

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 ( $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ )
- bei Carnot-Faktor  $< 1$

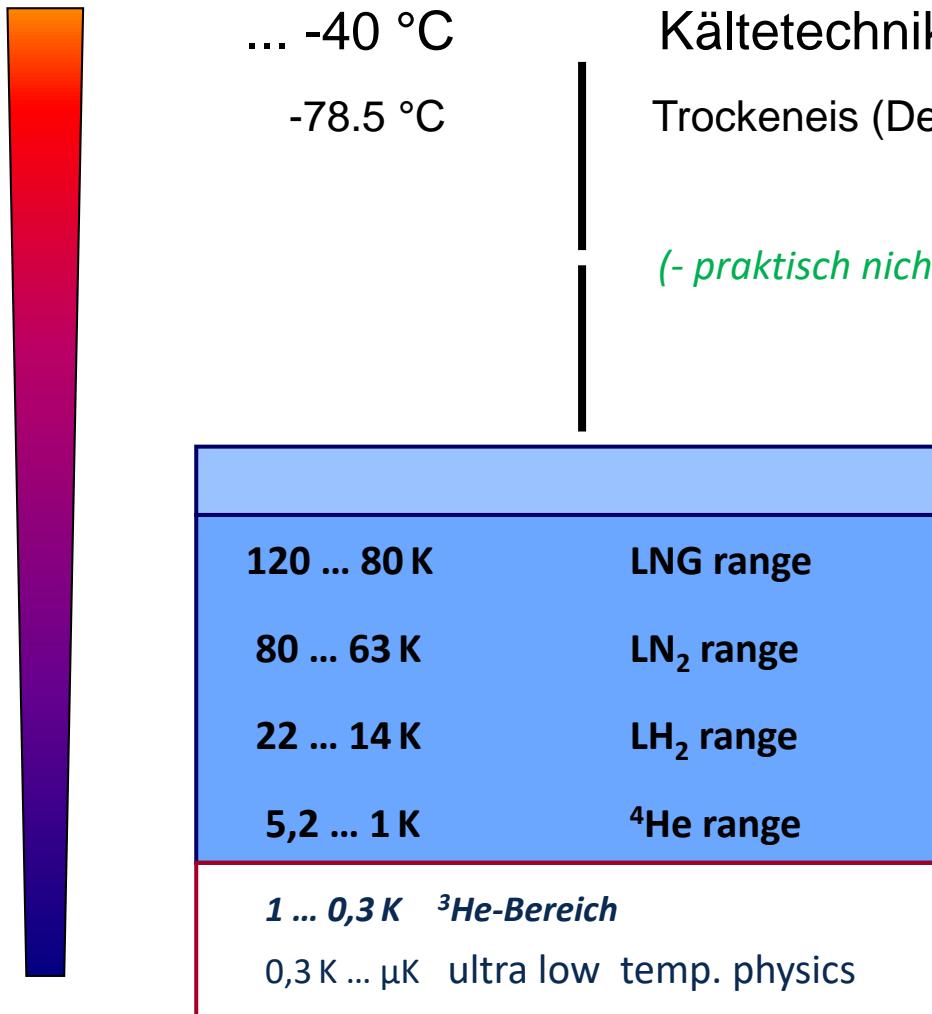
$$\leftarrow \frac{T}{288 \text{ K} - T} = 1; T = 144 \text{ K}$$

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

kryogene Fluide:

	<b>He</b>	<b><math>\text{H}_2</math></b>	<b>Ne</b>	<b><math>\text{N}_2</math></b>	<b>Air</b>	CO	$\text{F}_2$	<b>Ar</b>	<b><math>\text{O}_2</math></b>	<b><math>\text{CH}_4</math></b>	<b>Kr</b>
$T_b$ [K]	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>27</b>	<b>77</b>	<b><math>\sim 80</math></b>	81	85	<b>87</b>	<b>90</b>	<b>111</b>	<b>120</b>

# Definition Kryotechnik



aufkommende Einzelanwendungen  
150...180 K (Cryocooler; Sensorkühlung)

