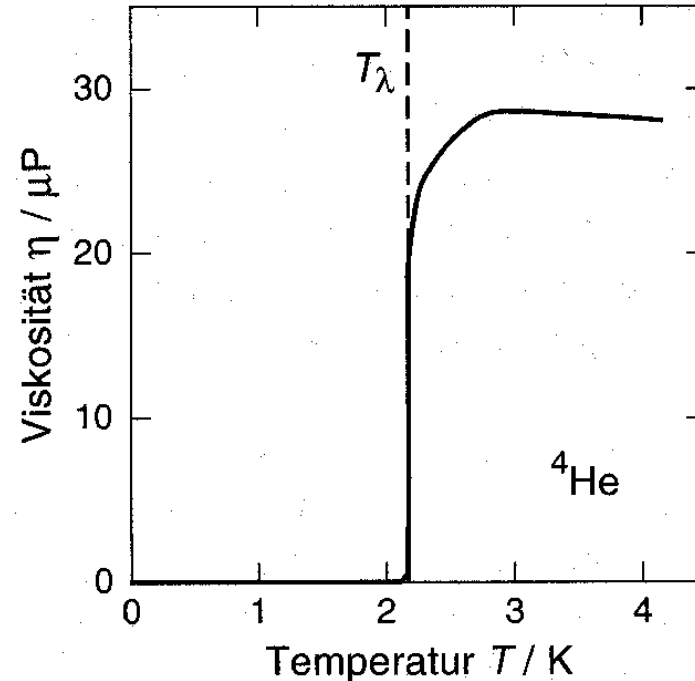
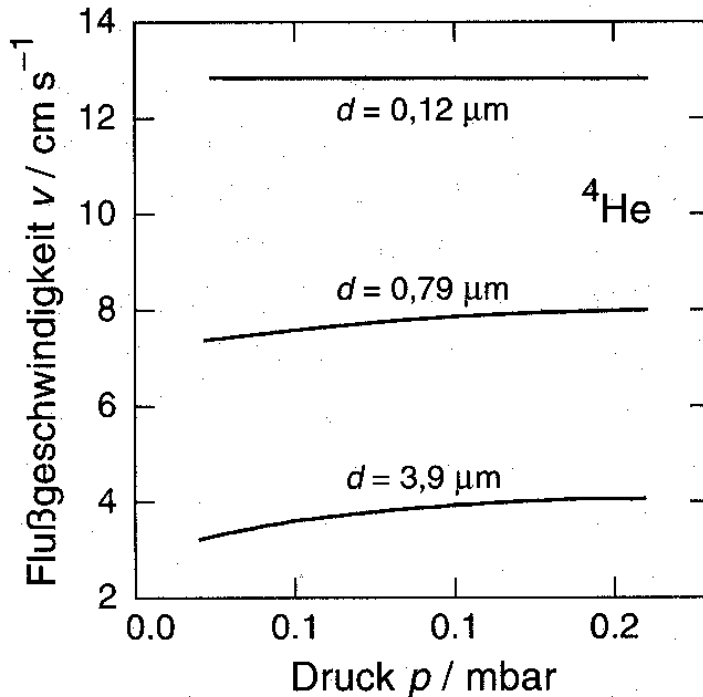
He I ($T=2,4\text{ K}$)

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.

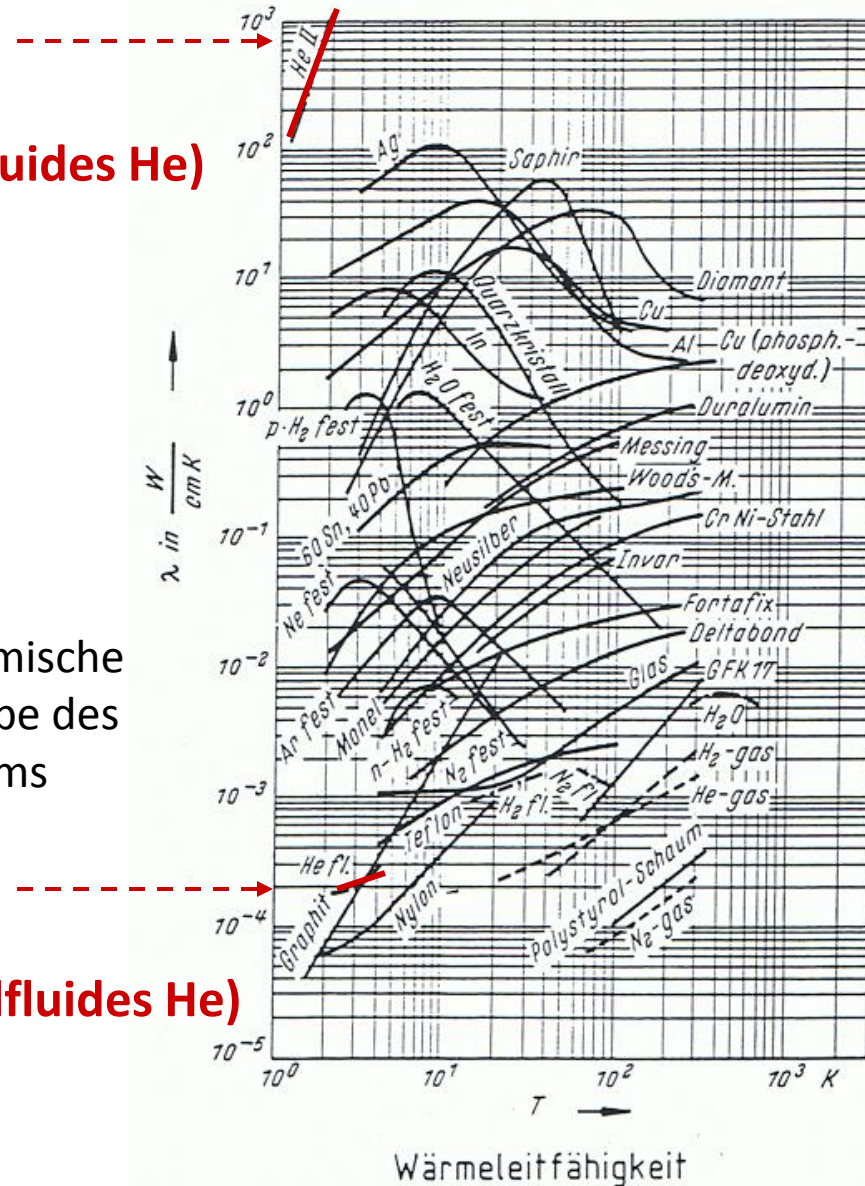
Fluid dringt hervorragend in unsere supraleitenden Spulen ein!

