

Betrieb und Zuverlässigkeit von Flüssigstickstoff-Kühlsystemen für supraleitende Kabel

Dr.- Ing. Friedhelm Herzog / Messer Group GmbH

ZIEHL VI - Tagung, Berlin 21.03.2018



Dr.- Ing. Friedhelm Herzog

- Studium: Maschinenbau, RWTH Aachen (D)
- Messer Griesheim: seit 1990 (Messer Group: seit 2004)
- Kryoprozesstechnik (Entwicklung, Anwendung, Vertrieb)
- Abteilungsleiter (international agierende Ingenieure)
- Job Title: Senior Manager
 Application Technology
 Industry





Das Unternehmen

Messer ist das weltweit größte eigentümergeführte Industriegasunternehmen.

Umsatz: 1,2 Mrd. €

Mitarbeiter: > 5.000

Die Produkte

Sauerstoff, Stickstoff, Argon, Kohlendioxid, Wasserstoff, Helium, Schweißschutzgase, medizinische Gase, Lebensmittelgase, Gasmische.

Die Kunden

Produkte und Anwendungstechnologien für fast alle Industriebranchen, das Gesundheitswesen sowie Forschung und Wissenschaft.

AmpaCity –
das längste Supraleiterkabel der Welt

ein Projekt der RWE Deutschland AG (Innogy)

in Kooperation mit:

- Nexans
- KIT (Karlsruher Institut für Technologie)
- PTJ (Bundesforschungsministerium)
- Messer



- ➔ Kabel / Kryostat
- ➔ wissenschaftliche Begleitung
- ➔ Fördermittel
- ➔ Kühlanlage / Flüssigstickstoff

AmpaCity –
das längste Supraleiterkabel der Welt

ein Projekt der RWE Deutschland AG (Innogy)

in Kooperation mit:

- Nexans
- KIT (Karlsruher Institut für Technologie)
- PTJ (Bundesforschungsministerium)
- Messer



**Innovationspreis für Klima
und Umwelt (IKU – 2015)
BMU / BDI**

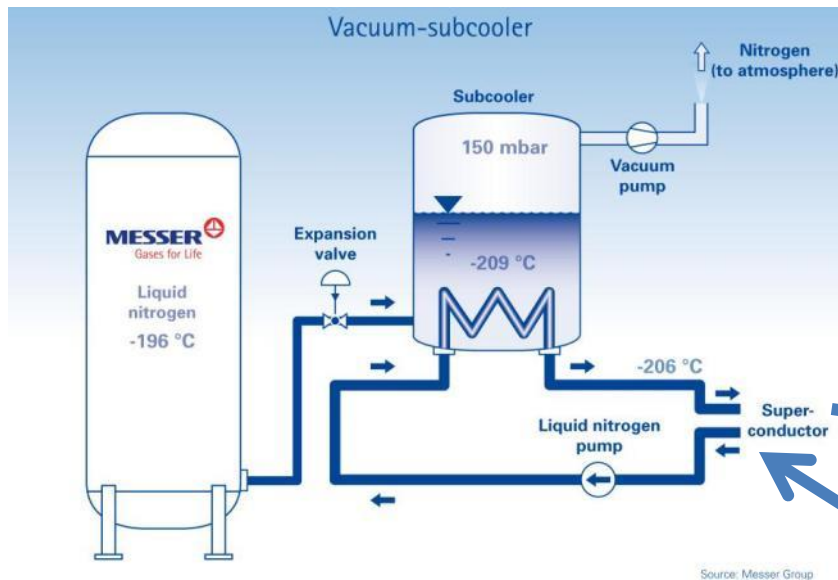
Projektdaten

Ort: Essen, Deutschland

- Kabellänge: 1.000 m
- Spannung: 10.000 V
- Leistung: 40.000 kW
- Kälteleistung: 4 kW
- Kühltemperatur: - 206°C
(67 K)
- Inbetriebnahme: 02/2014

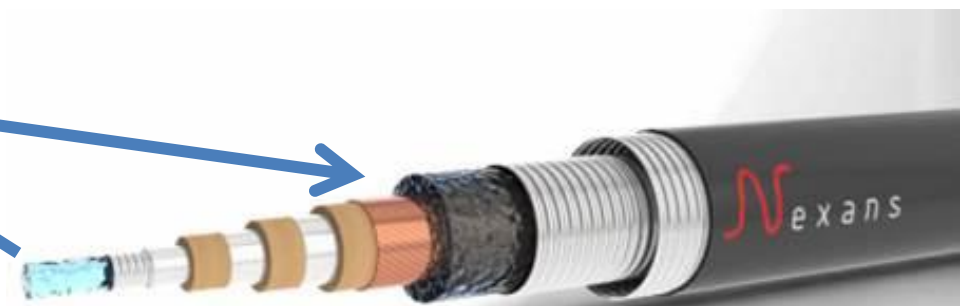


Die wichtigsten Komponenten:

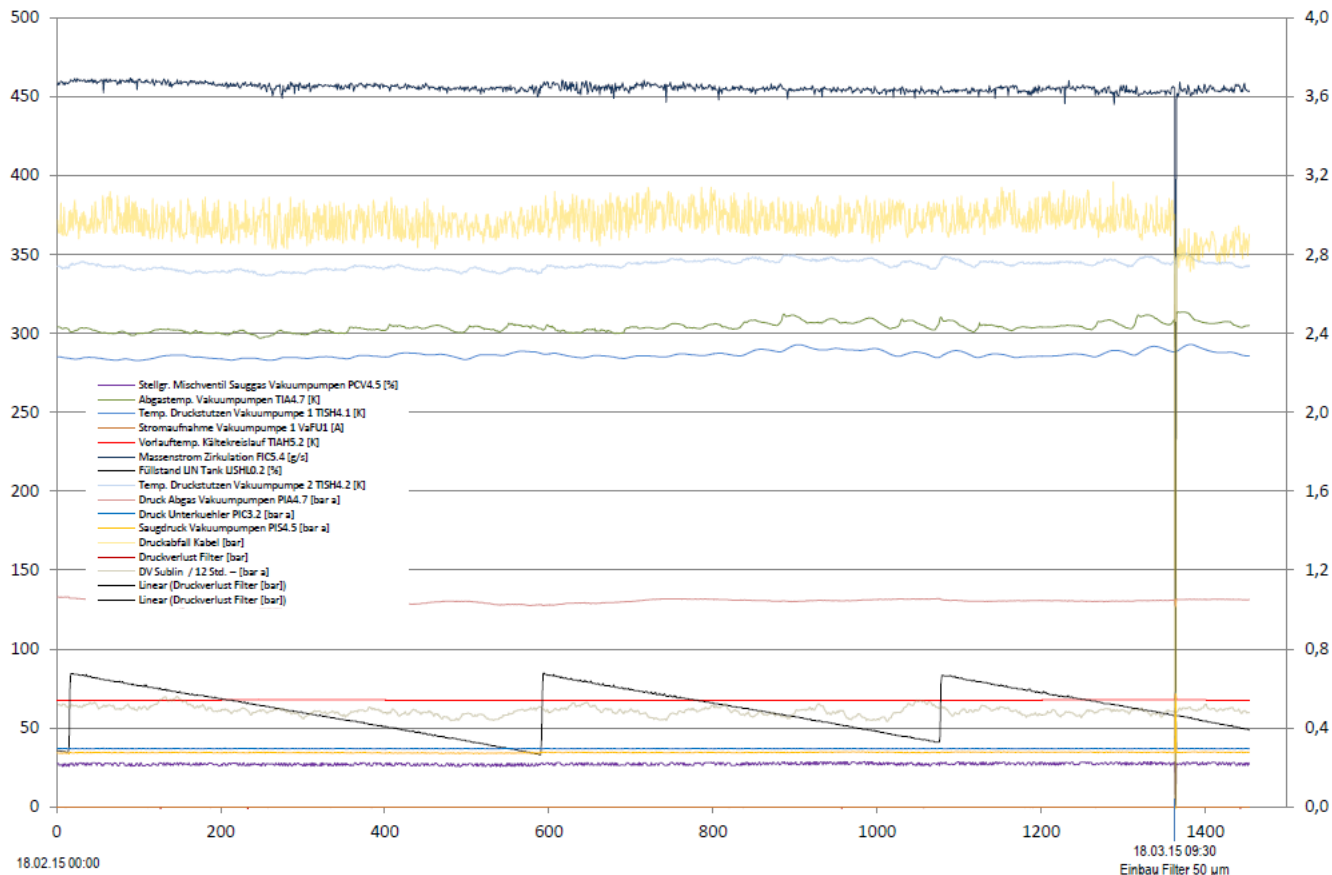


Nexans (Kabel)

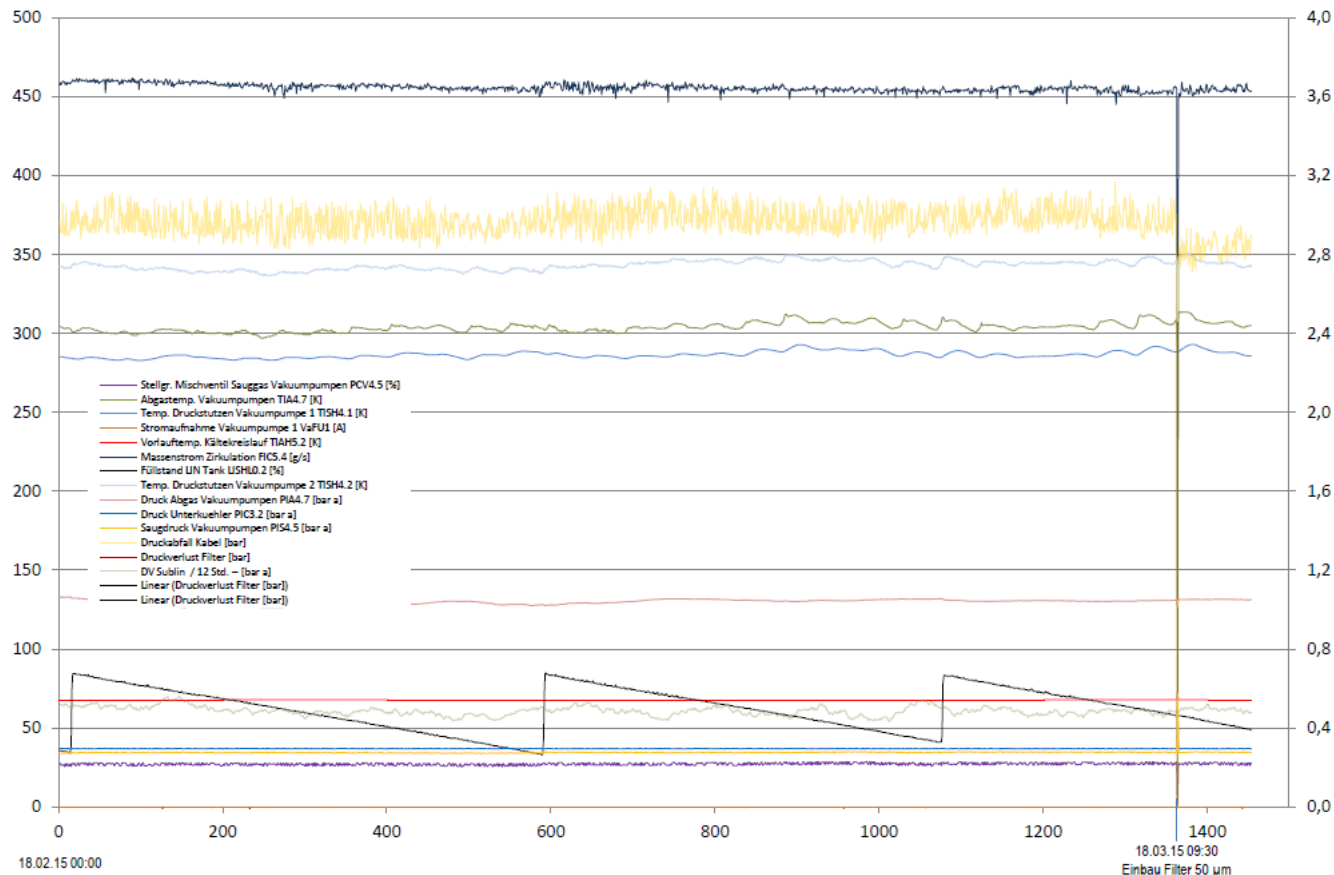
Messer
(Kühl- und Pumpanlage)



