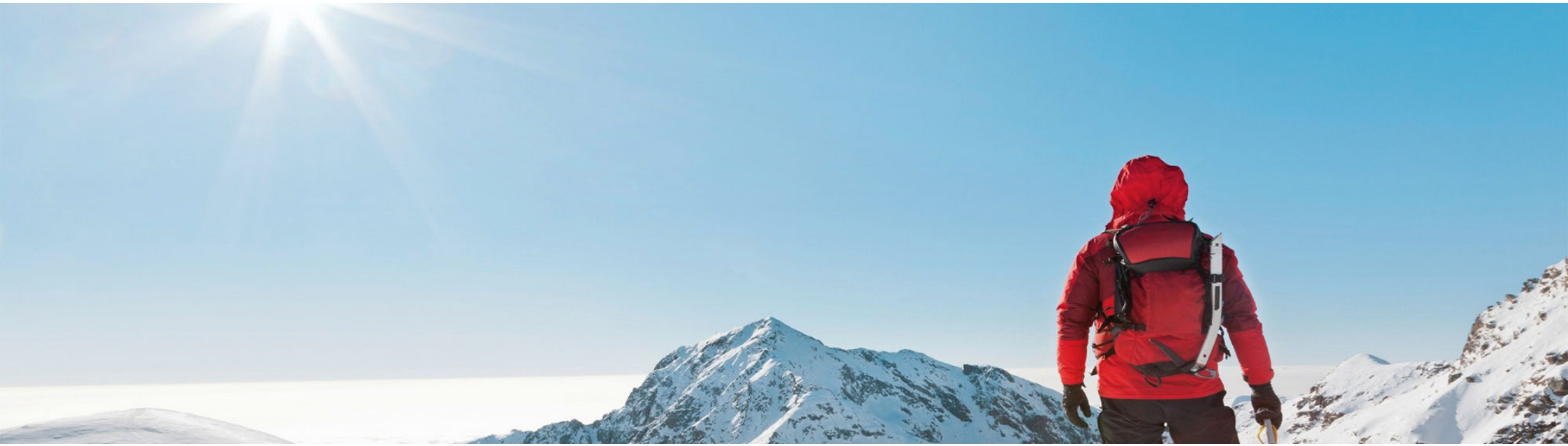


Kryotechnik – die letzten 75 Jahre

… und was kommt jetzt?

Lutz Decker, Hans Quack

DKV-Tagung 2022, Magdeburg

Making our world more productive

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Linde

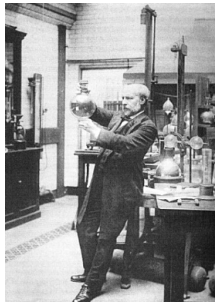
„Prähistorie“ der Kryotechnik...

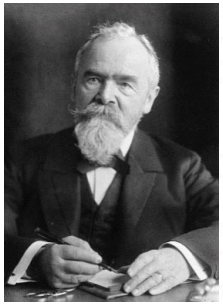
Definition 13. IIR International Congress of Refrigeration (1971 in Washington DC):

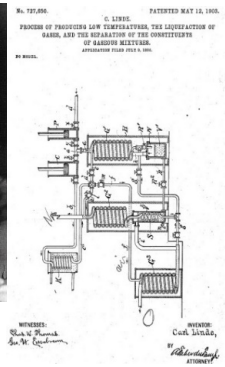
– Kryotechnik: Kühlung bei < 120 K

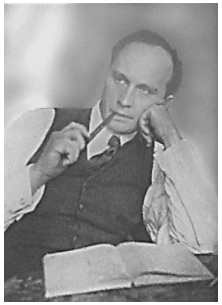
Eckpunkte

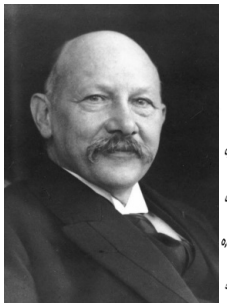
– 1877	L. P. Cailletet	Verflüssigung von O_2 (90 K) & N_2 (77 K)
– 1892	J. Dewar	Verflüssigung von H_2 (20 K)
		Erfindung des „Dewars“ („Thermoskanne“)
– 1895	C. v. Linde / W. Hampson	erste „industrielle“ Luftverflüssigung
– 1908	H. Kamerlingh Onnes	Verflüssigung von He (4.2 K)
		Entdeckung der Supraleitung Typ I (1911)
– 1935	L. Schubnikow	Entdeckung der Supraleitung Typ II

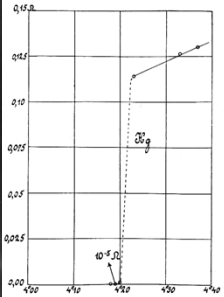












Schwerpunkte:

- Forschung
- Luftverflüssigung & -zerlegung

1947+

„Wieder-“ Gründung des DKV

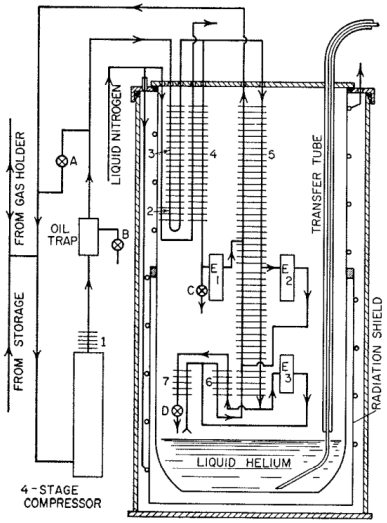
Deutsche Kälte- und Klimatagung DKV Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein

Erster kommerzieller He-Verflüssiger

S. Collins @ MIT

- Einsatz von Kolbenexpandern
- Ohne LH_2-Vorkühlung

→ weltweite 4 K-Forschung



1947+

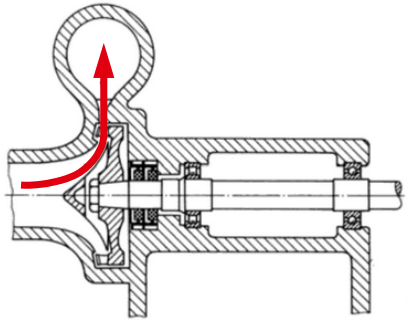
Wiederaufbau von Gesellschaft und Industrie

Großtechnische Anlagen

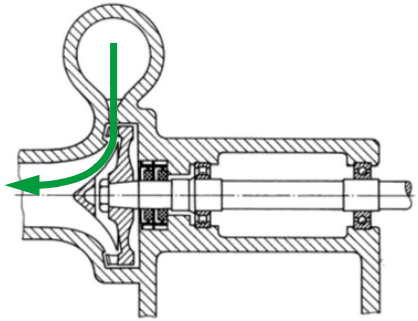
- Effizienzbedarf → Einsatz kryogener Expansionsturbinen

< 1900	Vorteil früh erkannt	Entwicklung gescheitert
→ 1938	P. Kapitza	Zentripetalturbine

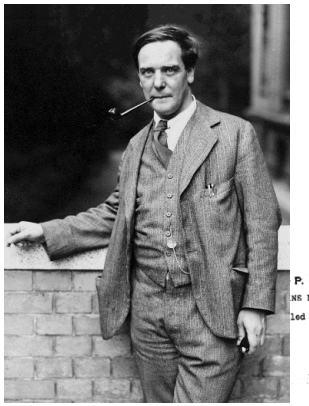
Lehrmeinung
zentrifugal

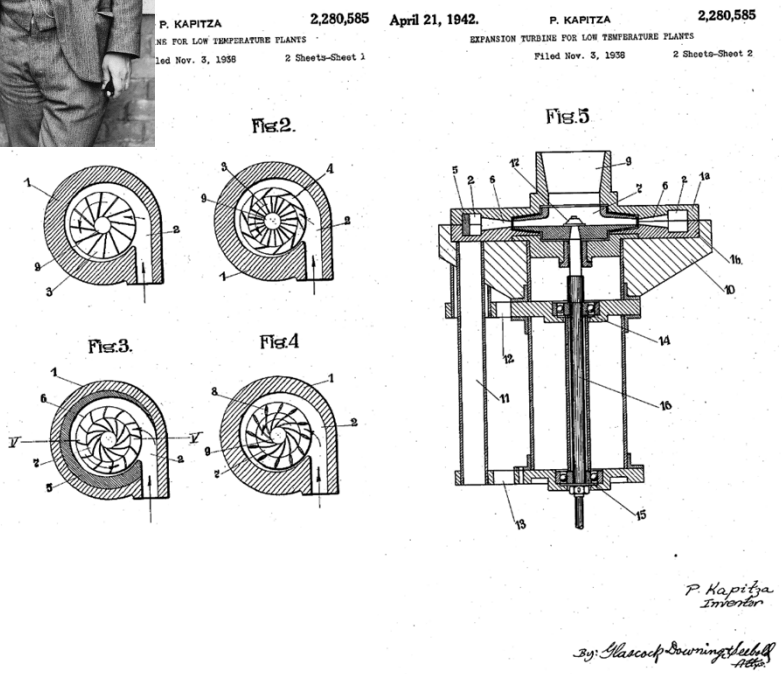


Kapitza
zentripetal



Expansionsturbine in vereinfachter Darstellung
Quelle: Hdb. Der Kältetechnik, Bd. 8, S.457
Farbige Pfeile