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.*



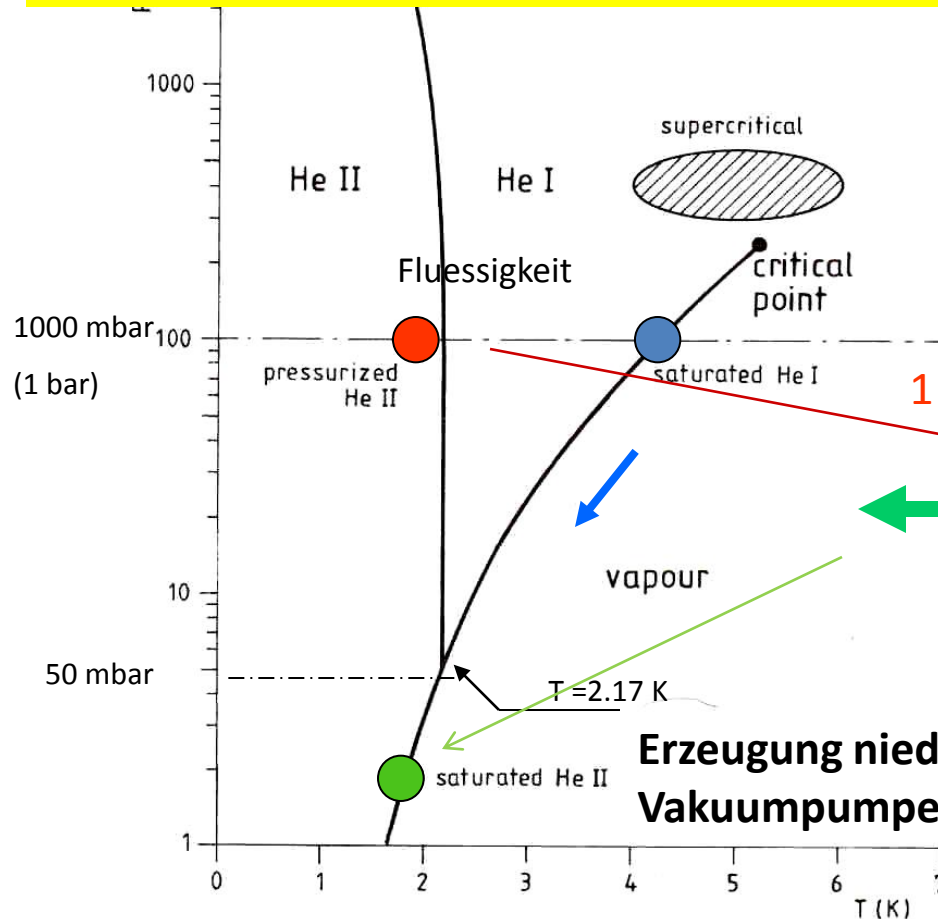
**He II
(suprafluides He)**

**He I
(normalfluides He)**

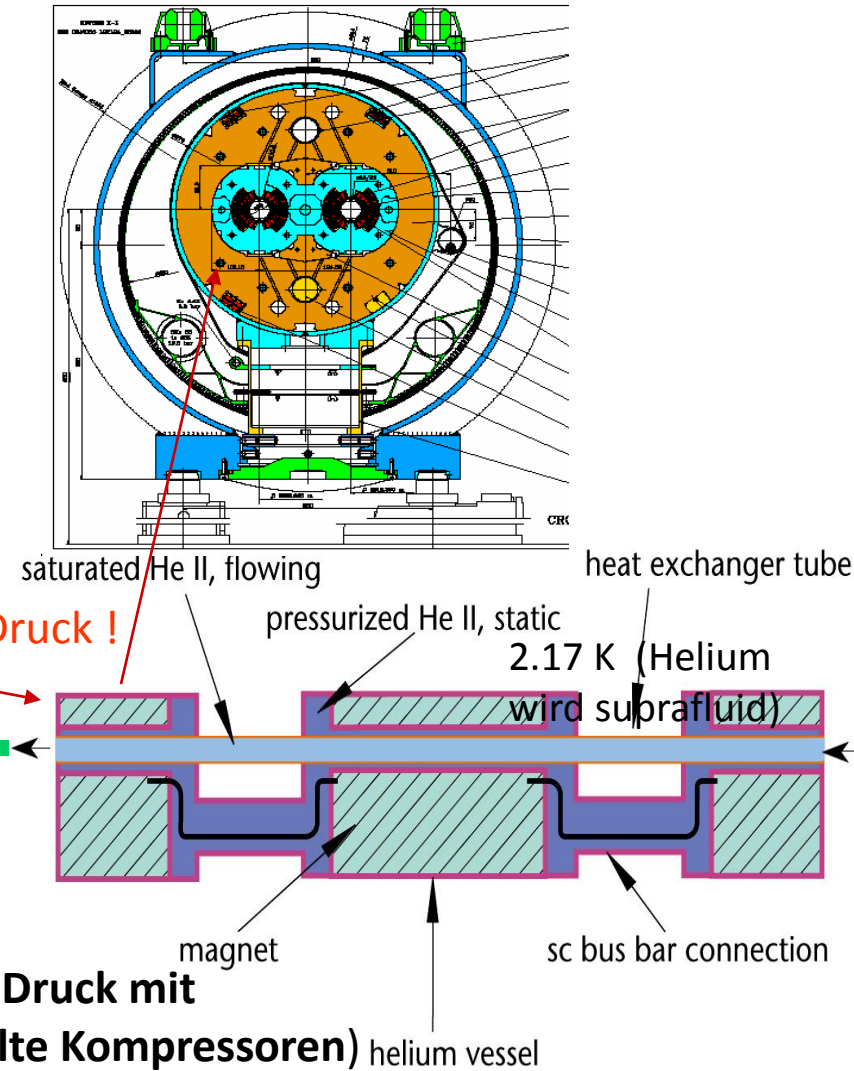
LHC Magnete bei 1.9 K suprafluidem Helium

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)

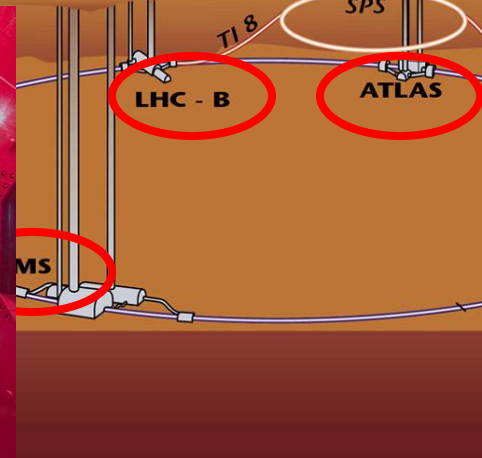
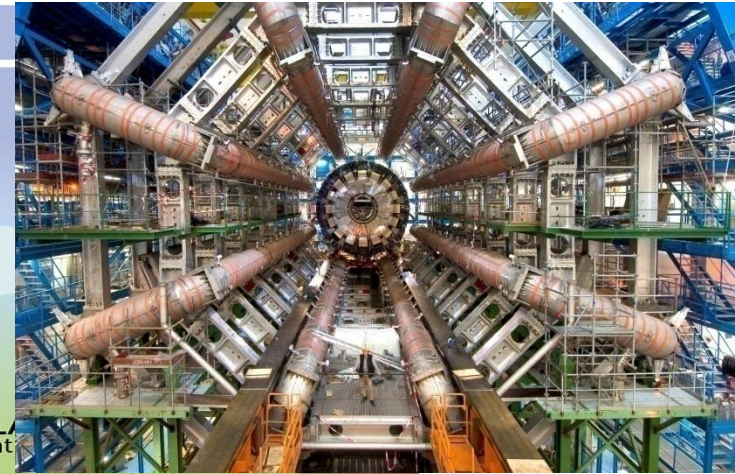
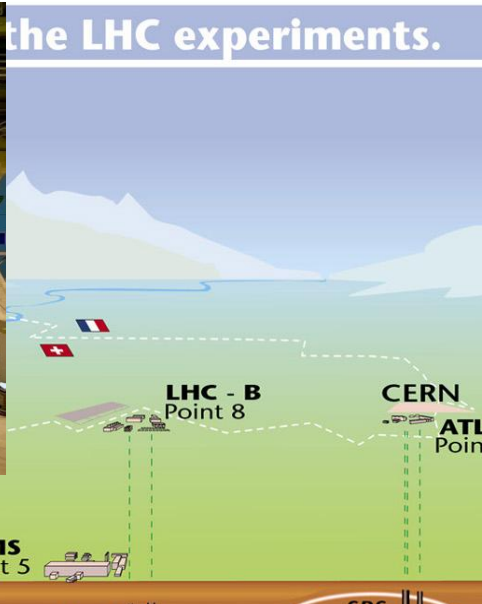
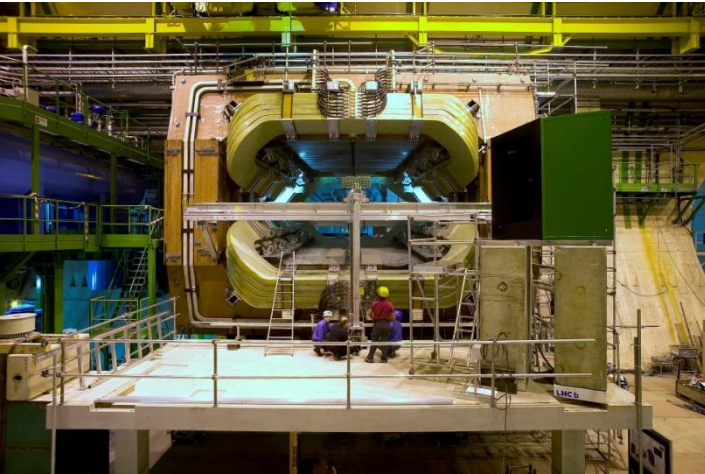


Erzeugung niedriger Druck mit Vakuumpumpen (kalte Kompressoren)