- Ausschnitt:
ca. 1 Monat
- 3 Betankungen
- Filterwechsel
am 18.03.2015
im laufenden
Betrieb

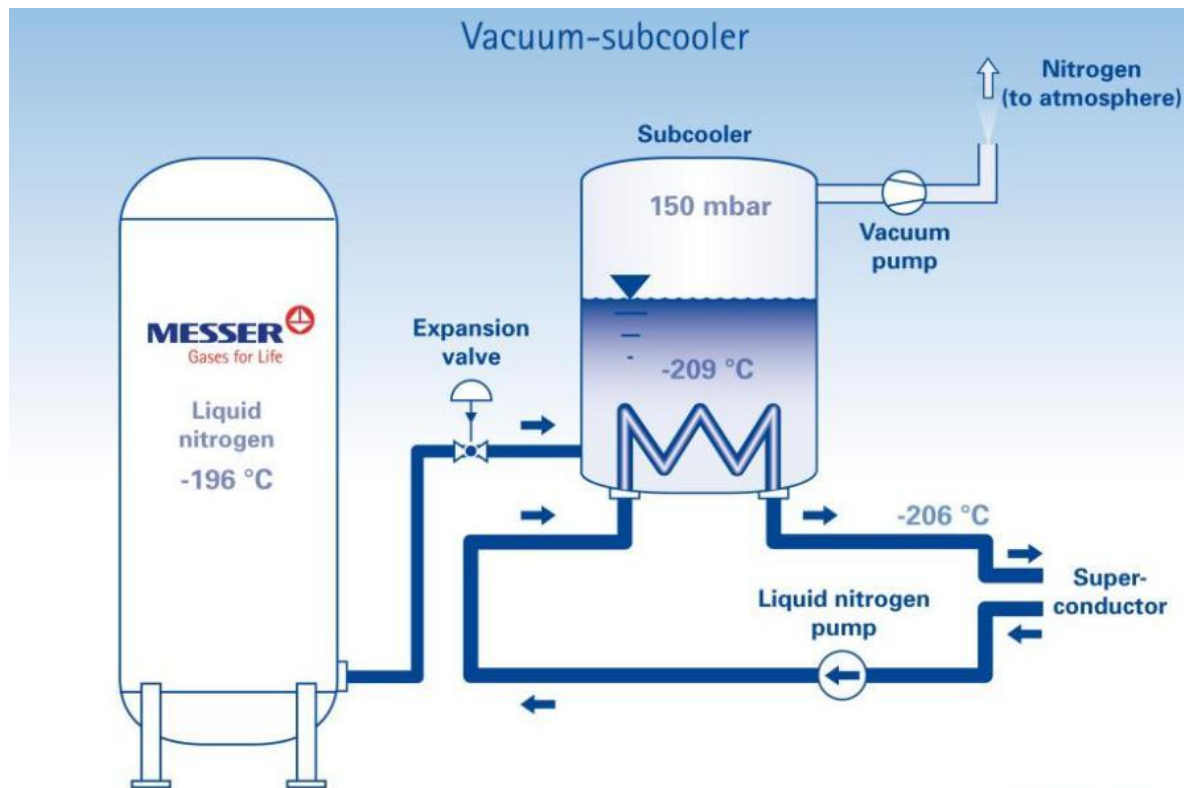


- Ausschnitt:
ca. 1 Monat
- 3 Betankungen
- Filterwechsel
am 18.03.2015
im laufenden
Betrieb



Schema

- Wärmeabfuhr durch flüssigen Stickstoff (LIN)
- Kälteerzeugung durch Verdampfung von LIN



Source: Messer Group

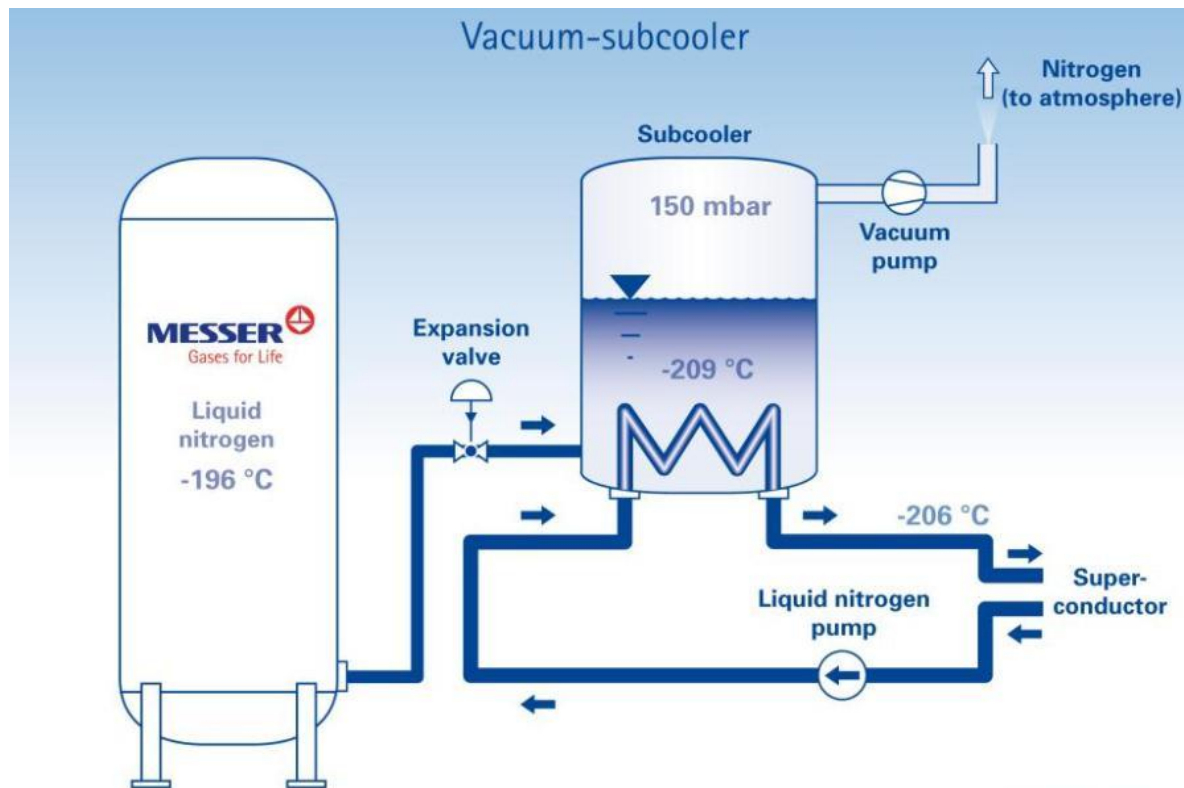
Schema

- Wärmeabfuhr durch flüssigen Stickstoff (LIN)

