

Fakultät Maschinenwesen, Institut für Energietechnik  
Schaufler-Professur für Kälte-, Kryo- und Kompressorentechnik  
Prof. Ch. Haberstroh

# Kryotechnik – Definition und Historie

# Definition Kryotechnik

altgriechisch: κρύος – Kälte, Frost; γεννάω – hervorbringen, erzeugen

⇒ Kältetechnik bei sehr tiefen Temperaturen

frühere Definitionen:

- bei Verflüssigung „permanenter“ Gase ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2$ )
- bei Carnot-Faktor  $< 1$

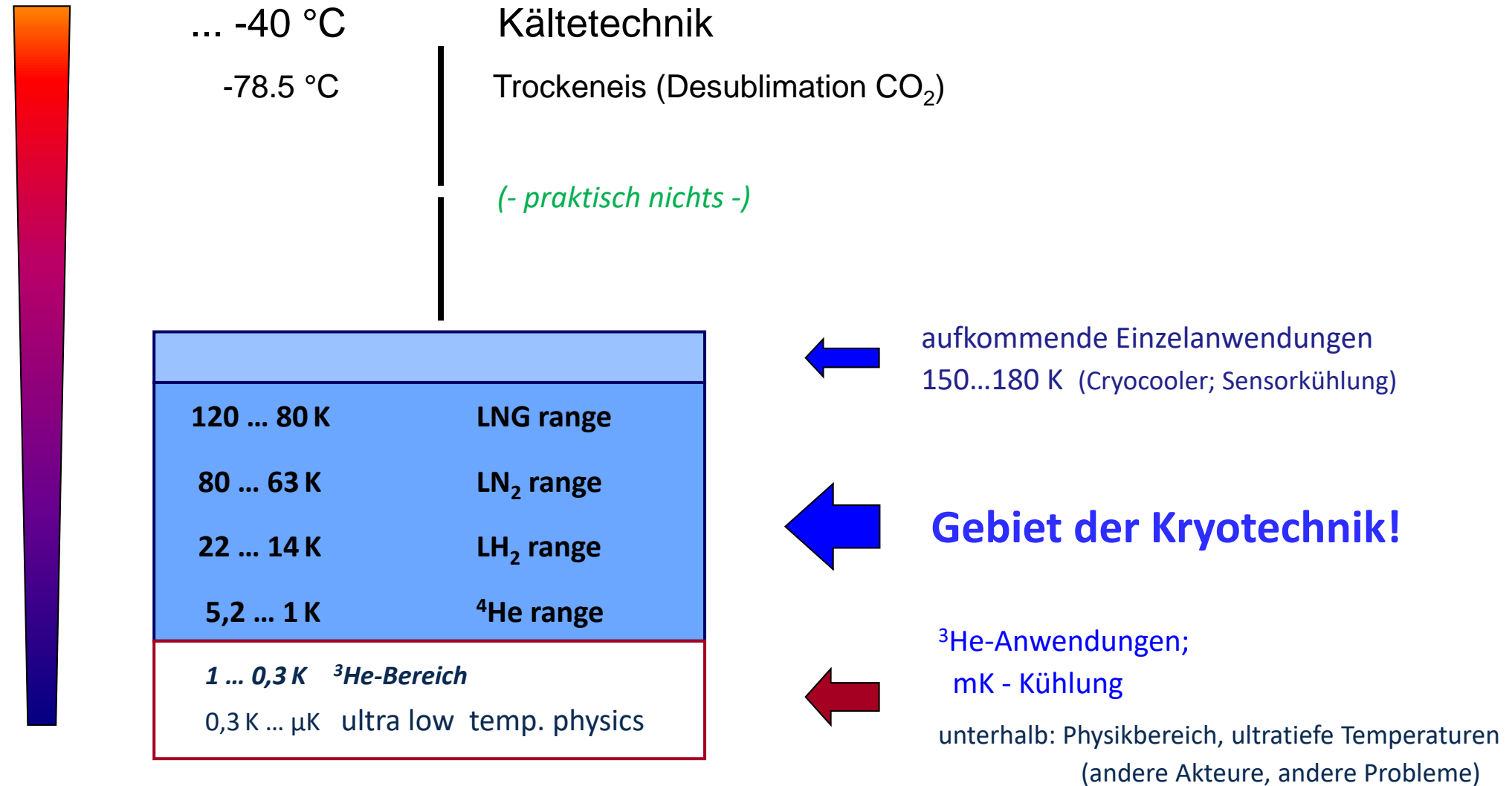
$$\leftarrow \frac{T}{288 \text{ K} - T} = 1; T = 144 \text{ K}$$

heutige Definition:  $T < 120 \text{ K}$

kryogene Fluide:

	He	H <sub>2</sub>	Ne	N <sub>2</sub>	<i>Air</i>	CO	F <sub>2</sub>	Ar	O <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Kr
T <sub>b</sub> [K]	4	20	27	77	~ 80	81	85	87	90	111	120

# Definition Kryotechnik



# Temperaturskalen

Kelvin [K]	Celsius [°C]	Fahrenheit [°F]	Rankine [°R]
373,15	100	212	671
273,15	0	32	492
0	- 273,15	- 459,67	0

Rankine [°R] ≠ Réaumur [°R]

Temperaturschritte:  $1 \text{ K} = 1 \text{ °C} = 1,8 \text{ °F} = 1,8 \text{ °R}$

$$(32 \text{ °F} - 32) \times 5/9 = 0 \text{ °C}$$

**Kryotechnik: Temperaturangaben ausschließlich in [K]**

# Wozu werden solch tiefe Temp. überhaupt gebraucht?

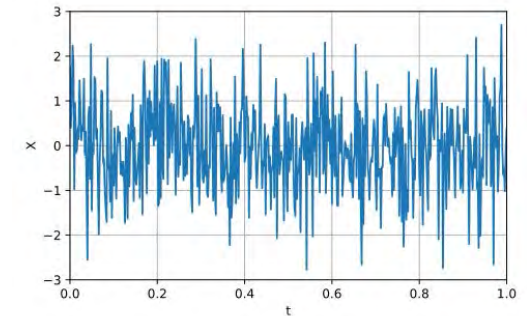
## a) Kondensation und Verflüssigung von Gasen

Luftverflüssigung; einfache Lagerung, Transport von  $N_2$ ,  $H_2$ ,  $O_2$ , Ar, LNG (Liquefied Natural Gas)

tiefe Temperaturen dabei gar nicht von Interesse, nur unvermeidliche Komplikation

## b) Verringerung thermisches Rauschen, therm. Störungen

- rauscharm-ungestörte Messungen Festkörperphysik, Kernphysik
- rausch-reduzierte Verstärkerelektronik
- sämtliche Anwendungen der Supraleitung



**therm. Anregung:**

$$E = k \cdot T$$

288 K:  $k \cdot T = 25 \text{ meV}$  ← nahe der Bindungsenergie in Halbleitern

4 K:  $k \cdot T = 0,3 \text{ meV}$

↑  
 $1 \text{ eV} \approx 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

# Kryotechnik – Bedeutung

bedeutende Rolle im Energiesektor:

- > 1 % der gesamten Elektro-Endenergie (!) geht allein in die Luftverflüssigung  
~ 5 kommerzielle Anlagen im Großraum Dresden, typ. 200000 m<sup>3</sup>/h pro Zug
- gigantische Erdgas-Verflüssigungsanlagen in Erzeugerländern **Norwegen, Algerien, Katar, Brunei, Australien, ...**
- „peak shaver“ - Erdgas-Verflüssigeranlagen in Verbraucherländern **Europa, Japan, USA, ...**



**Snøhvit, Norwegen, Insel Melkøya**

Verflüssiger Fa. Linde, 2007

**5,67 Mrd m<sup>3</sup> LNG pro Jahr**

# Kryotechnik – Bedeutung

**LHe – Flüssighelium @ 4 K: Inzwischen Standard-Kälte­träger an Universitäten, Instituten, Großforschungszentren, Beschleunigeranlagen**

eigene Rückgewinnung und Rückverflüssigung ( $P_{el} = 50 \text{ kW} \dots 50 \text{ MW}$ )

- **zusätzliche LHe-Versorgung durch die Gasindustrie:  $\sim 200 \text{ Mio l}_{LHe} / \text{Jahr}$**

Linde/Praxair, Air Products, Air Liquide, Exxon, ...)