1947+

Wiederaufbau von Gesellschaft und Industrie

Großtechnische Anlagen

- Effizienzbedarf → Einsatz kryogener Expansionsturbinen

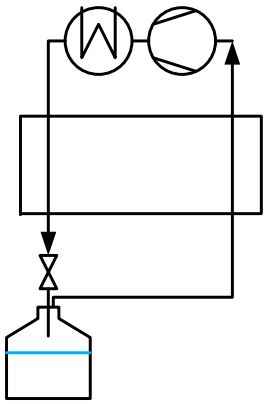
  < 1900 Vorteil früh erkannt Entwicklung gescheitert

  → 1938 P. Kapitza Zentripetalturbine

- Carnot-Wirkungsgrad

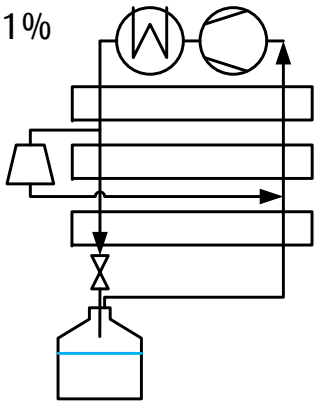
Linde-Hampson-Prozeß

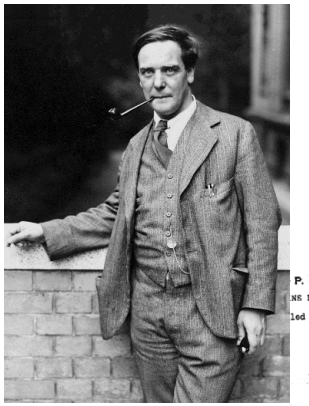
7%

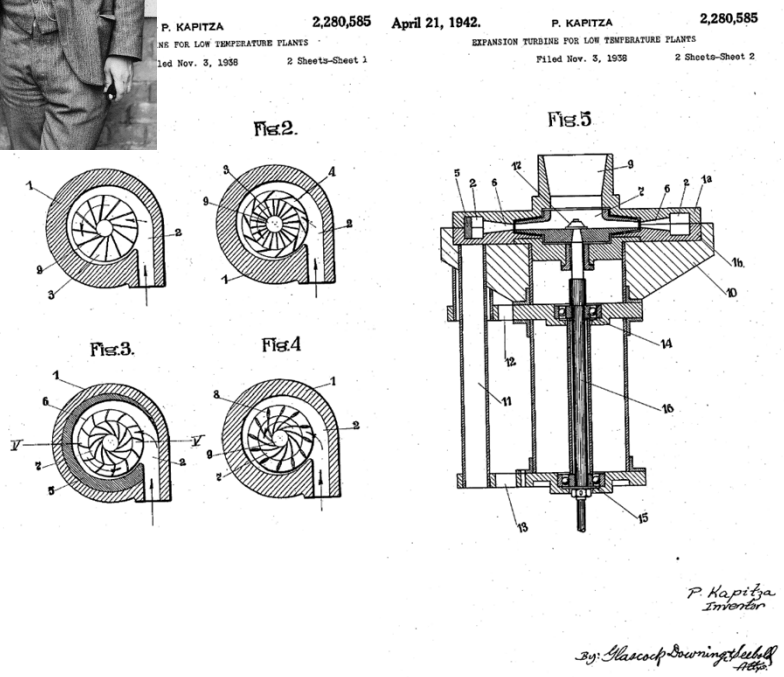


Claude-Prozeß

21%







Neue Anwendungsfelder der Kryotechnik

Kalter Krieg — Tritium-Destillation zur Gewinnung von T_2

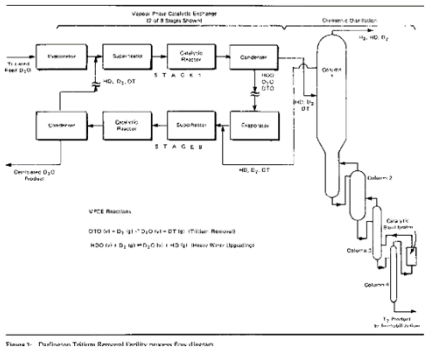
Schwerwasserreaktor in Savannah River Site, SC, USA

© DOE

– Seit 1990 — Tritium-Destillation zur T_2-Abreicherung aus Schwerwasserreaktoren

DTRF in Darlington, Canada

→ Umweltschutz



A. Busigin, 's, Sood, Optimization of Darlington Tritium Removal Facility Performance: Effects of Key Process Variables, Environmental Science, 2013