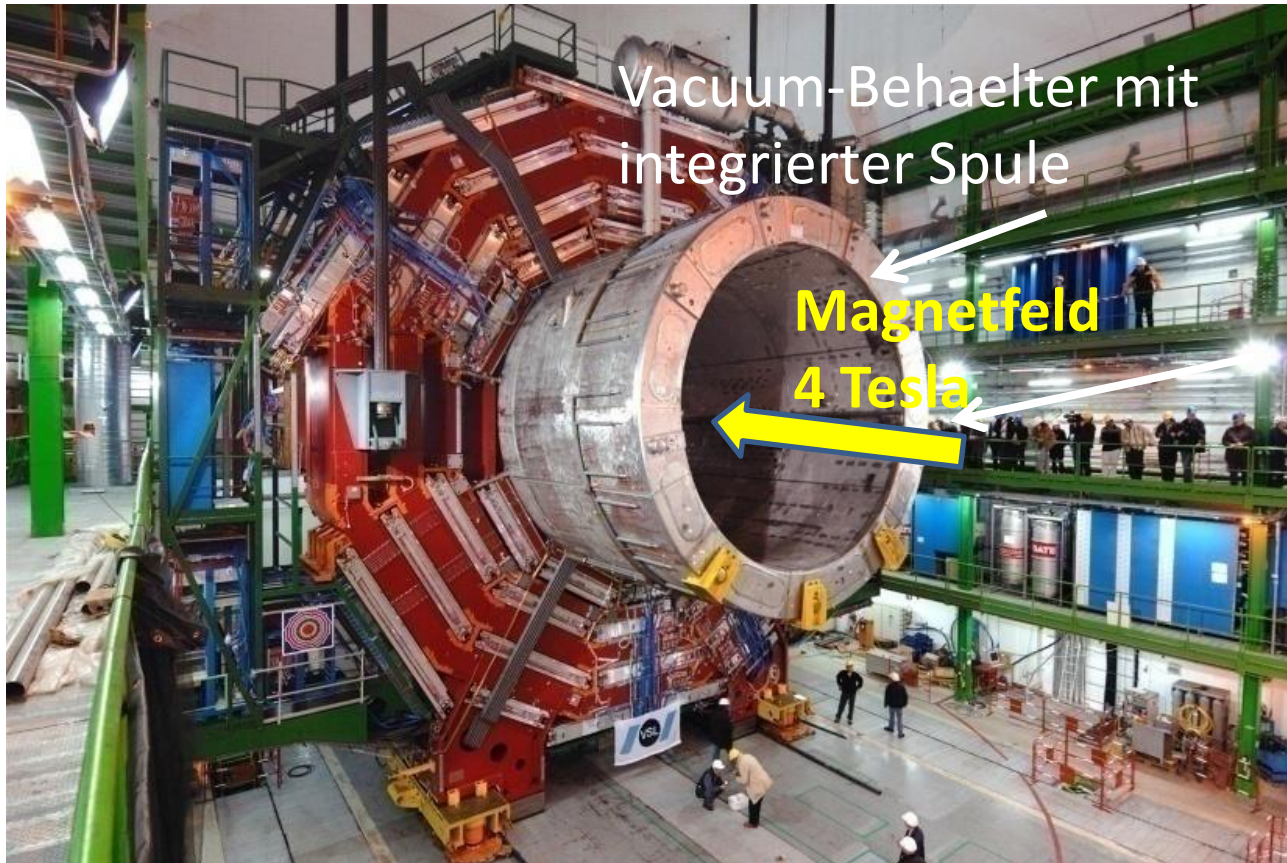


Die vier grossen LHC Detektor Experimente

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



Supraleitende CMS Spule



Solenoid

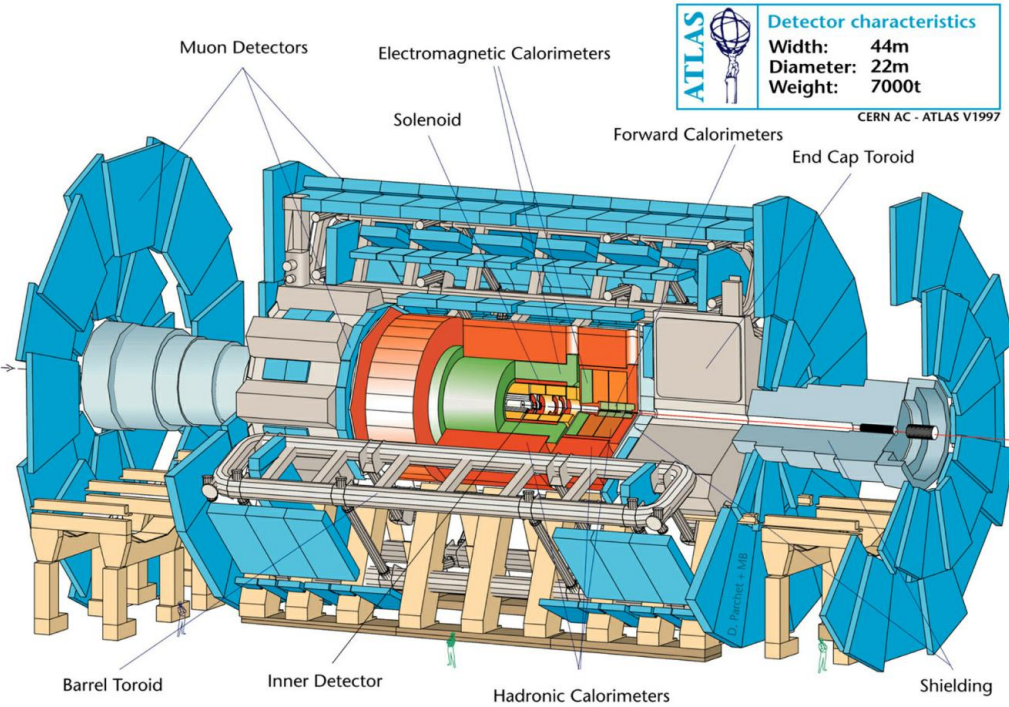
6 m Durchmesser
12 m Laenge

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

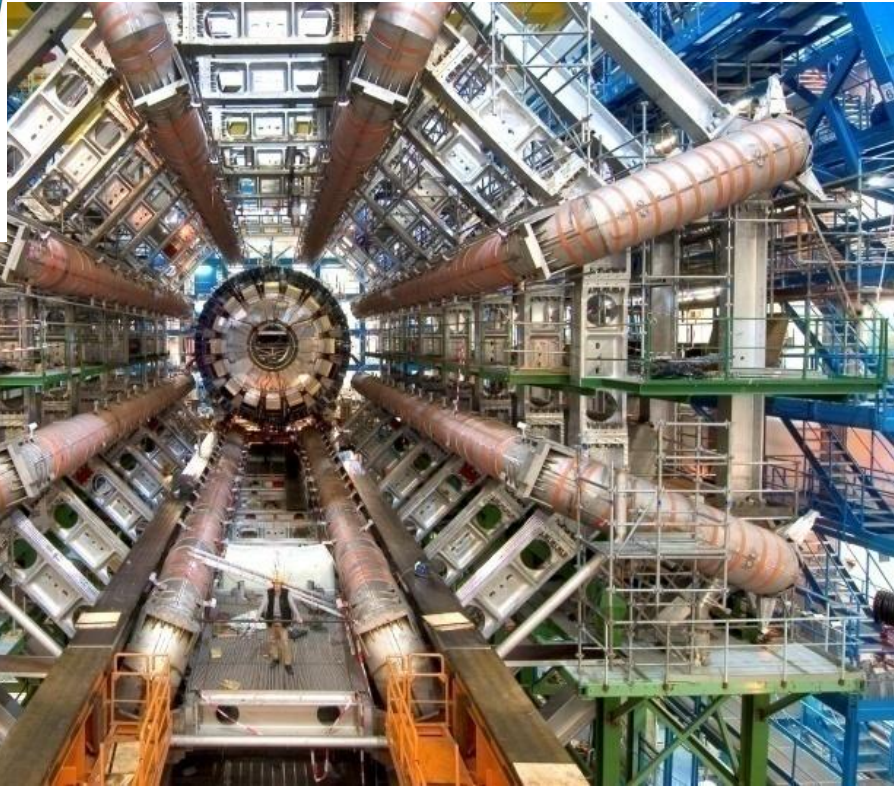


Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997

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

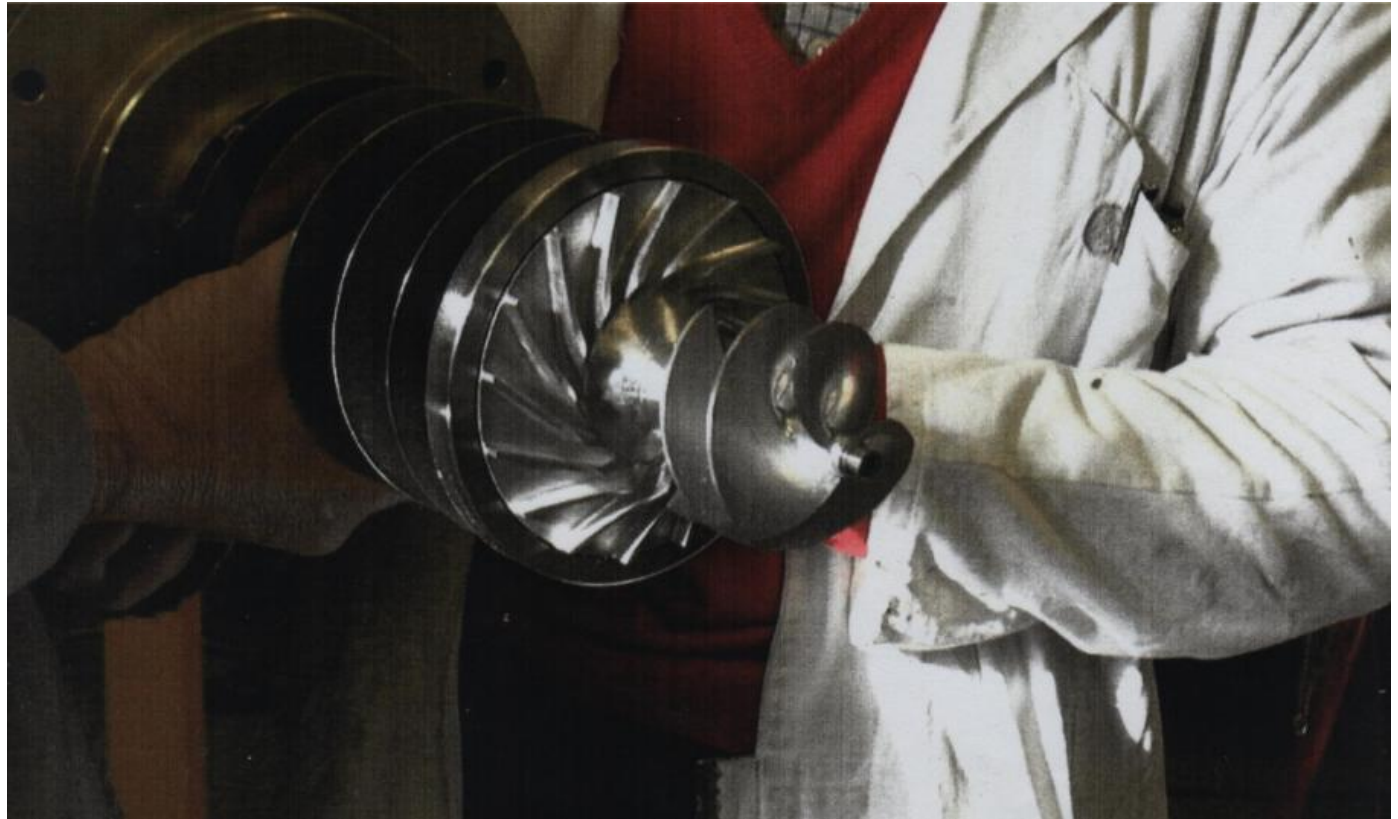
- 1 Barrel Kryostaten
- 2 End Cap Kryostaten
- < 100 m3 fluessiges Argon