- **MRI – Untersuchungen (Kernspin-Tomographie)**

Anlagen mit typ. 2000 l LHe-Badkryostat (Kühlung supraleitende Spulen)

weltweit im Einsatz:

1983: 100

2000: 18 000

2008: 43 000



# Kryoechnik ist nicht Cryonic!

## Cryonics: Langzeitkonservierung menschlicher Körper in LN<sub>2</sub> nach dem Tode

~ 100 Leichen gegenwärtig „suspended“

10 000 ... 200 000 \$

(ges. Körper / nur Schädel /

Lieblings-Haustier zusätzlich)

Ziel: Wiedererweckung in ca. 50 Jahren und  
Nutzung dann vorh. medizin. Möglichkeiten

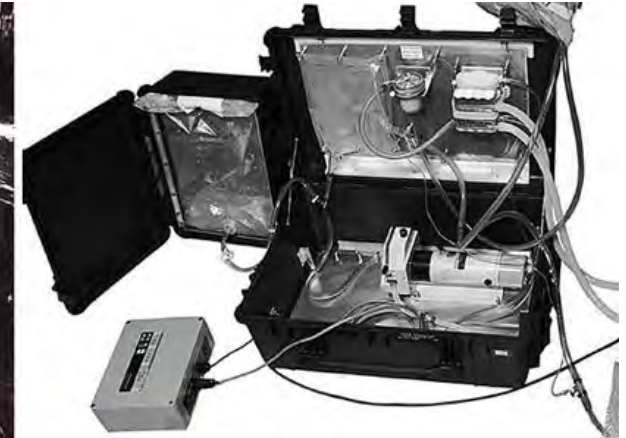
Begründer: Robert Ettinger († Juli 2011)

→ keine realen Erfolgschancen

Headquater Cryonics Germany: in Dresden

⇒ nicht zu verwechseln mit ernsthaften  
kryomedizinischen Methoden

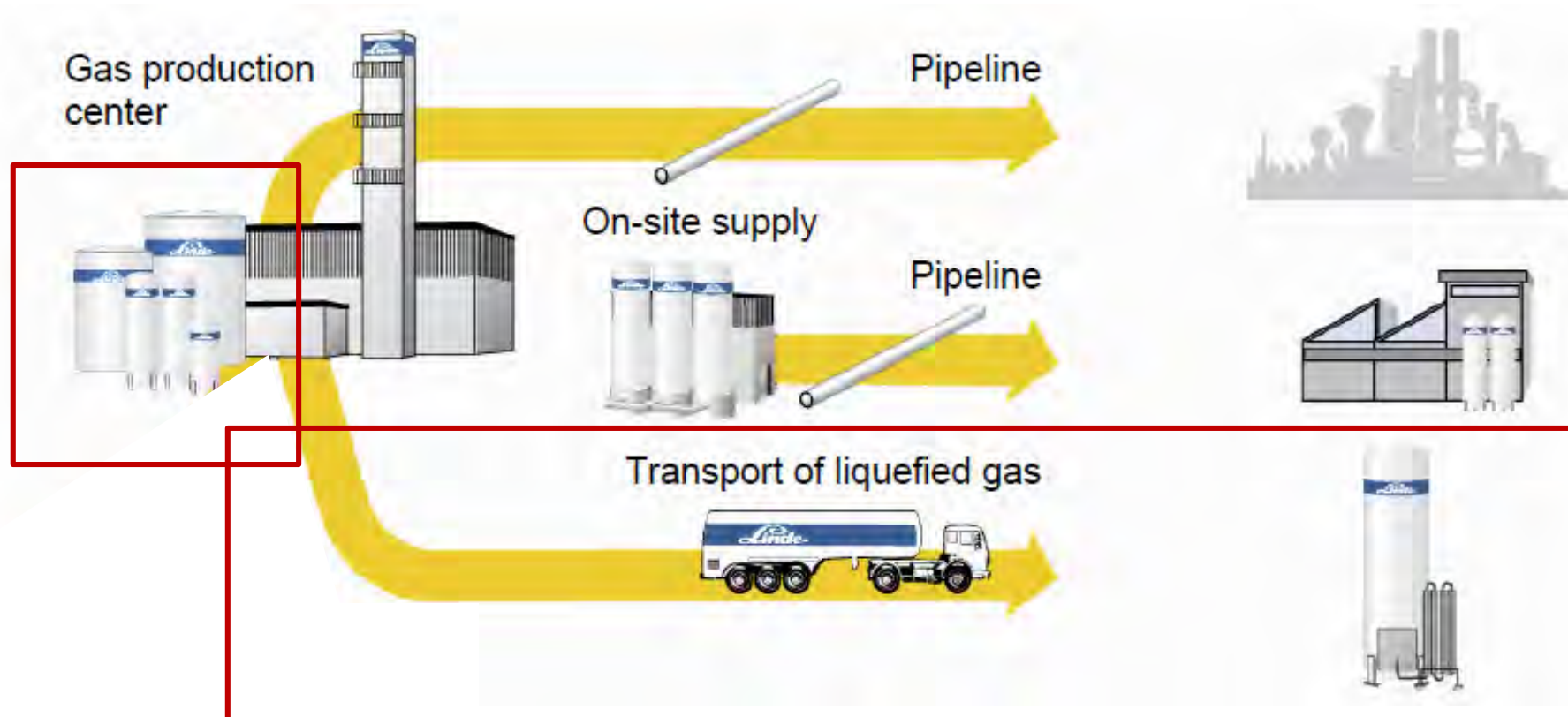
Ganzkörper-Kryotherapie, Kryochirurgie,  
Kryokonservierung, Kryobiologie