Neue Anwendungsfelder der Kryotechnik

Hochenergiephysik

1952 → 3 GeV Ringbeschleuniger Cosmotron (Protonen-Synchrotron) @ BNL, Brookhaven NY, USA (ohne Kryotechnik)

Gleichzeitige Erfindungen:

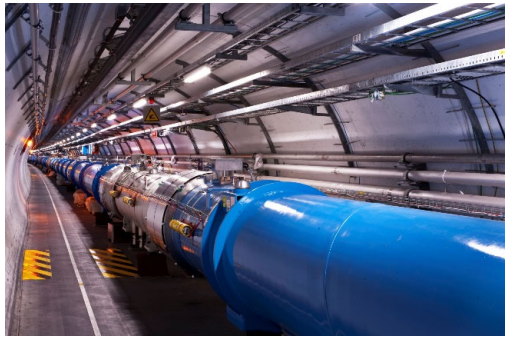
- starke Fokussierung

  mit Hilfe Typ II-Supraleiter

  1960 → 28 GeV CERN-PS

  2015 → 13 TeV CERN-LHC

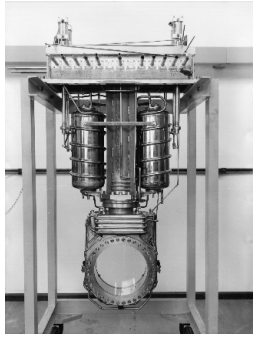
© CERN



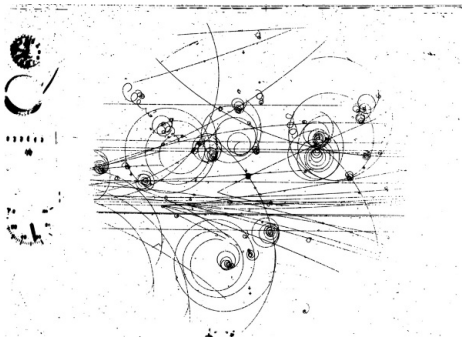
© CERN

- Blasenkammer

  LH_2 als Teilchen-Detektor



© CERN



© CERN

Neue Anwendungsfelder der Kryotechnik

Raumfahrt	LOX & LH_2 als Treibstoff	
1961 - 1973	Saturn	LOX & $RP\text{-}1$ / LOX & LH_2
1981 - 2011	Space Shuttle	LOX & LH_2
1979 - heute	Ariane	LOX & LH_2