Fluessig Stickstoff Kuehlung (Refrigerator)



ATLAS Supraleitende Magnete und Kryotechnik

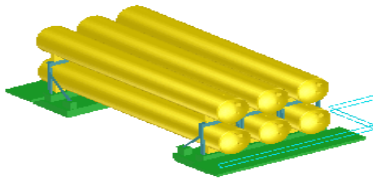
Kuehlprinzip der Magneten: Fluessiges Helium bei 4.2 K wird in Kuehlschlangen verdampft, das mit **10 l/s** Helium Umwaelzpumpen gefoerdert wird. (10 l/s ... 1 Eimer/sec)



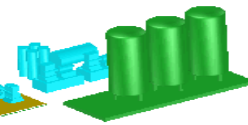
ATLAS 3 D

Helium storage tanks for
30.000 Nm³ of Helium
gas

Surface Area



2 x 50 m³ Liquid Nitrogen
Dewars at surface



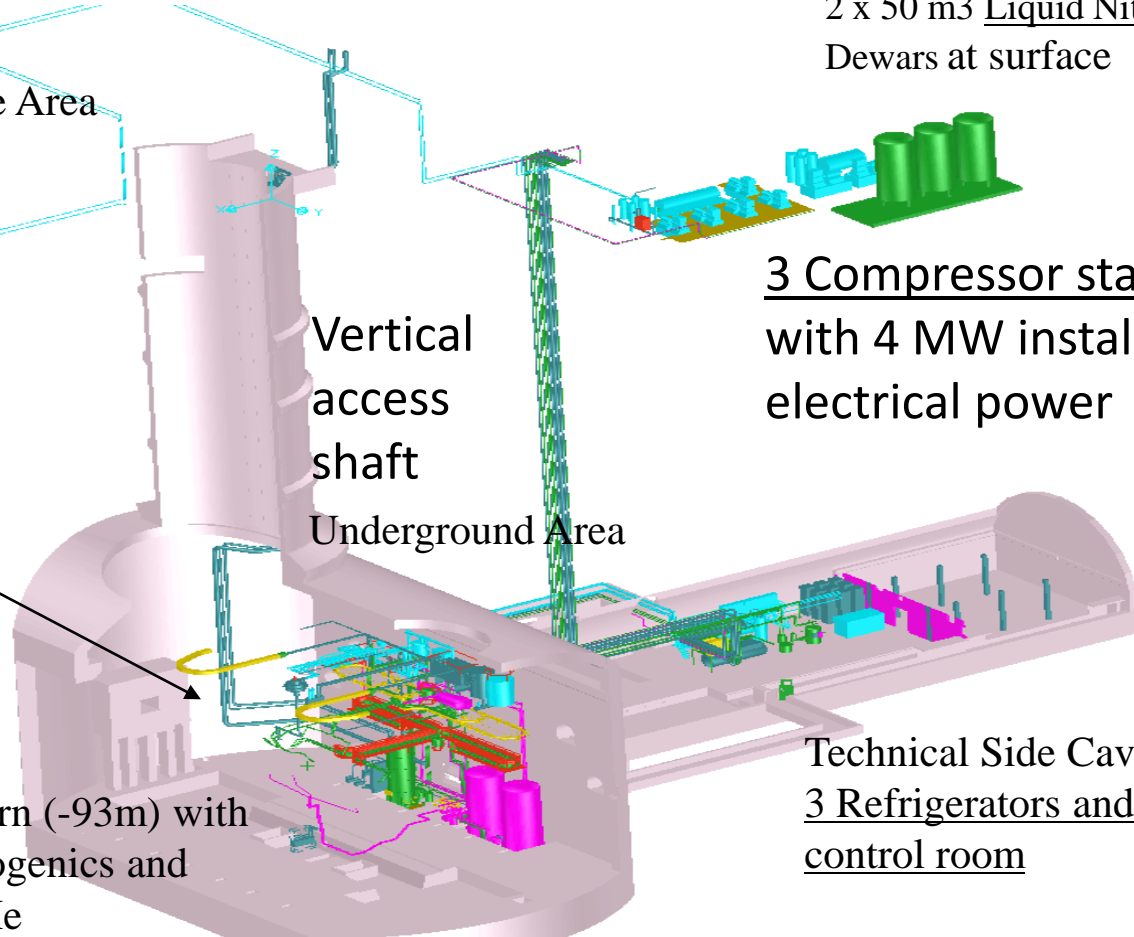
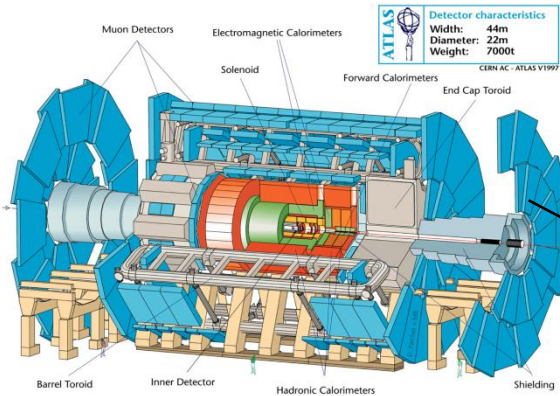
3 Compressor stations
with 4 MW installed
electrical power

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 LN2
90,000 l of LAr



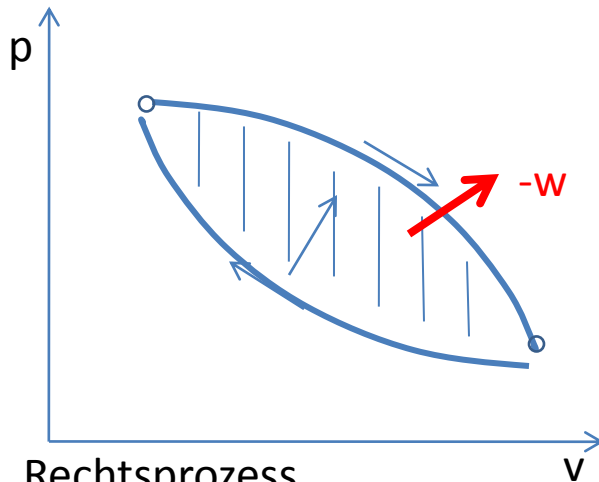
Thermodynamik: Kontinuierlich Kaelte erzeugen durch Kreisprozesse!

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

Rechtsprozess

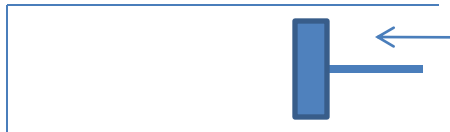
Umwandlung

Wärmeenergie \rightarrow mechanische Arbeit



Rechtsprozess

Wärmekraftmaschine (z.B. Otto-, Dieselmotor)