## Gebiet der Kryotechnik!

<sup>3</sup>He-Anwendungen;  
mK - Kühlung

unterhalb: Physikbereich, ultratiefen Temperaturen  
(andere Akteure, andere Probleme)

# 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 K = 1 °C = 1,8 °F = 1,8 °R

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

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

# Wozu werden solch tiefe Temp. überhaupt gebraucht?

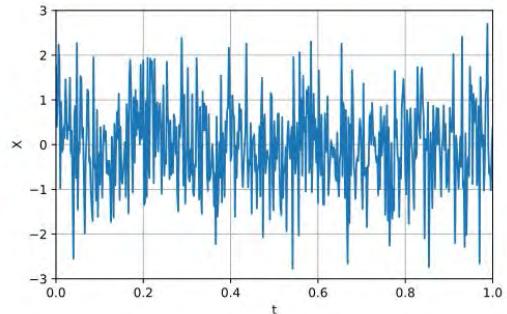
## a) Kondensation und Verflüssigung von Gasen

Luftverflüssigung; einfache Lagerung, Transport von N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, 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:  $k \cdot T = 0,3 \text{ meV}$

$$1 \text{ eV} \approx 1,602 \text{ e}^{-19} \text{ J}$$

# 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:  $\sim 200 \text{ Mio l}_{\text{LHe}}/\text{Jahr}$**

(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



# Kryotechnik 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)

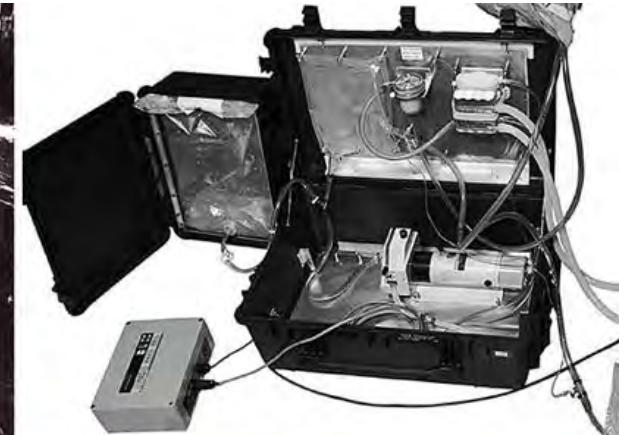
Ziel: Wiedererweckung in ca. 50 Jahren und  
Nutzung dann vorh. medizin. Möglichkeiten

Begründer: Robert Ettinger († Juli 2011)