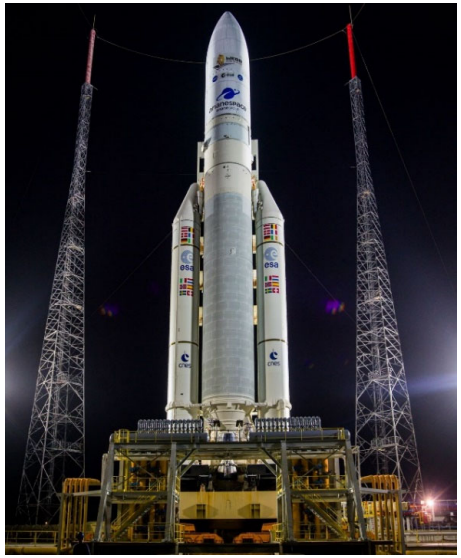
→ Entwicklung von

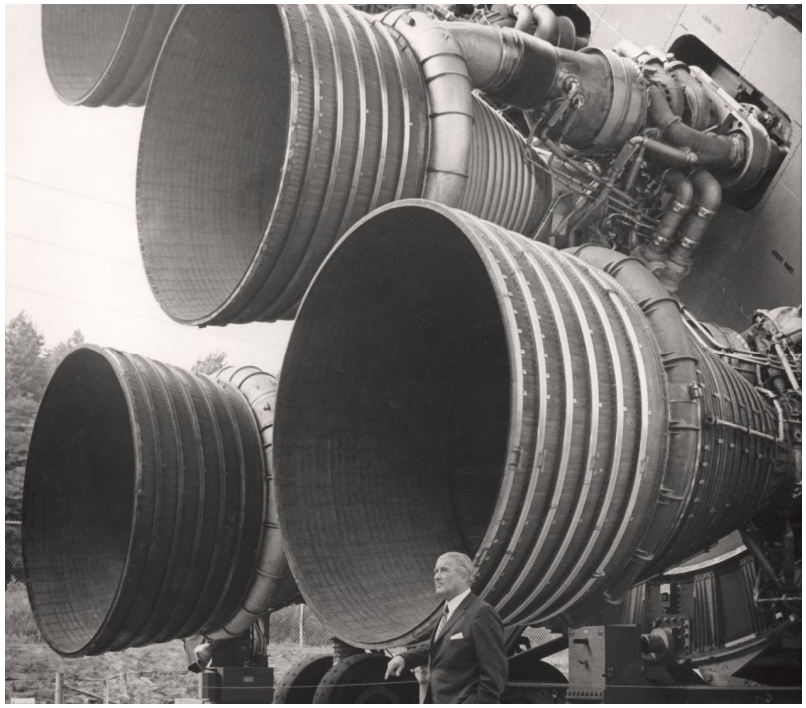
H_2-Verflüssigungsanlagen

LH_2-Speichertanks

LH_2-Pumpen

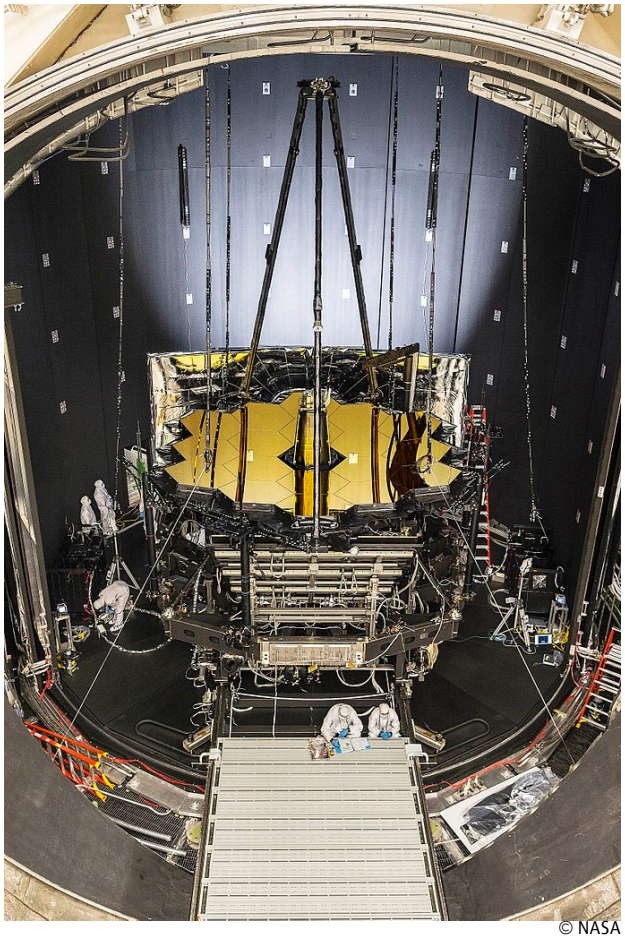
H_2-Sicherheitskonzepte





Neue Anwendungsfelder der Kryotechnik

Raumfahrt	Weltraum-Simulationskammern	
1955 - heute	NASA,ESA, ...	
	Vakuum	< 10^{-5} mbar
	Kühlung	100 K ... 20 K
	Kühlleistung	bis 170 kW @ 80 K
	Sonnensimulator	bis 2‘600 W/m^2
→	Satellitentest	
	zuletzt	James-Webb-Teleskop (JWST)
		getestet bei 20 kW @ 20 K; 100 kW @ 100 kW
	Dez. 21	Start mit Ariane 5 (LOX & LH_2)



© NASA

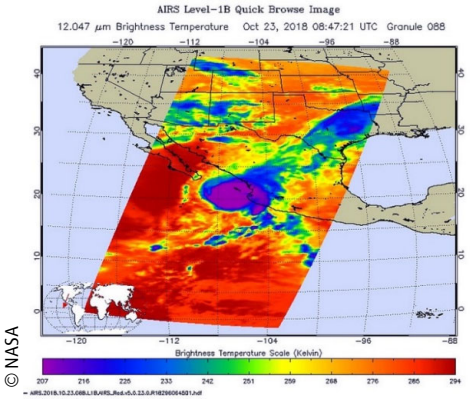
1965+

Neue Anwendungsfelder der Kryotechnik

Kleinkühler (Pulsrohr, Stirling, GM) für…

IR-Sensoren Militär, Astronomie, Alltag, …

- MIRI-Kamera JWST
  - Vorkühlung: Pulsrohr
  - Kühlung: Joule-Thomson
- Wettersatelliten