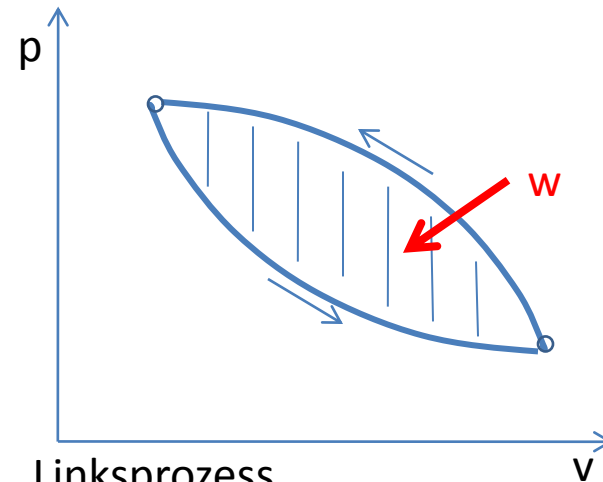
Zylinder.
Kolben

Linksprozess

Q

Umwandlung

mechanische Arbeit \rightarrow Wärmeenergie



Linksprozess

„Kraftwärmemaschine“:
Kältemaschine, Wärmepumpe

Carnot Kreisprozesse

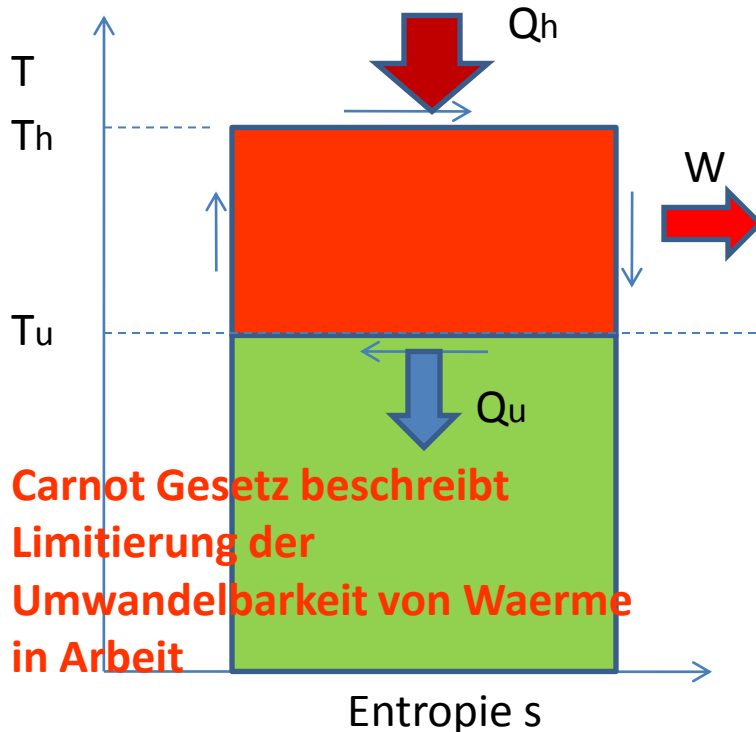
Ideal reversibler Kreisprozess zwischen zwei Isothermen und zwei Isentropen.
Vergleichsprozess. Wird nicht realisiert.

Sadi Carnot
1796-1832



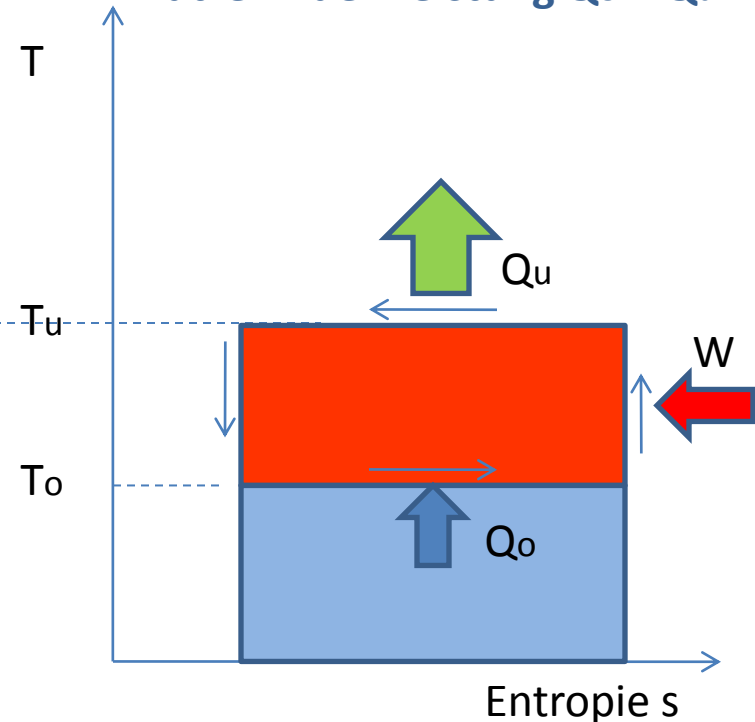
Waermekraftmaschine

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 $Q_o = Q_u - W$



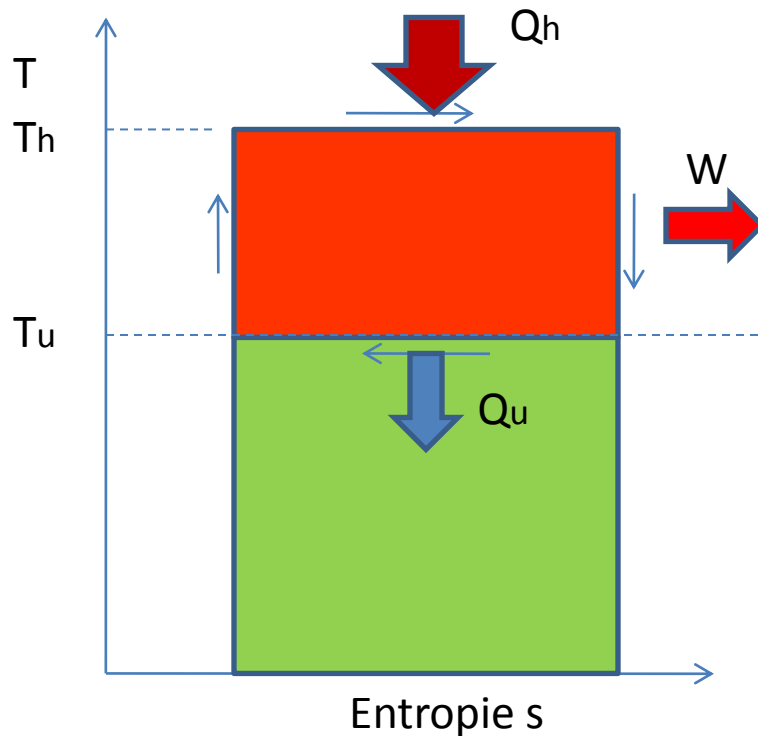
Carnot Kreisprozesse

Waermekraftmaschine (Motor)

Nutzen Arbeit $W = Q_h - Q_u$

Wirkungsgrad = Nutzen / Aufwand

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



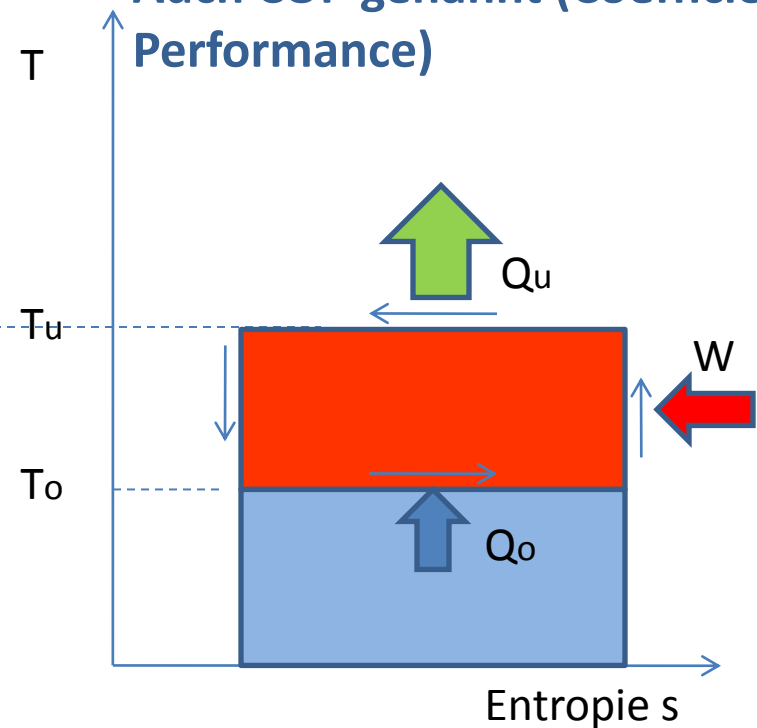
Kaeltemaschine (Kuehlschrank)