# Kryotechnik – Bedeutung

- **Transport und Lagerung hochreiner Gase**  
z.B. für Halbleiterindustrie, Krankenhäuser, F&E ( $H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ , Ar)

angenehmer Nebeneffekt:  
Gase, da aus  
Flüssigphase, hochrein

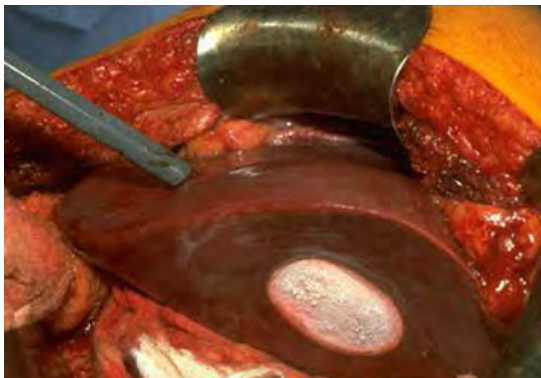


# Kryotechnik – Bedeutung

## LN<sub>2</sub>-Anwendungen:

- Kaltschrumpfen / kryogenes Härten
- Schockfrosten Lebensmittel
- Kryomedizin / Kryobiologie

Konservierung Gewebe / Blutkonserven / Virenproben  
Kryochirurgie



# Kryotechnik – Bedeutung

- **Weltraum-Kryotechnik**

- a) Infrarot-Satelliten
- b)  $\text{LH}_2$  + LOX als Raketentreibstoff



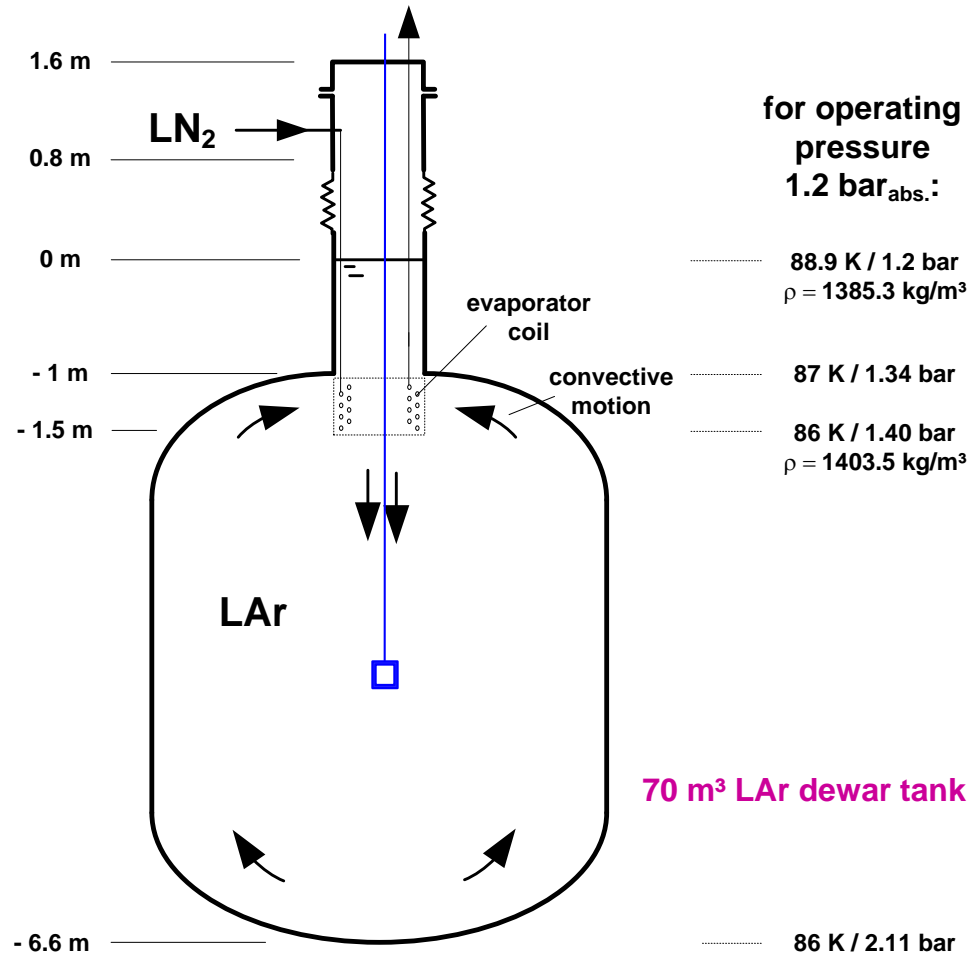
- **$\text{LH}_2$  als möglicher Energieträger**