→ keine realen Erfolgschancen

Headquater Cryonics Germany: in Dresden

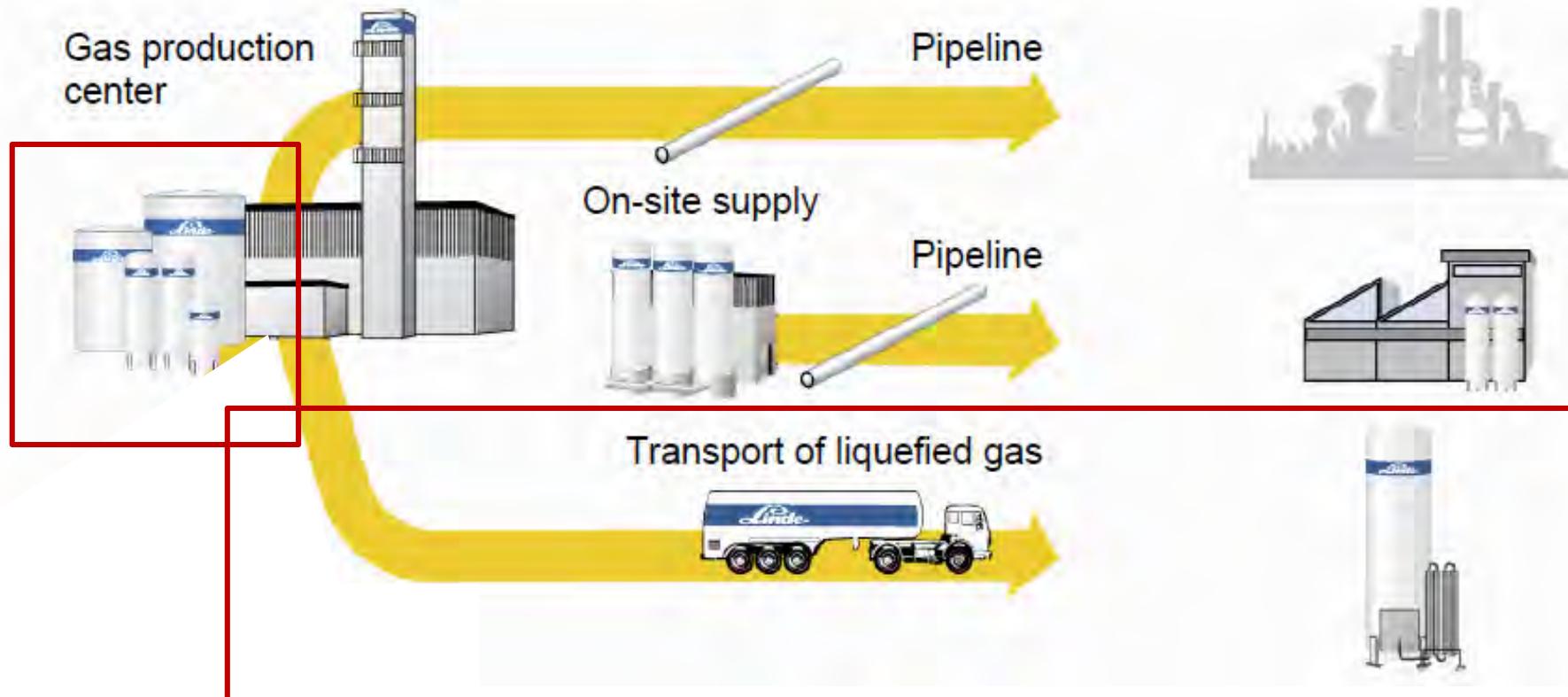
⇒ nicht zu verwechseln mit ernsthaften  
kryomedizinischen Methoden  
Ganzkörper-Kryotherapie, Kryochirurgie,  
Kryokonservierung, Kryobiologie



# Kryotechnik – Bedeutung

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

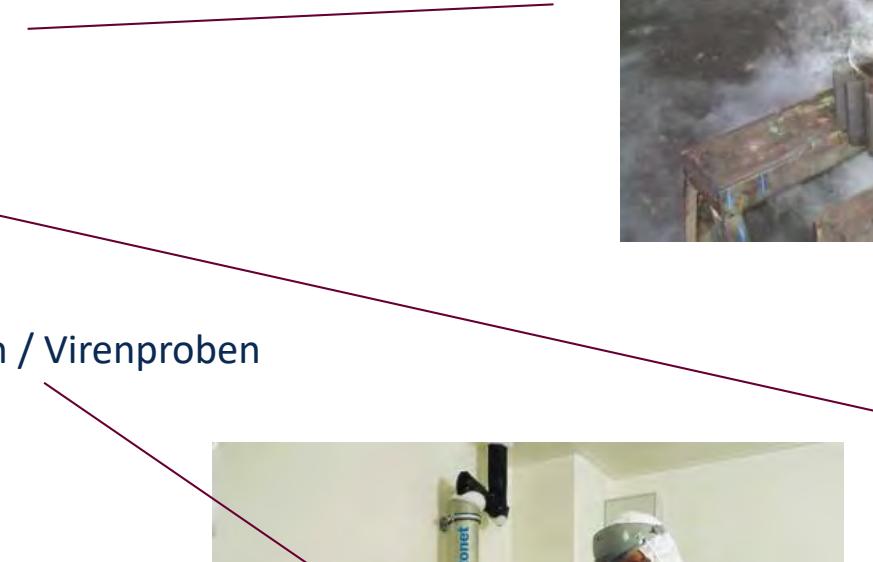
angenehmer Nebeneffekt:  
Gase, da aus  
Flüssigphase, hochrein