Kühltemperatur: -206°C

- Kälteerzeugung durch Verdampfung von LIN

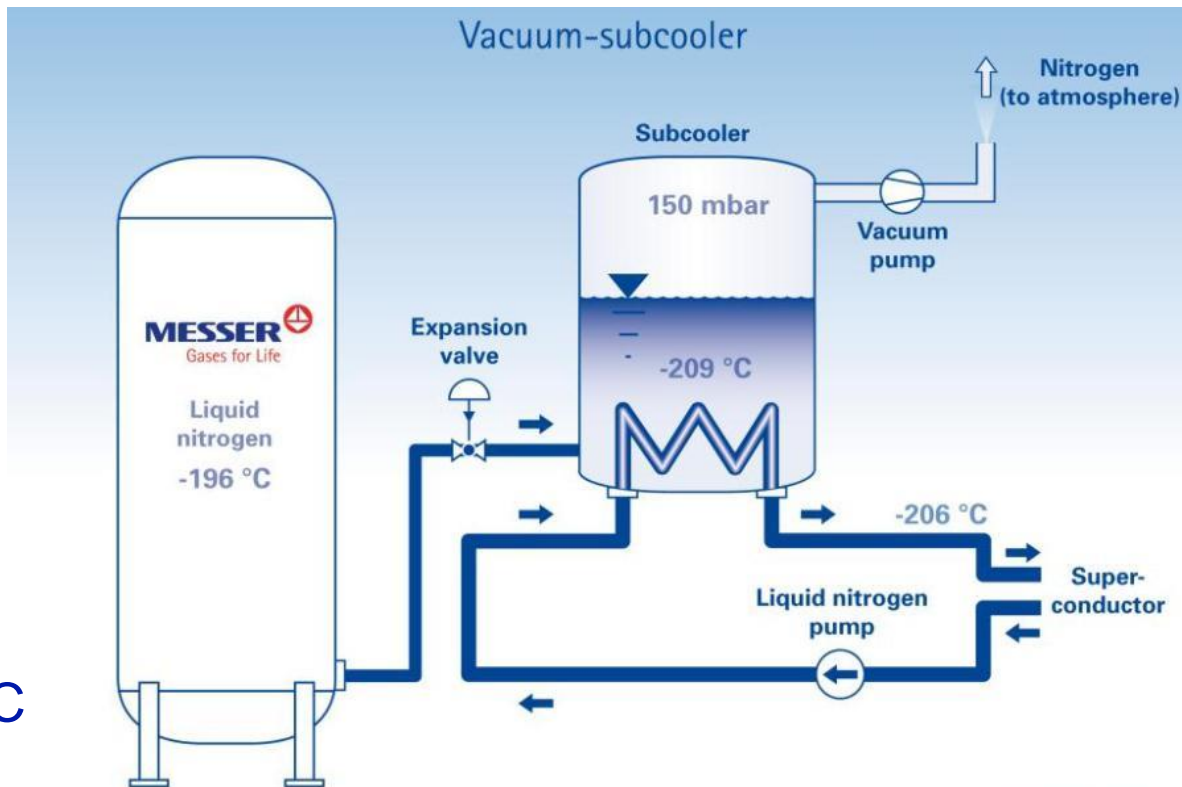
Verdampfungstemperatur: -209°C (nicht -196°C)



Source: Messer Group

Schema

- Wärmeabfuhr durch flüssigen Stickstoff (LIN)
Kühltemperatur: -206°C
- Kälteerzeugung durch Verdampfung von LIN
Verdampfung im Vakuum bei 150 mbar(a) $\rightarrow -209^{\circ}\text{C}$
(LIN wird fest bei -210°C)