Nutzen Kuehlleistung $Q_o = Q_u - W$

Leistungszahl = Nutzen / Aufwand

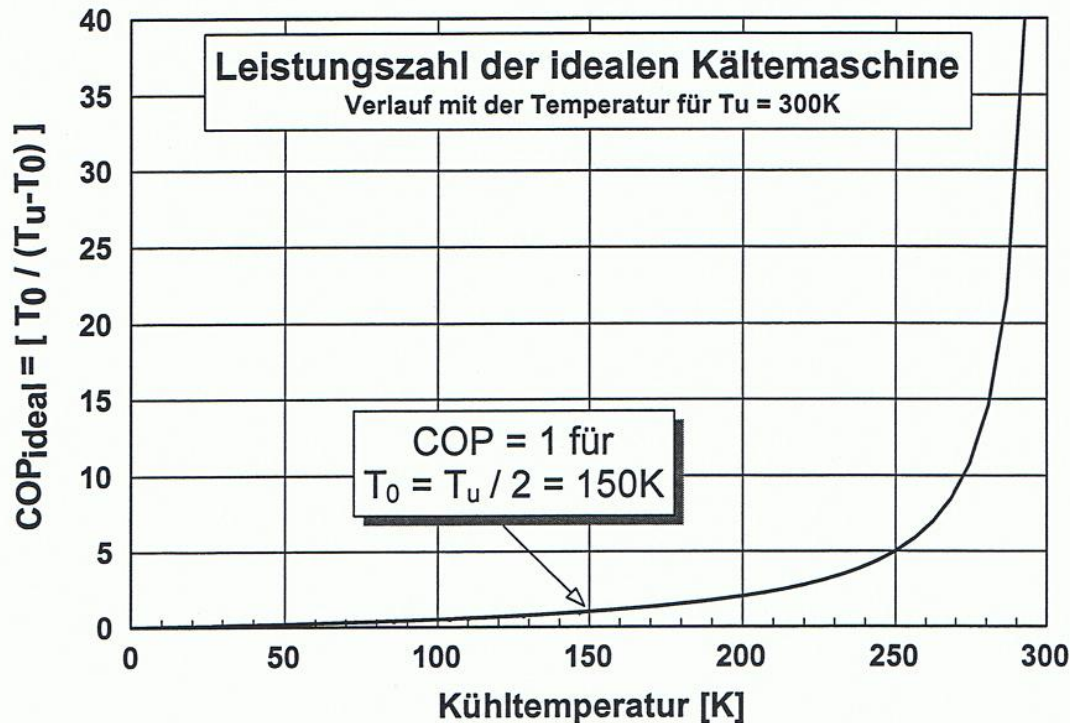
$$\varepsilon = Q_o/W = T_o / (T_u - T_o)$$

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 .

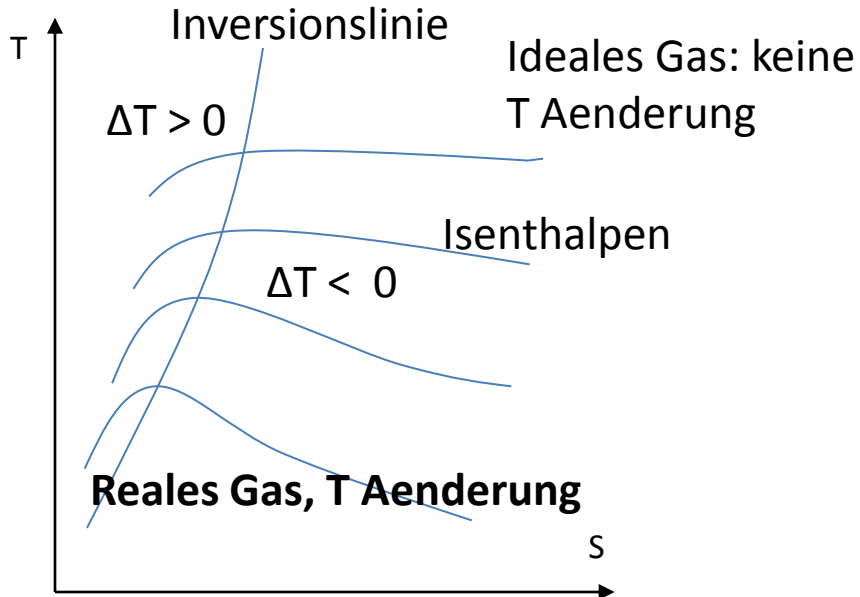
In der Praxis....mal sehen...

Adiabate Entspannung

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

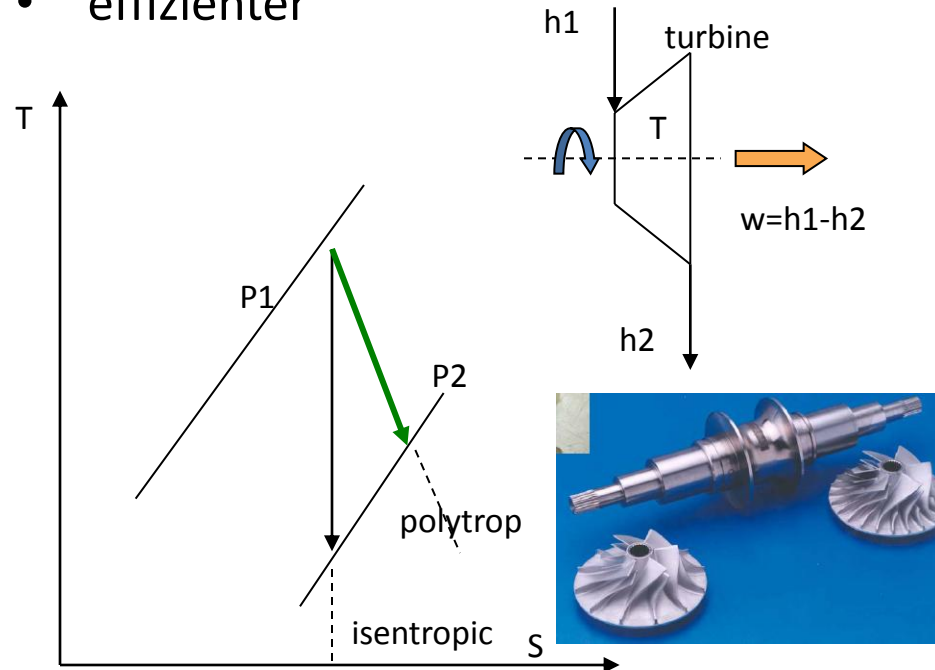
Joule-Thomson Entspannung

- Temperaturraenderung kann positiv, null oder negativ sein bei Entspannung



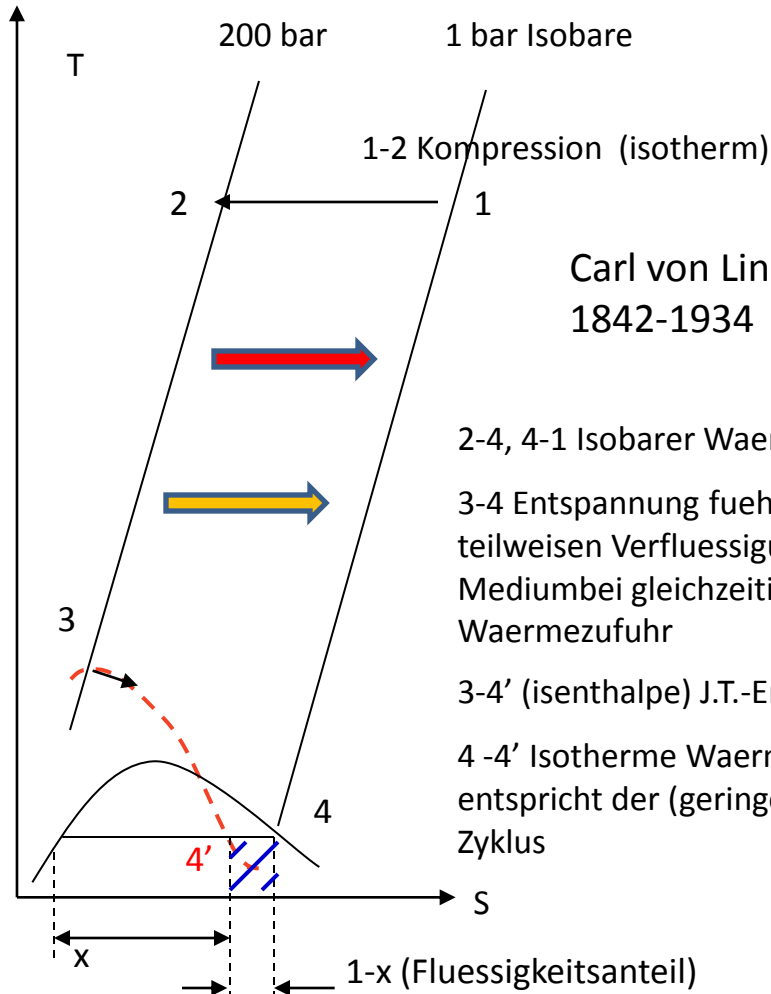
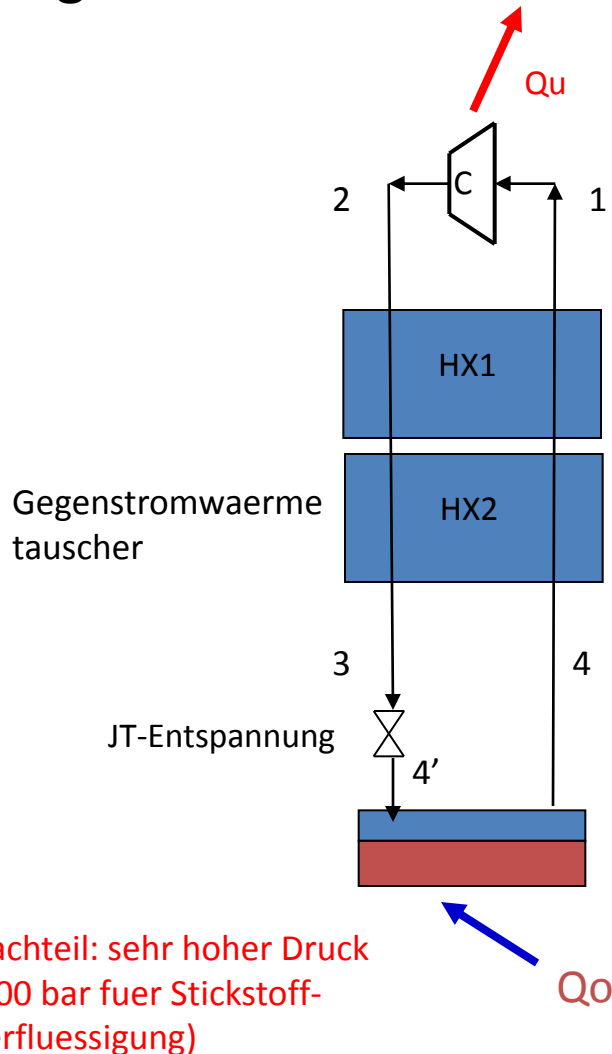
Entspannungsmaschine (Turbine)