# Kryotechnik – Bedeutung

## $\text{LN}_2$ -Anwendungen:

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



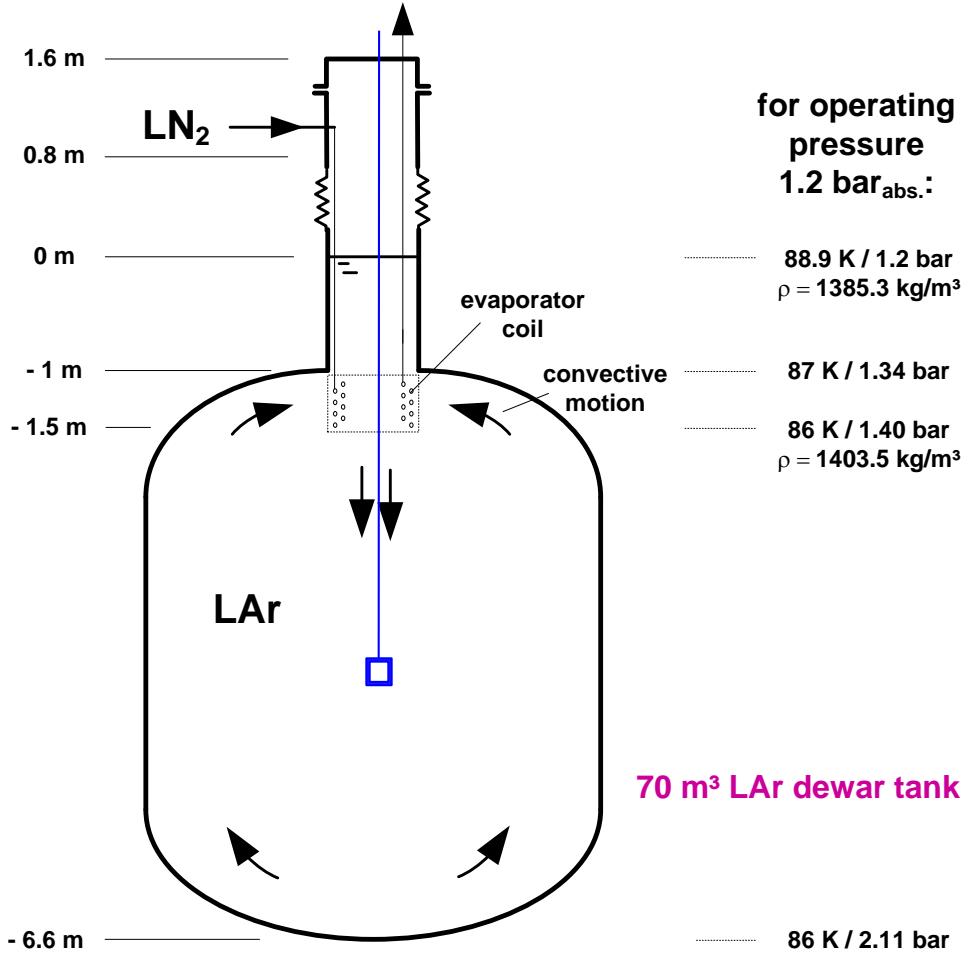
# Kryotechnik – Bedeutung

- Weltraum-Kryotechnik
  - a) Infrarot-Satelliten
  - b) LH<sub>2</sub> + LOX als Raketentreibstoff
- LH<sub>2</sub> als möglicher Energieträger
- Grundlagenforschung