Source: Messer Group

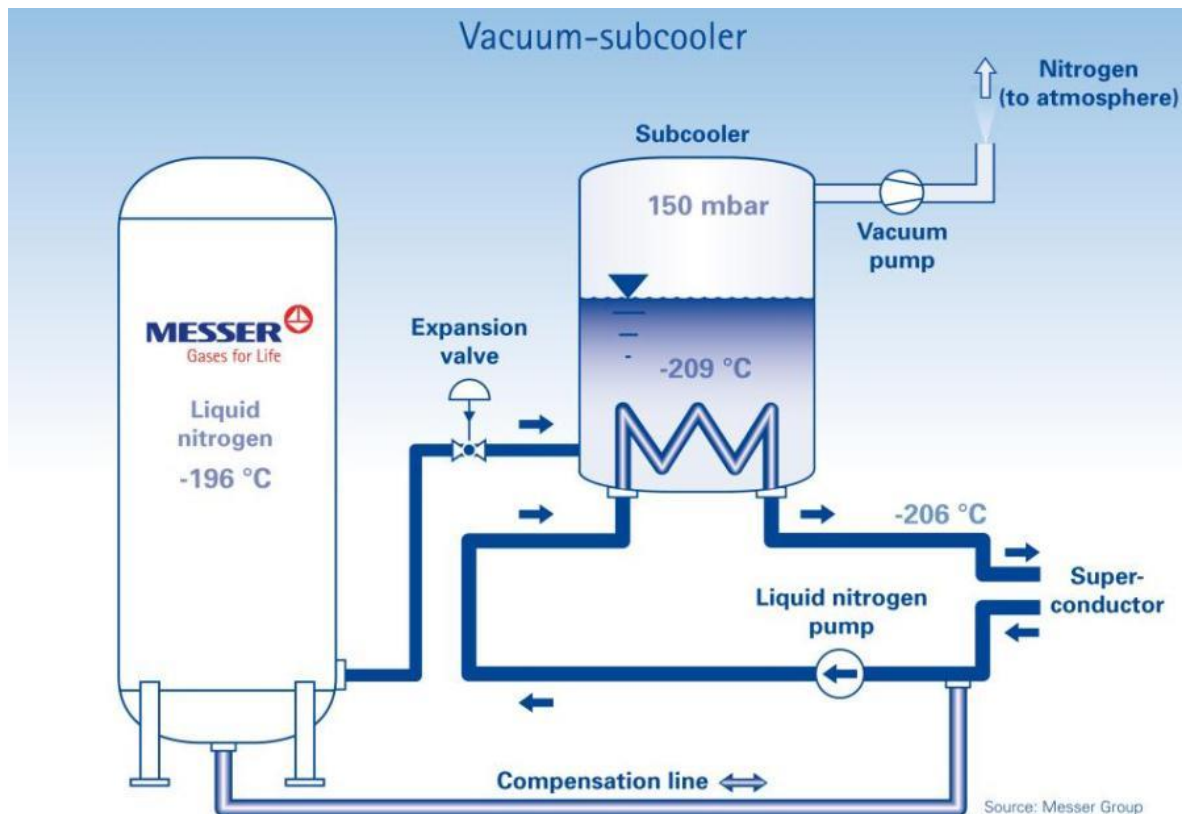
Schema

Flüssigstickstoff- Tankanlage:

- Vorratsbehälter
- Ausgleichsbehälter



Tankanlage ist funktionaler Bestandteil der Kühlanlage



Schema

Flüssigstickstoff- Tankanlage:

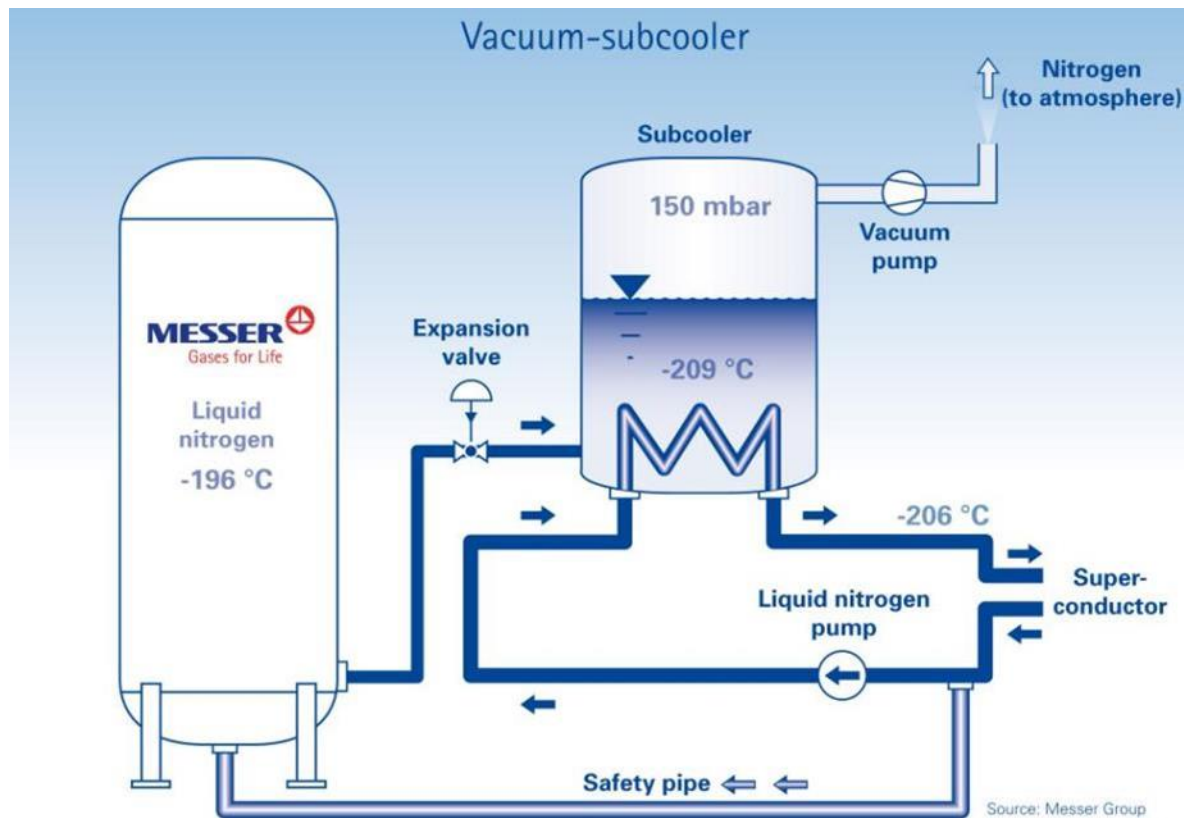
- Vorratsbehälter
- Ausgleichsbehälter



Tankanlage ist funktionaler Bestandteil der Kühlanlage

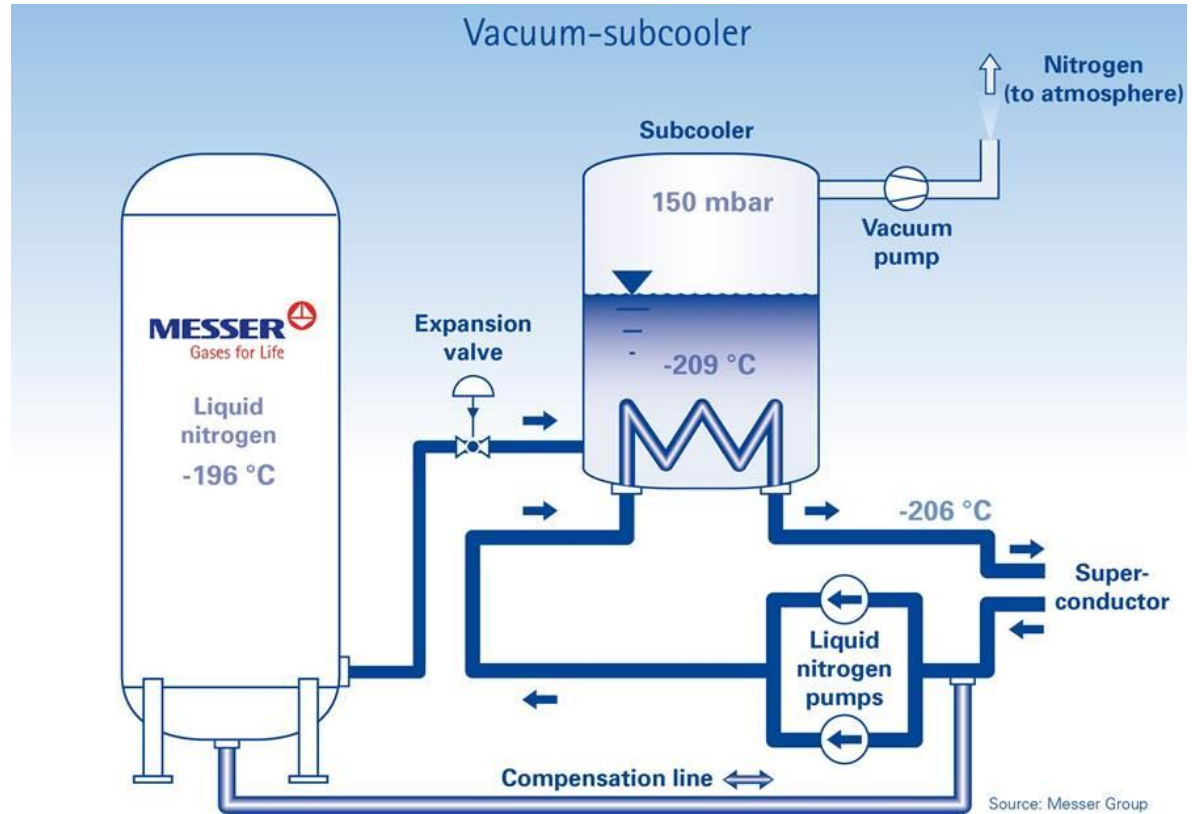


mit Sicherheitsfunktion



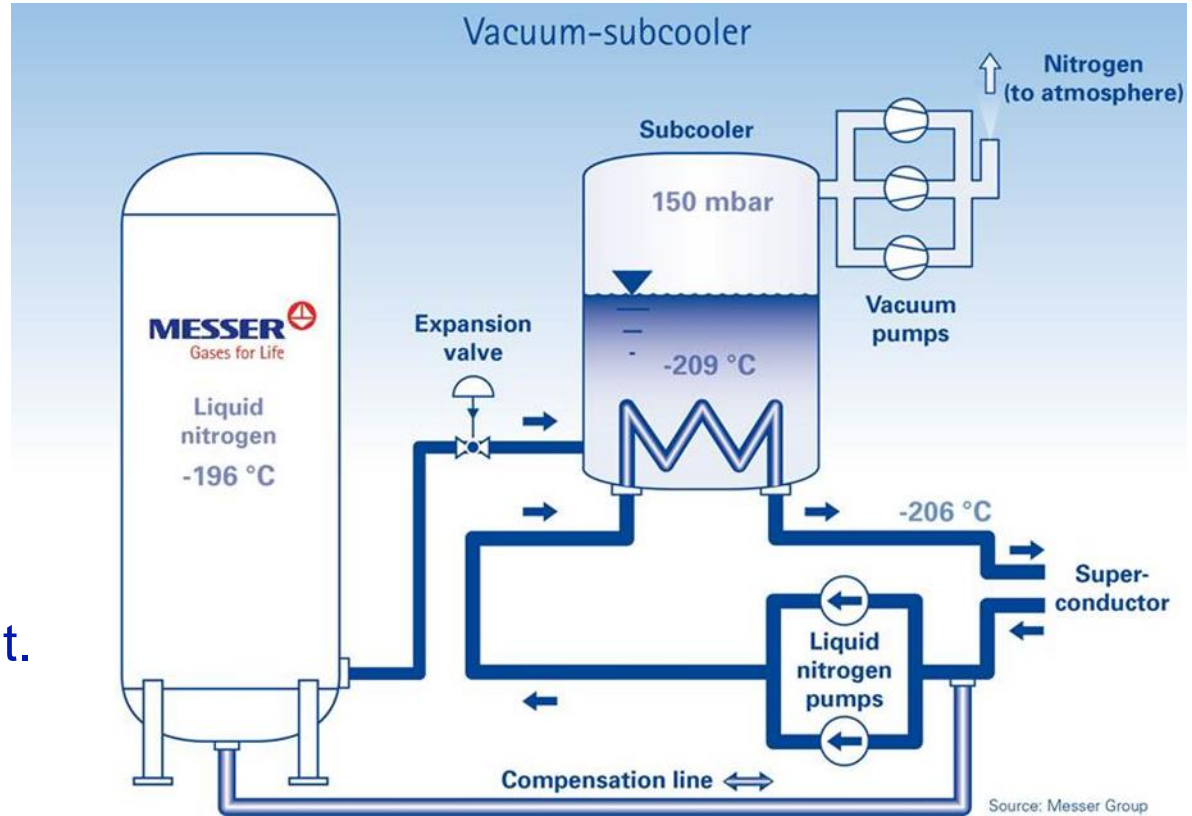
Redundanz

- 2 Zirkulationspumpen (Wartung / Störung)