- **Grundlagenforschung**

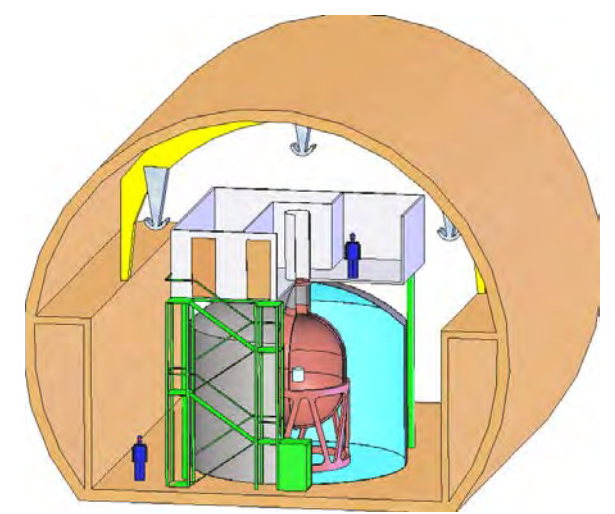


# Kryotechnik – Bedeutung: Bsp. Grundlagenforschung

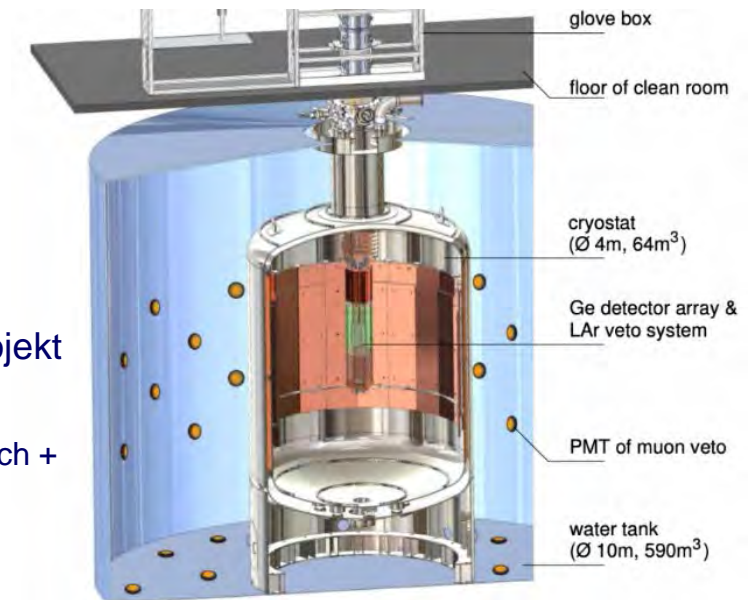
GERmanium Detector Array for the search of  
neutrinoless double beta decay of Ge-76



Inspektion Juli 2014



GERDA set-up in the Gran Sasso underground laboratories, Italy



10.10.2024: Folgeprojekt

**LEGEND !?**

300 t LAr atmosphärisch +  
30 t LAr "fossil"

# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

17. Jahrhundert, Amontons:  $T_{\min} \approx -240\text{ °C}$



1824 S. Carnot



1877 Cailletet / Pictet:

unabhängig voneinander erstmals LOX-Nebel produziert

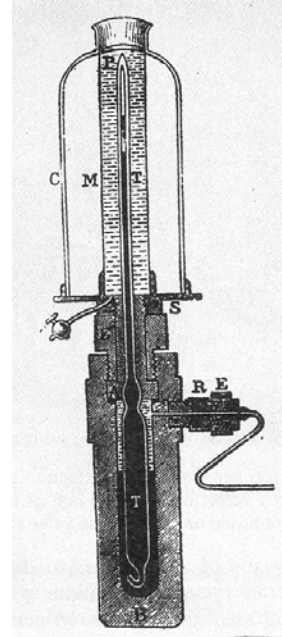
Acad. de Sciences, Paris, Dez. 24



R. Pictet, Genf



L. Cailletet, Paris



1883 Wroblewski + Olszewski, Krakau:

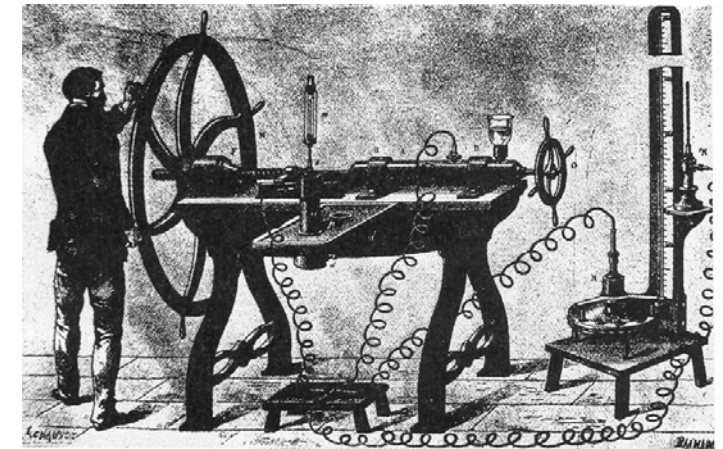
LOX,  $\text{LN}_2$  im Labormaßstab verflüssigt

abgepumptes  $\text{C}_2\text{H}_4$  – Bad zur Vorkühlung @ 143 K

Theorie: Van der Waals, Joule, Thomson (= Lord Kelvin)

Inversionstemperatur entdeckt

W. Nernst (3. Gesetz der Thermodynamik)



# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

## 1893 J. Dewar, Verspiegelung Glas-Thermosgefäß

(parallel: Reinhold Burger, aus Baruth-Glashütte nahe Dresden / später Berlin → zunächst nur Glas doppelwandig, später innen verspiegelte „Thermoskanne“)