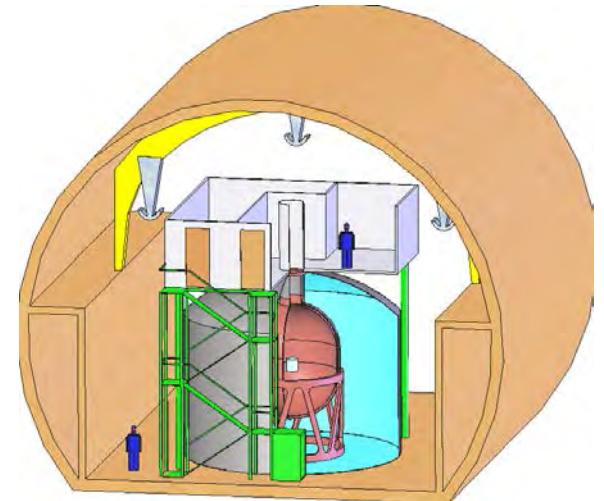


# Kryotechnik – Bedeutung: Bsp. Grundlagenforschung

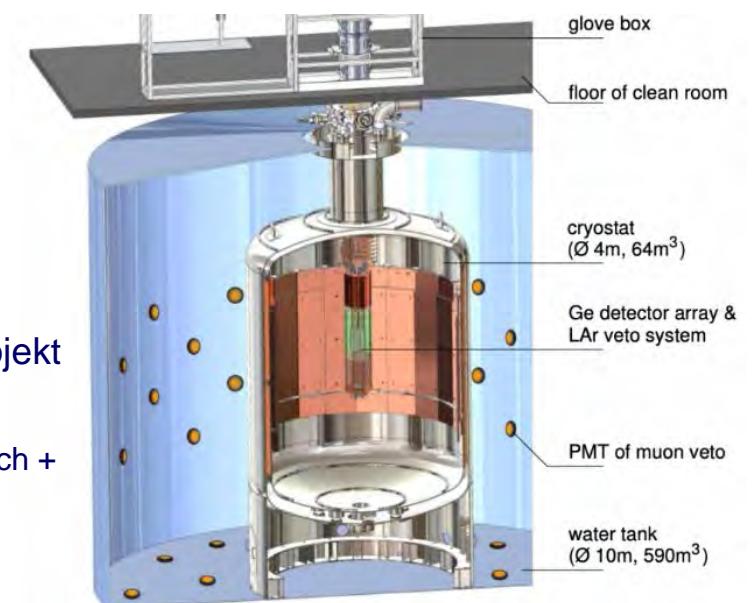
GERmanium Detector Array for the search of neutrinoless double beta decay of Ge-76



Inspektion Juli 2014



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

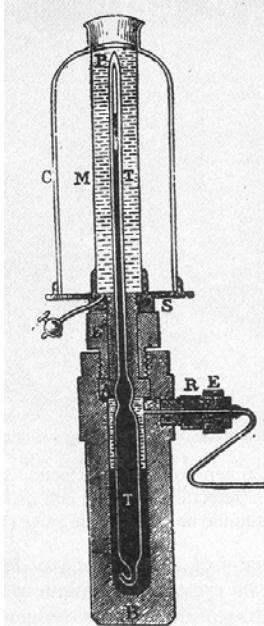


10.10.2024: Folgeprojekt  
LEGEND !?

300 t LAr atmosphärisch +  
30 t LAr “fossil”

# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

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



1824 S. Carnot

1877 Cailletet / Pictet:

unabhängig voneinander erstmals LOX-Nebel produziert

Acad. de Sciences, Paris, Dez. 24

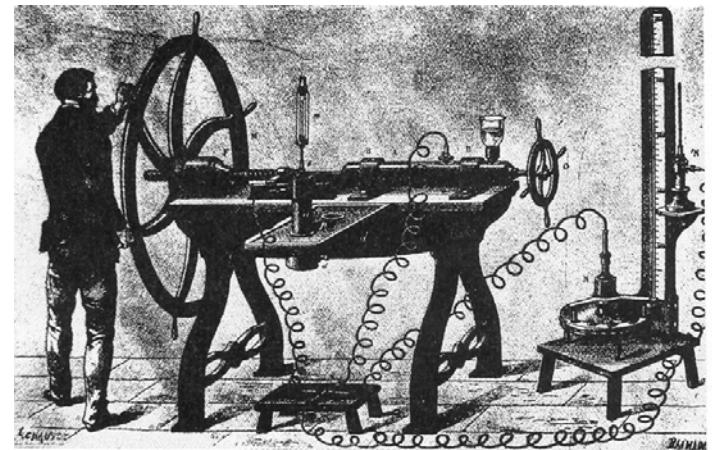
R. Pictet, Genf

L. Cailletet, Paris

1883 Wroblewski + Olszewski, Krakau:

LOX, LN<sub>2</sub> im Labormaßstab verflüssigt

abgepumptes C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> – 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<sub>2</sub> – 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 + LH<sub>2</sub> zur Vorkühlung