- Funktioniert immer , auch bei idealem Gas
- effizienter

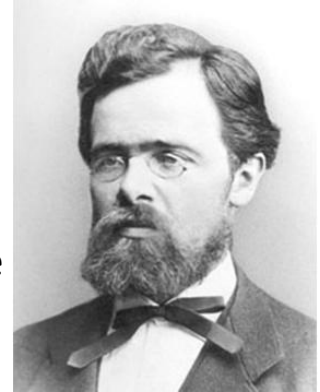


Verfahren: Linde Kreisprozess (Idealisiert)

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



Carl von Linde
1842-1934

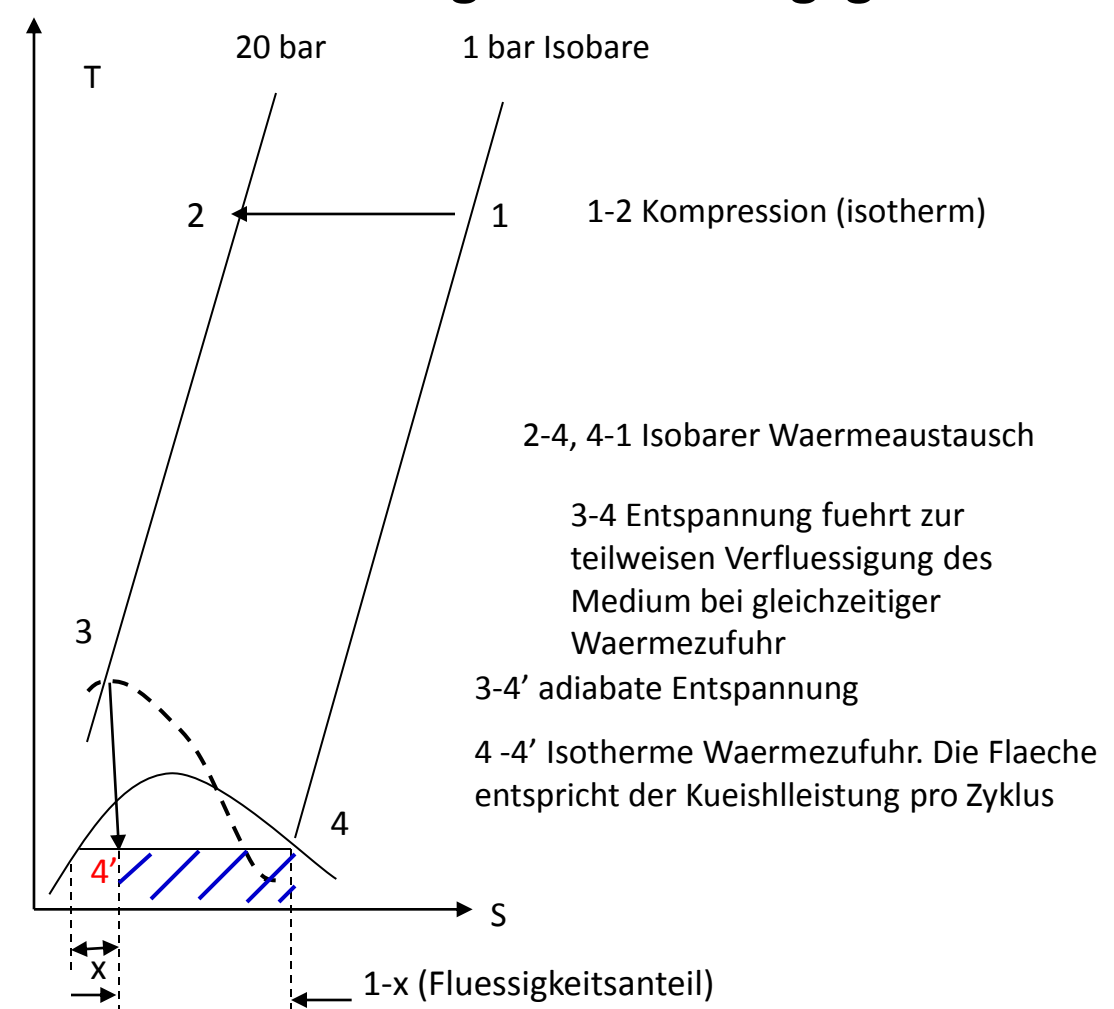
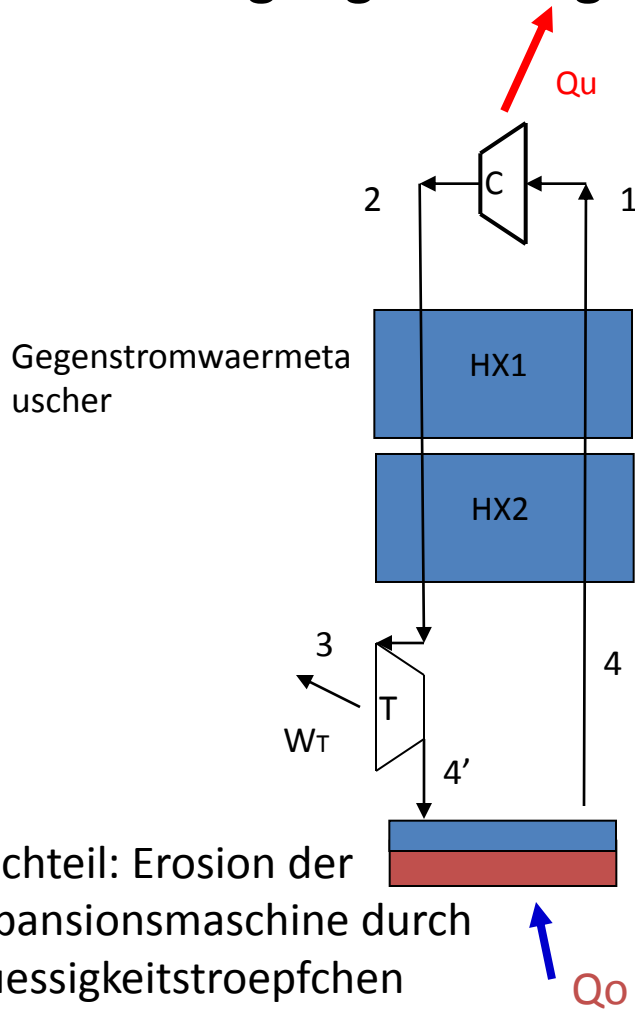


- 2-4, 4-1 Isobarer Waermeaustausch
 - 3-4 Entspannung fuehrt zur teilweisen Verfluessigung des Medium bei gleichzeitiger Waermezufuhr
 - 3-4' (isenthalpe) J.T.-Entspannung
 - 4-4' Isotherme Waermezufuhr. Die Flaechen entspricht der (geringen) Kuehlleistung pro Zyklus
- 1-x (Fluessigkeitsanteil)