## 1895 Carl Linde / Hampson: Joule-Thomson – Prozess zur Luftverflüssigung

## 1898 James Dewar, erste $H_2$ – Verflüssigung

J. Dewar,  
Demonstration und Vortrag bei  
der Royal Society, London  
(Ölgemälde Museum London)



# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

**1902 Carl (von) Linde: Luftzerlegung durch kryogene Rektifikation**

**1908 H.K. Onnes, Leiden: erstmals He verflüssigt @ 4 K**

systematische Vorarbeiten, „Teamplayer“ statt Einzelkämpfer

Glasbläser-/Instrumentenbauer-Schule gegründet,

eigene wiss. Journal herausgegeben, Labor offen für Gastforscher

Flüssigluft +  $\text{LH}_2$  zur Vorkühlung

**1911 Entdeckung der Supraleitung**

**20er-30er W. Meißner: sl Materialien, Meißner-Effekt**

**1930 He-II suprafluid @  $< 2 \text{ K}$**

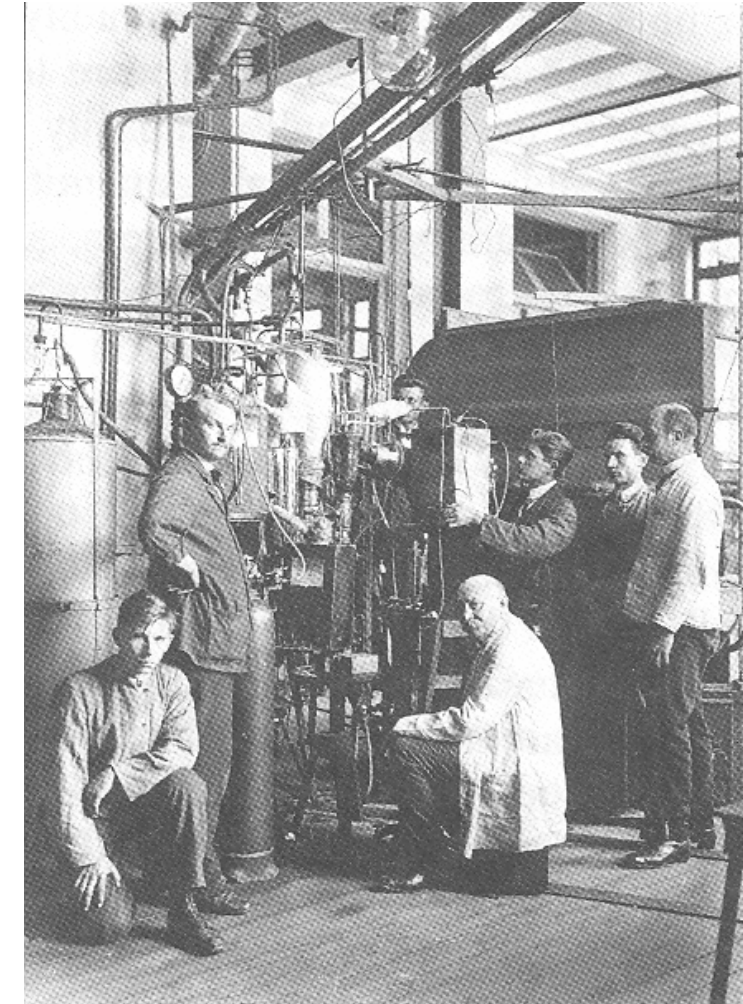
**1933 Emigration Kurti, Simon und Mendelssohn (via Breslau)**

Berlin  $\Rightarrow$  Oxford (Clarendon Labs, Lindeman;

Oxford Instruments, Gründer Sir M. Wood)

**1934 P. Kapitza, Expansionsturbine**

**1946 S. Collins, erster kommerzieller He-Verflüssiger**



# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

**1957 LOX Atlas-Trägerrakete**

**1958 MLI eingeführt**

**ab 60er: Turbinenverflüssiger f. Helium eingeführt**

**Kryo-Laboratorien gegründet (NIST)**

**USA, Apollo-Projekt**

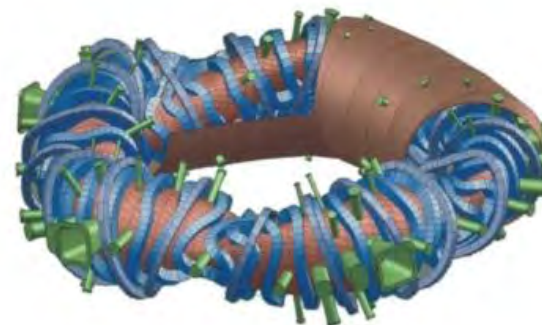
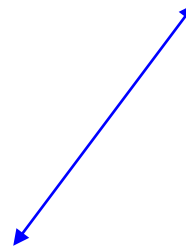
**Nobelpreise (viele über/mittels Kryotechnik!)**

**kryogene Infrastruktur**

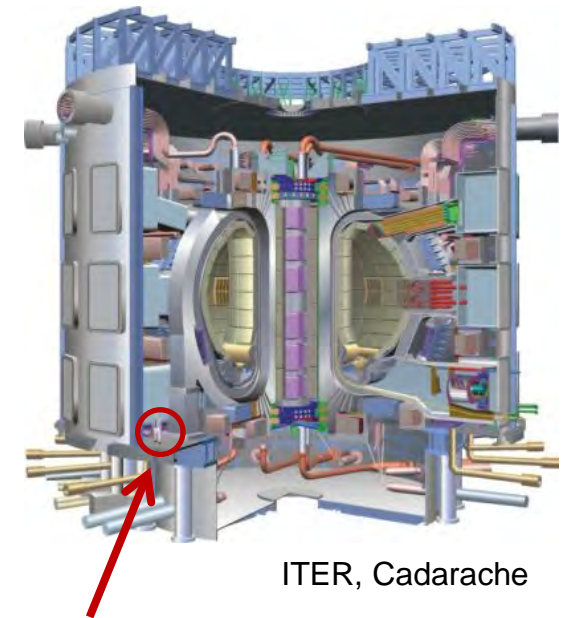
**riesige Kryoapparaturen für die Forschung**