1911 Entdeckung der Supraleitung

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

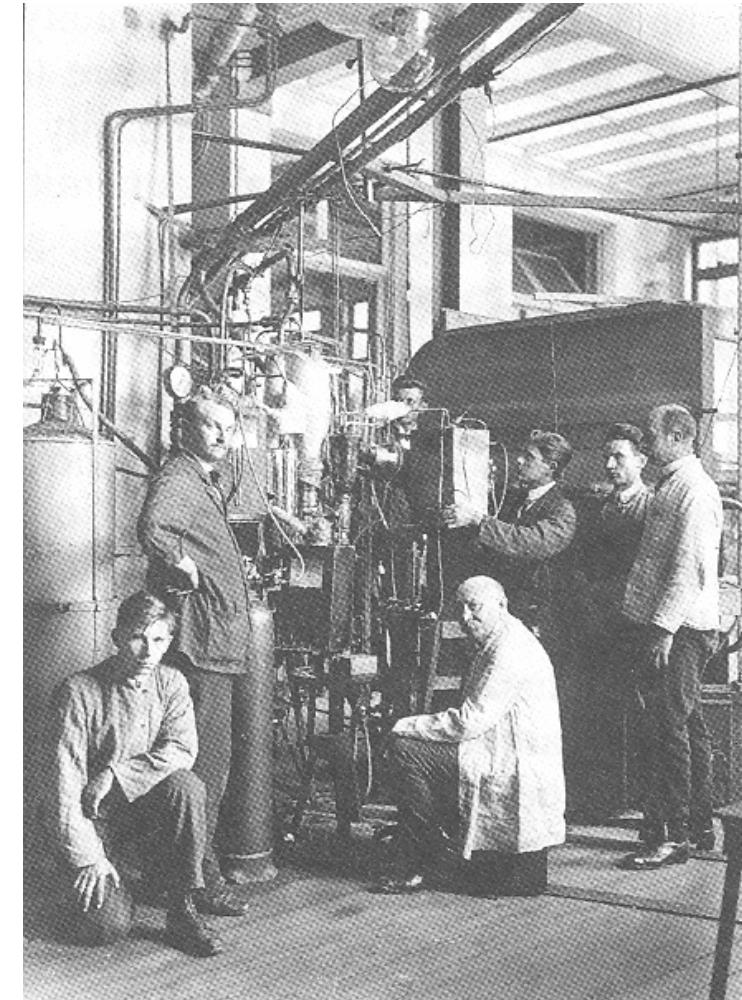
1930 He-II suprafluid @ < 2 K

1933 Emigration Kurti, Simon und Mendelsohn (via Breslau)

Berlin ⇒ 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

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

1958 MLI eingeführt

ab 60er: Turbinenverflüssiger f. Helium eingeführt

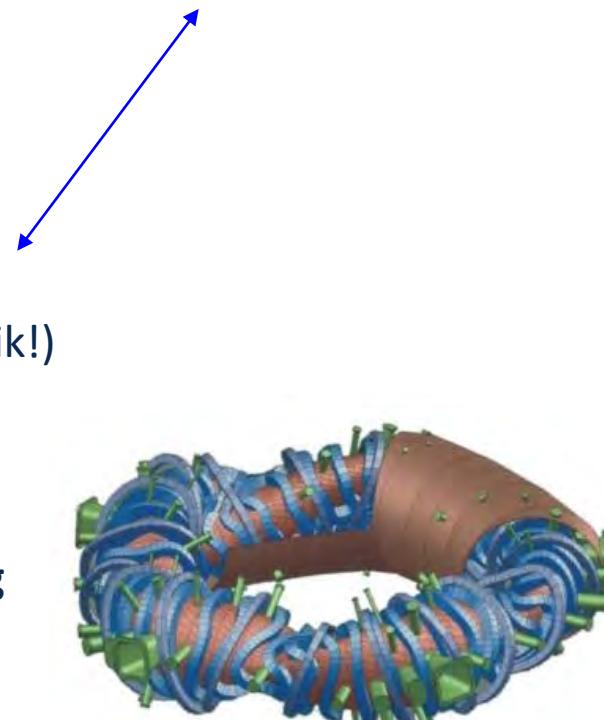
Kryo-Laboratorien gegründet (NIST)

USA, Apollo-Projekt

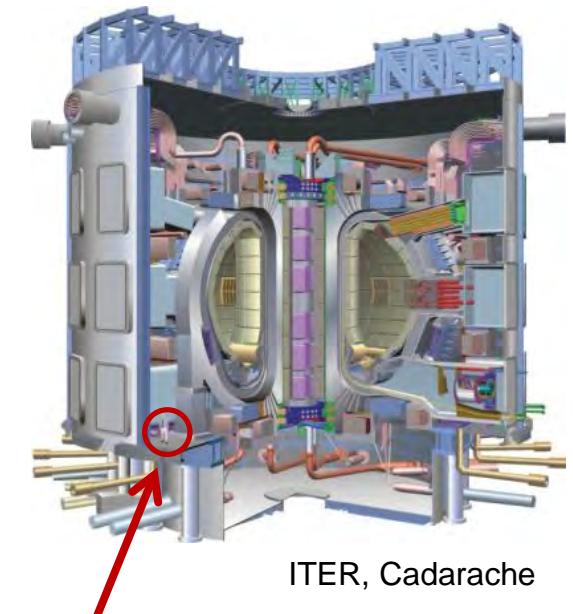
Nobelpreise (viele über/mittels Kryotechnik!)

kryogene Infrastruktur

riesige Kryoapparaturen für die Forschung



W7-X, Greifswald