© NASA

Kernspintomograph

- Rückverflüssigung von Helium

© Siemens Healthineers

© NASA

Säulen der Schöpfung

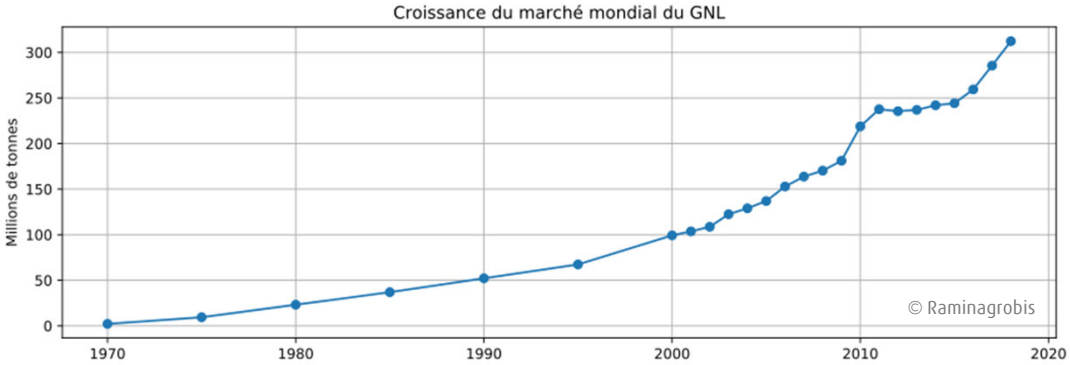
Neue Anwendungsfelder der Kryotechnik

LNG-Transport @ 120 K

- 1965 1. speziell gebauter LNG-Tanker „Methane Princess“
  27‘400 m³ LNG
- > 640 LNG Tanker bis zu 266‘000 m³ LNG
  + 200 LNG Tanker bis 2025 ROK, CN, RU
- größte installierte Kapazität:
  Nigeria LNG 23.5 MTPA
  6 Erdgas-Verflüssiger

→größte kryogene Anlagen der Welt → LNG, ASU
(100 MW Antriebsleistung für 4.5 MTPA)

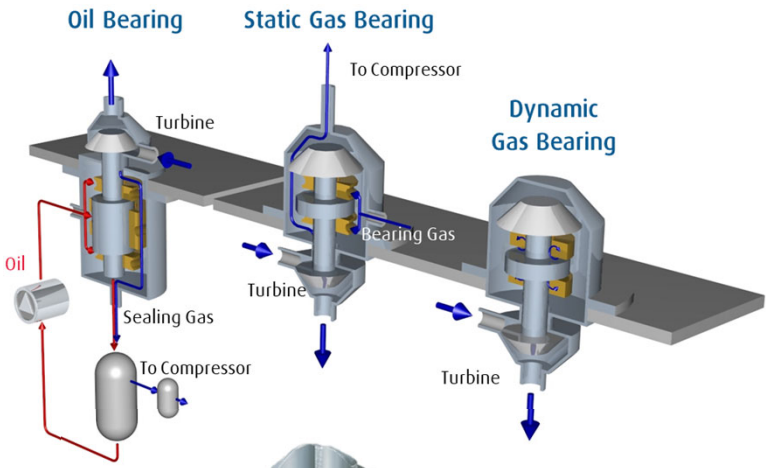
ARCTIC PRINCESS vor Hammerfest



Entwicklungen in der Kryotechnik

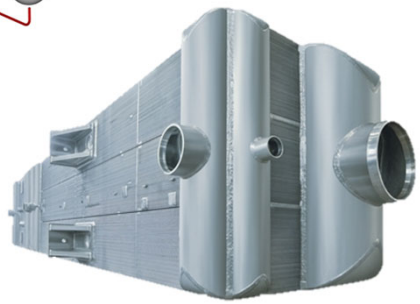
Expansionsturbinen

- Lagerung: Öllager → statische Gaslager → dynamische Gaslager
  - statische Gaslager: höhere Drehzahl
  - dynamische Gaslager: höhere Drehzahl, effizienter, verschleißfrei
- Laufrad: 2D → 3D
  - 3D: kompakter, effizienter



Wärmetauscher

- Gegenstrom: Rohr in Rohr (W. Siemens, 1857) → Rohrbündel → PFHX
  - Rohrbündel: kompakter, effizienter
  - PFHX: kompakter, effizienter



He-Kompressoren

- Labyrinthkolben-Kompressor → Schraubenkompressor mit Öleinspritzung
  - CAPEX↓↓ OPEX↑, wartungsarm, konstante Leistung aber: Öl → Ölabscheidung

Neue Herausforderungen für die Kryotechnik

Großindustrielle Wasserstoffverflüssigung

- Verflüssiger

  steigende Anlagenkapazität [TPD]

bisher	aktuell	kurzfristig	langfristig
5	15	50	150+

- Speicher [m³]