Okt. 2017: Chemienobelpreis f. Kryo-Elektronenmikroskopie  
(Schockfrosten 10 000 K/s biolog. Proben mit Wasseranteil)

früher schon: Onnes; M. Planck; Bardeen/Cooper/Schrieffer;  
Josephson; Kapitza; v. Klitzing; Bednorz&Müller;  
Douglas/Lee/Osheroff; Ketterle; Abrikosov



W7-X, Greifswald



ITER, Cadarache

# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

## Beiträge Dresden

**Gustav Zeuner**  
(1828 – 1907)

Freiberg, Zürich, Freiberg, Dresden

Entropiebegriff in Theorie der Kältetechnik

(Dr.) **Carl (von) Linde**  
(1842 – 1934)

Kempton, Zürich, Berlin, München

Student von Zeuner in Zürich;  $\text{NH}_3$ -Kältemaschinen, Luftverflüssigung

**Richard Mollier**  
(1863 – 1935)

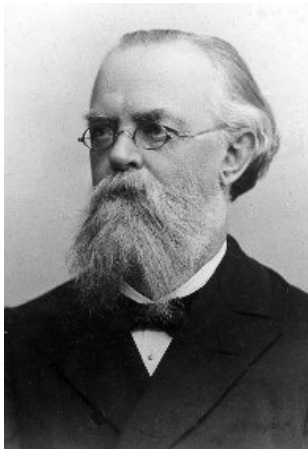
Triest, Graz, München, Dresden

Assistent von Linde in München, Prof. TU Dresden, Mollier-Diagramme eingeführt

**Wilhelm Nußelt**  
(1882 – 1957)

Nürnberg, München, Dresden, Karlsruhe, München

Assistent von Mollier in Dresden, Wärmeübergang/Ähnlichkeitstheorie



# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

## Meilensteine **Wasserstoff**-Verflüssigung

**1898** erste H<sub>2</sub> - Verflüssigung durch J. Dewar

**1898 – 1945** Kuriosität, max. einige cm<sup>3</sup> LH<sub>2</sub>

**1945 – 1956** US Militär- und Nuklearprogramm, NBS (NIST) gegründet, Pilotanlagen zur Verflüssigung

**1957** „Baby Bear“ – Painsville, OH (0,75 t /Tag)

**1957** „Mama Bear“ – West Palm Beach, FL (3,5 t / Tag)

**1959** „Papa Bear“ – West Palm Beach, FL (30 t / Tag)

**1960 – 2000:** große Anlagen in USA + Canada (Gesamtkapazität: 172 t/Tag)

(Linde, Air Products, Airco, Praxair, Air Liquide)

**1980 – heute:** kommerz. LH<sub>2</sub> – Anlagen in Europa und Japan

**ab ~ 2000:** H<sub>2</sub> – Verflüssiger in Indien, China, Korea

# Kryotechnik – Stand heute

## Hauptaktivitäten:

USA

Japan

China

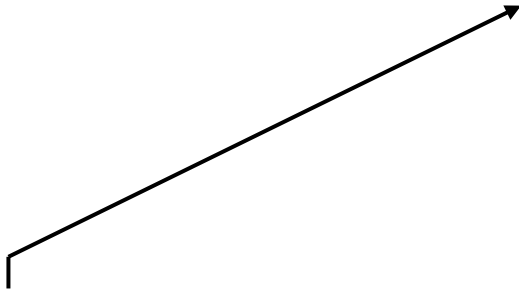
Korea

Russia

India



Europa: **D**, F, CH, I, NL, GB, N, A, PL, CZ,  
E, P



München (Garching)

Karlsruhe

DESY Hamburg

**Dresden**

Berlin



## **TUD, Professur KKKT\*\***

TUD, Tieftemperatur-,  
Photophysik

ILK gGmbH, BB-Allee\*

IFW Dresden\*

MPI CPfS\*

HZDR Forschungszentrum  
Rossendorf \*\*

Leybold Dresden GmbH  
(Cryocooler)

\* eigene LHe-Anlage