ITER, Cadarache

# Kryotechnik – geschichtliche Entwicklung

## Beiträge Dresden

**Gustav Zeuner**

(1828 – 1907)

**(Dr.) Carl (von) Linde**

(1842 – 1934)

**Richard Mollier**

(1863 – 1935)

**Wilhelm Nußelt**

(1882 – 1957)

Freiberg, Zürich, Freiberg, Dresden

Kempten, Zürich, Berlin, München

Triest, Graz, München, Dresden

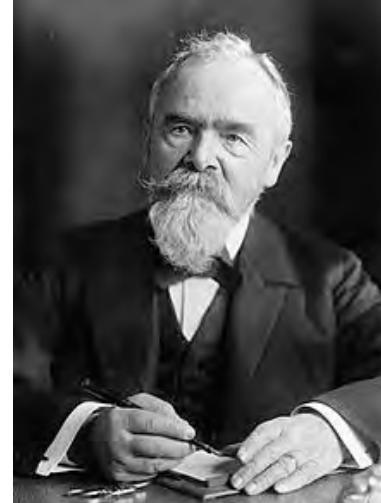
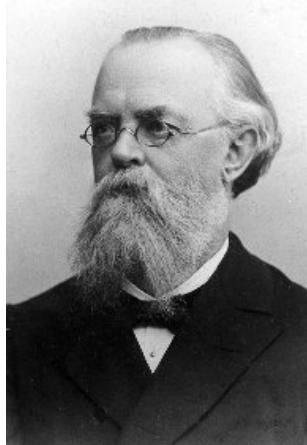
Nürnberg, München, Dresden,  
Karlsruhe, München

Entropiebegriff in Theorie der Kältetechnik

Student von Zeuner in Zürich; NH<sub>3</sub>-Kältemaschinen,  
Luftverflüssigung

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

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