300	1‘200	4‘000	40‘000

- Lade-/Entlade-System

  Demo

- Tankschiff

  Demo „Suiso Frontier“ 1‘250 m³

  langfristig 160‘000 m³

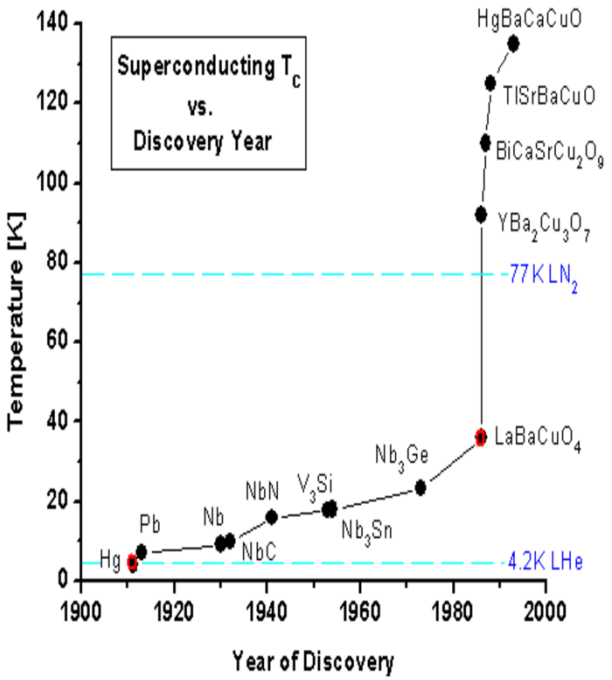
© Kawasaki Heavy Industries

© Kawasaki Heavy Industries

Neue Herausforderungen für die Kryotechnik

Supraleiter Typ II

- 1961 supraleitende Magnete Anwendung in Teilchenphysik und NMR-Spektroskopie



hoffman.physics.harvard.edu/materials/SCintro.php

Hochtemperatur-Supraleiter (HTSL)

- 1986 Entdeckung der Hochtemperatur-Supraleitung

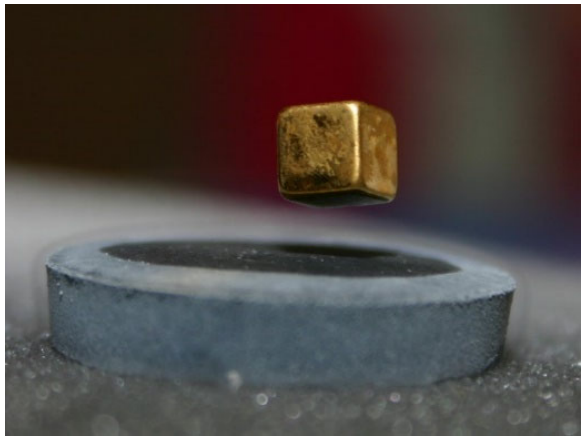
  K. A. Müller/J. G. Bednorz

  Keramik 35 K … 138 K

  Problem:

  äußerst spröde (Porzellan)

  sehr teuer



„Hochdruck-Supraleiter“

- 2018 z.B. LaH_{10} @ ~250 K (-23°C) ~170 GPa (1‘700‘000 bar!)

Neue Herausforderungen für die Kryotechnik

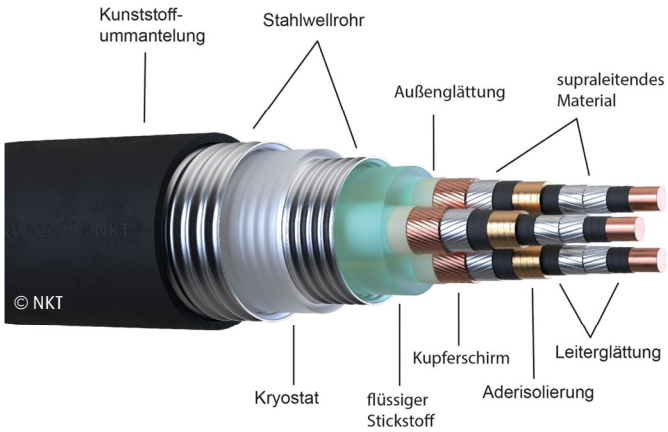
Hochtemperatur-Supraleiter → Hochfeld-Supraleiter

- Stromnetz

Demonstrationen	<< 1 km	Teststrecke
Stadtwerke München	12 km	Betrieb

→ effizienter, billiger, höhere Umsetzbarkeit des Kabelkanals

Status: Komponententest (HTSL-Kabel, Kryostat,...)