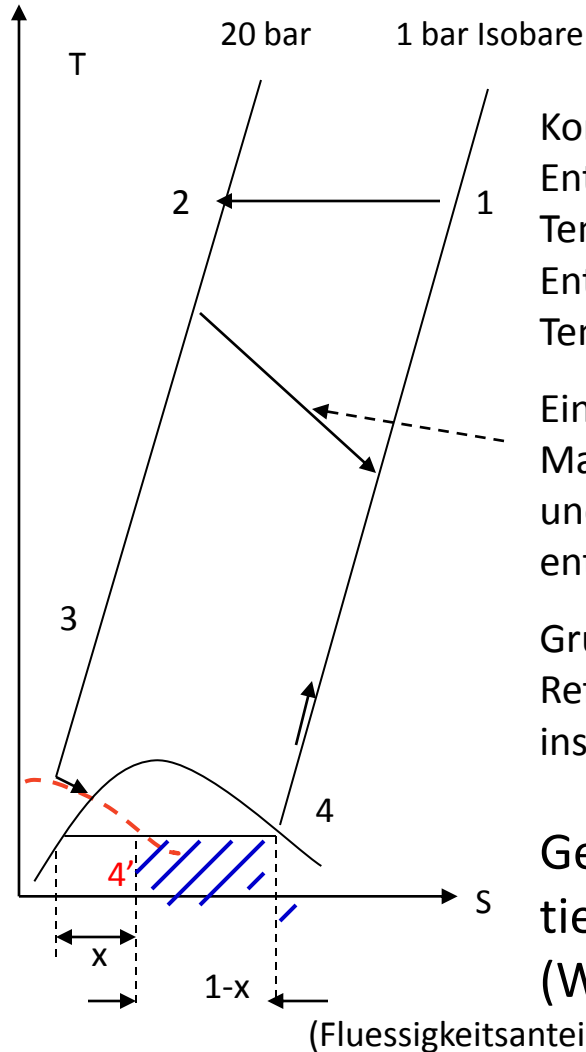
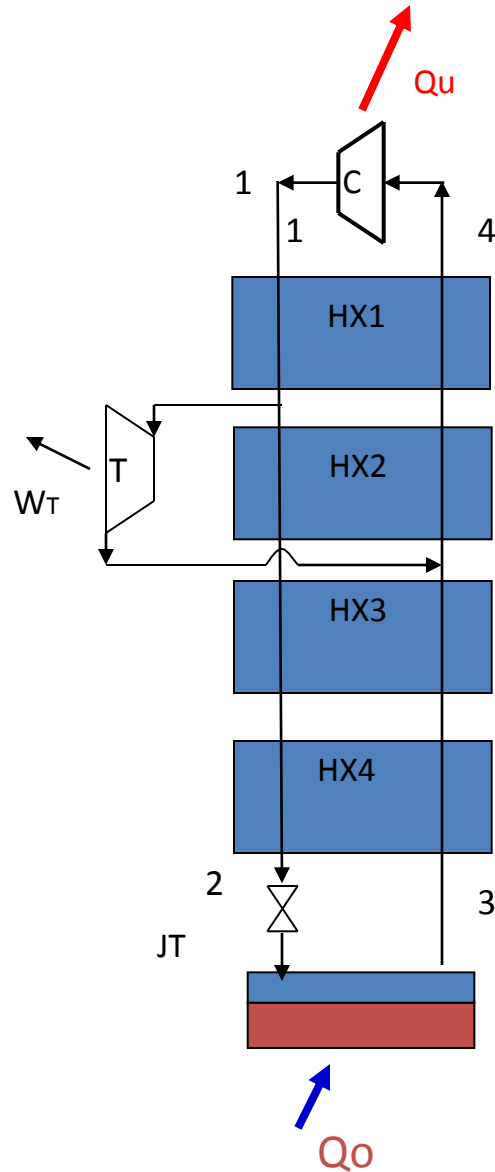
Nachteil: sehr hoher Druck
(200 bar fuer Stickstoff-
Verfluessigung)

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)

Claude Kreisprozess (Helium Verflüssigung)

Temperatur-Entropie Diagramm
von Helium (logarithmische Darstellung)

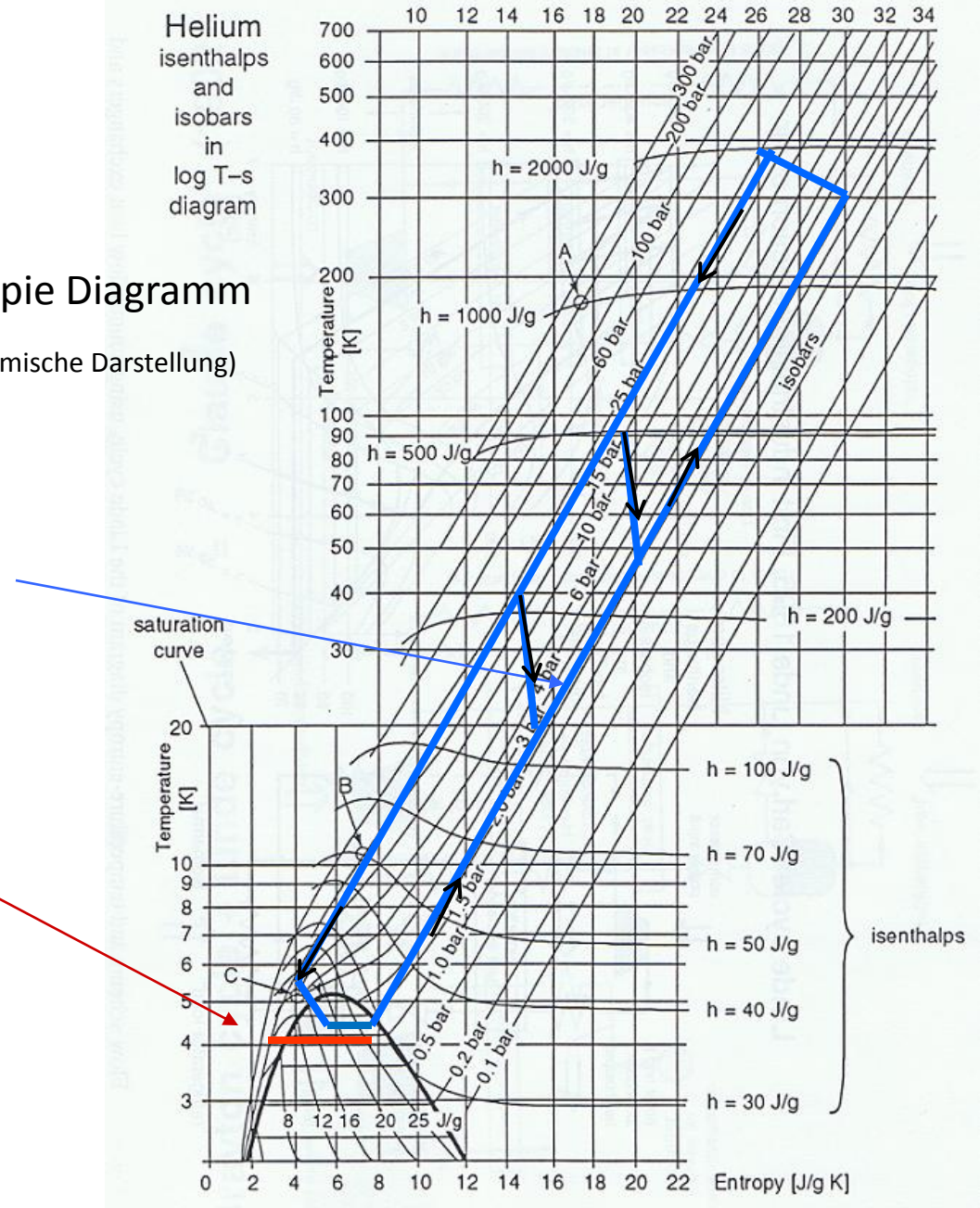
Sehr grosse **Enthalpiedifferenz** des Gases zwischen 300 K und 4.2 K mit **1540 J/g**.

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



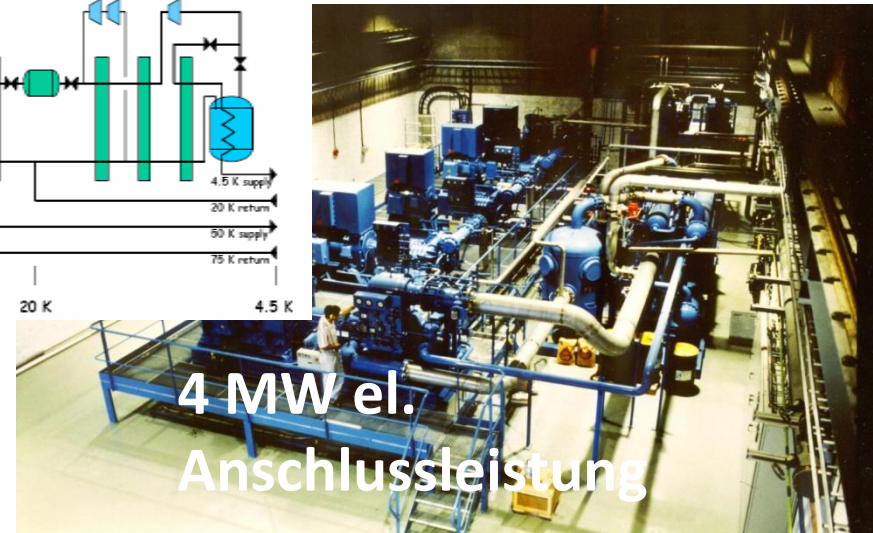
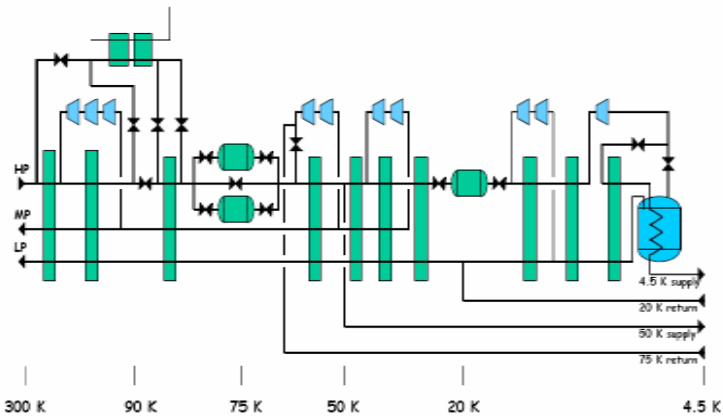
Wirkungsgrad der 8 CERN 18 kW Refrigeratoren

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...