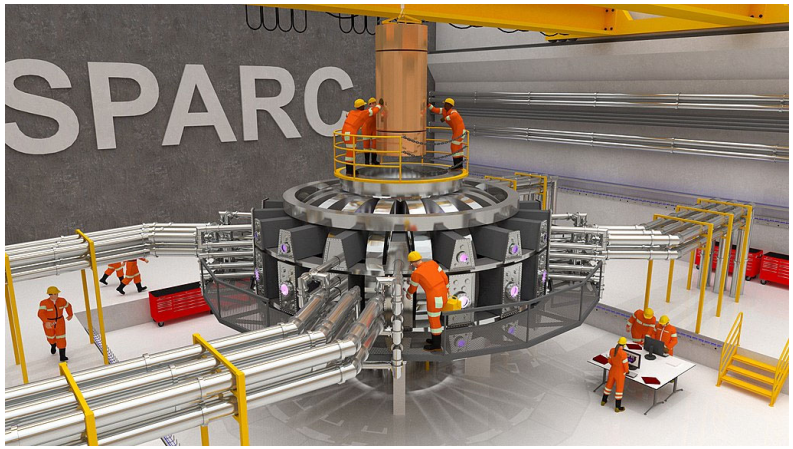
- Fusion Fortschritte durch

- KI	(EPFL)	nicht kryogen...
- verbesserte HTSL-Magnete	30 T	(Hochfeld)
	HTSL @ 8 K!	

→ bessere Kontrolle des Plasmas

→ kompaktere Bauweise, günstiger

→ höhere Leistung über längere Zeit



© Commonwealth Fusion Systems

Neue Herausforderungen für die Kryotechnik

Rechenzentren

Hohe Rechenleistung → Hohe Leistungsaufnahme → starke Erwärmung

- Klimatisierung
- Leistungslimitierung der Rechenzentren

Lösung:

- gezielte kryogene Kühlung innerhalb der Computerarchitektur

  → Reduktion der Leckströme und Leiterwiderstände konventioneller Systeme

  80 K / 4.5 K je nach Baustein

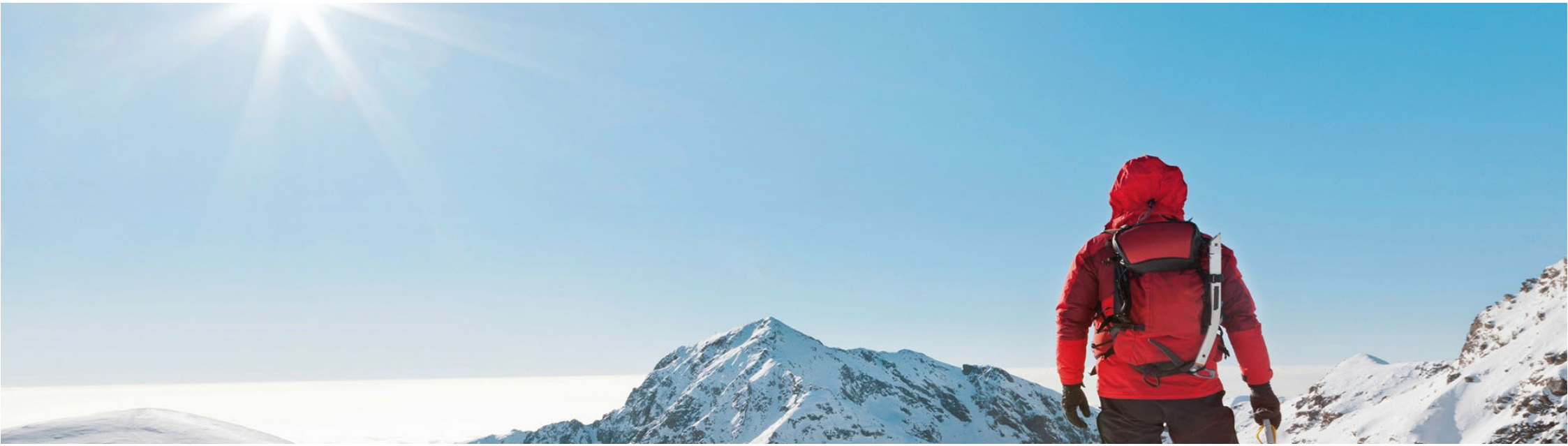
- 10 mK (Quantencomputer)

  Ausnutzung der Quantenmechanik, Kühlung mit Mischungskryostaten ($^3He/^4He$)

  Status: Systeme mit < 100 qubits Vorkühlung mit Kleinkühlern

  nächster Schritt: Systeme mit > 1‘000 qubits Vorkühlung mit kryogenen Kälteanlagen

© Bluefors



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

L. Decker, Linde Kryotechnik AG, Pfungen
Prof. H. Quack, TU Dresden

Making our world more productive

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Linde