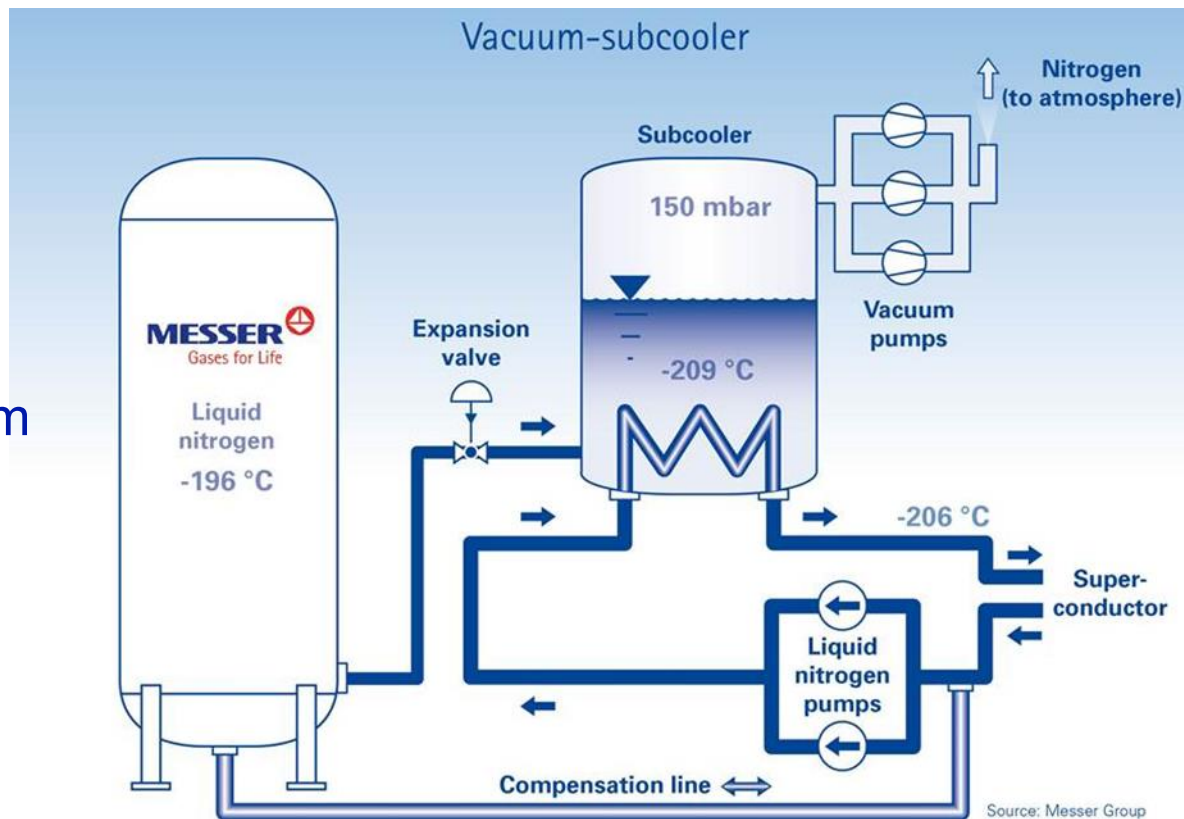
Redundanz

- 2 Zirkulationspumpen (Wartung / Störung)
- 3 Vakuum-Pumpen (2 in Betrieb bei Vollast)
- Aktuell wird nur eine Vakuum-Pumpe benötigt.



Redundanz

- Mehrkosten bei „offenem“ System:
→ 5%
- Mehrkosten bei „geschlossenem“ System (Maschinenkühlung):
→ > 100 %



Flüssigstickstoff – und Elektroenergieverbrauch

	cooling-demand (cable)	liquid nitrogen consumption	P _{el.} vacuum pumps	P _{el.} other components	P _{el.} total
design	4.0 kW	110 kg/h	9 kW	4 kW	13 kW
regular operation	1.8 kW	68 kg/h	5 kW		9 kW
cable-bypassed	0.0 kW	32 kg/h	3 kW		7 kW

Flüssigstickstoff – und Elektroenergieverbrauch

	cooling-demand (cable)	liquid nitrogen consumption	P _{el.} vacuum pumps	P _{el.} other components	P _{el.} total
design	4.0 kW	110 kg/h	9 kW	4 kW	13 kW
regular operation	1.8 kW	68 kg/h	5 kW		9 kW
cable-bypassed	0.0 kW	32 kg/h	3 kW		7 kW

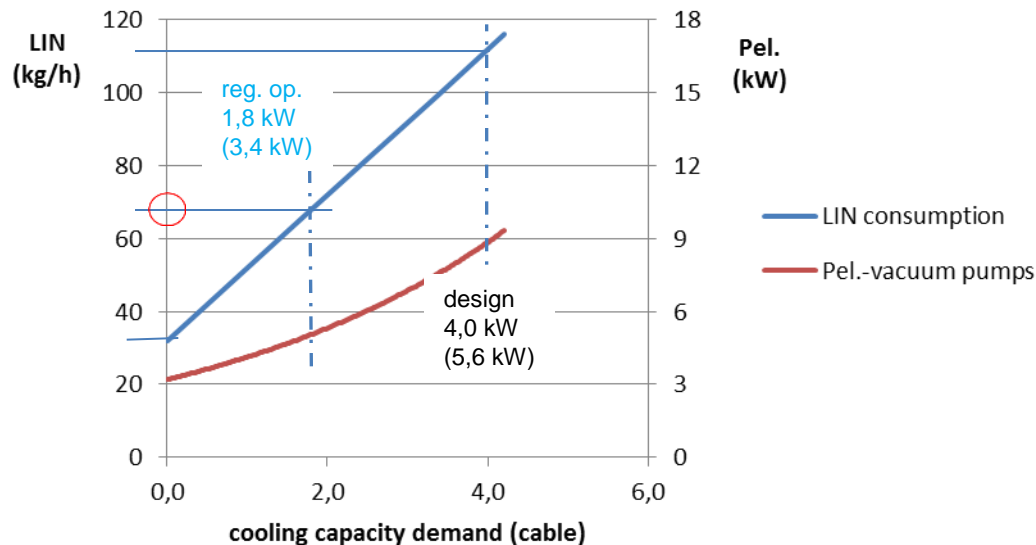
Flüssigstickstoff – und Elektroenergieverbrauch

Kältebedarf aktuell:

- **Kabel:** 1,8 kW
- **gesamt:** 3,4 kW

Kältebedarf - Auslegung:

- **Kabel:** 4,0 kW
- **gesamt:** 5,6 kW



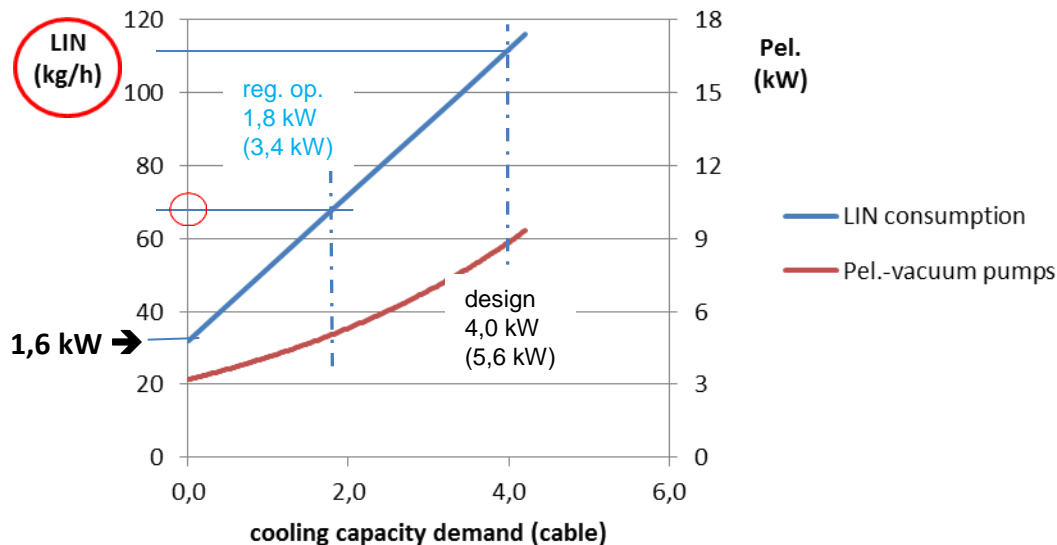
Flüssigstickstoff – und Elektroenergieverbrauch

Kältebedarf aktuell:

- Kabel: 1,8 kW
- gesamt: 3,4 kW

Kältebedarf - Auslegung:

- Kabel: 4,0 kW
- gesamt: 5,6 kW



Energiebedarf aktuell (Kälte und Elektroenergie)

- Stickstoff-Verflüssigung (68 kg/h): 33 kW
- elektrischer Strom (Kühlanlage): 9 kW
- LKW-Diesel (2.500 l/a): entspricht ca. 1 kW



Luftzerleger



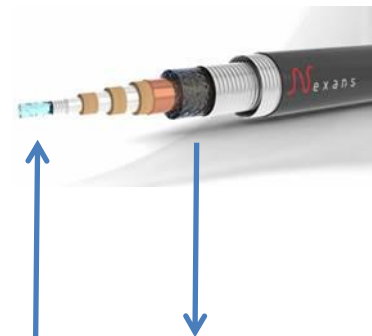
➔ Transport



➔ Tank



➔ Kühlanlage



Energiebedarf aktuell (3,4 kW Kälte @ 64 K):

→ Flüssigstickstoff (LIN):	68 kg/h
• N ₂ -Verflüssigung (el. Strom):	33 kW
• Transport (130 km) – Diesel → Strom:	1 kW
• P _{el.} (Vakuumpumpen):	5 kW
• <u>P_{el.} (sonstige Verbraucher):</u>	<u>4 kW</u>
Summe:	43 kW



Energiebedarf aktuell (3,4 kW Kälte @ 64 K):

→ Flüssigstickstoff (LIN): 68 kg/h

• N₂-Verflüssigung (el. Strom): 33 kW

• Transport (130 km) – Diesel → Strom: 1 kW

• P_{el.} (Vakuumpumpen): 5 kW

• P_{el.} (sonstige Verbraucher): 4 kW

Summe: 43 kW

• zum Vergleich:



P_{el.} für Stirling-Kältemaschine: 75 bis 100 kW

(je nach Kühlwasser-Verfügbarkeit)



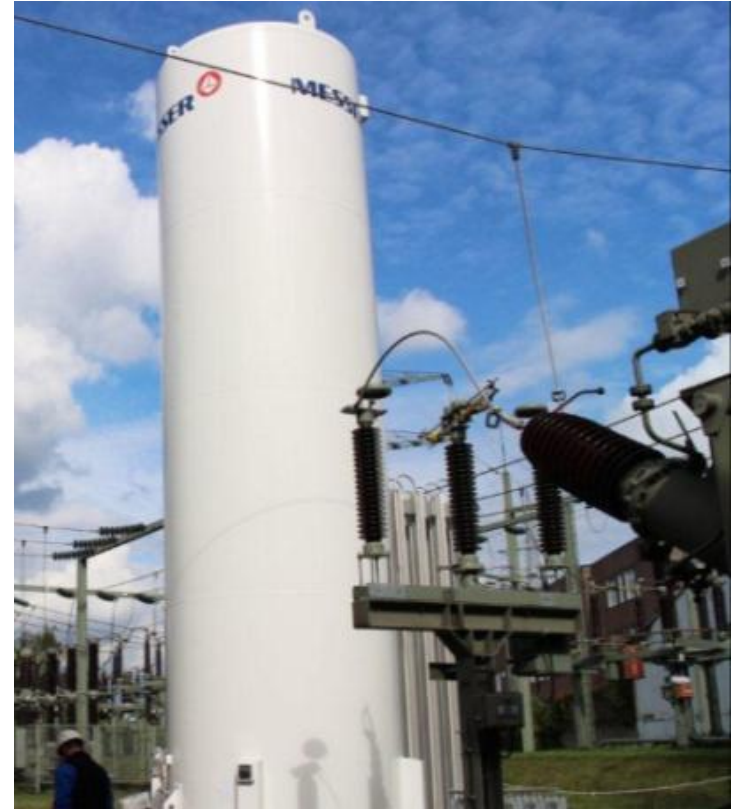
Kühlanlage beim FAT - 09.10.2013 - (factory acceptance test)

- links: Schaltschrank
- unten:
Zirkulationspumpen
- rechts: Vakuum-Pumpen



Tank - Installation

- 19.09.2013
- Transport
- Aufstellung
- Montage



auf der Baustelle



Installation von:
Kühlanlage
LIN-Tank
HTS-Kabel

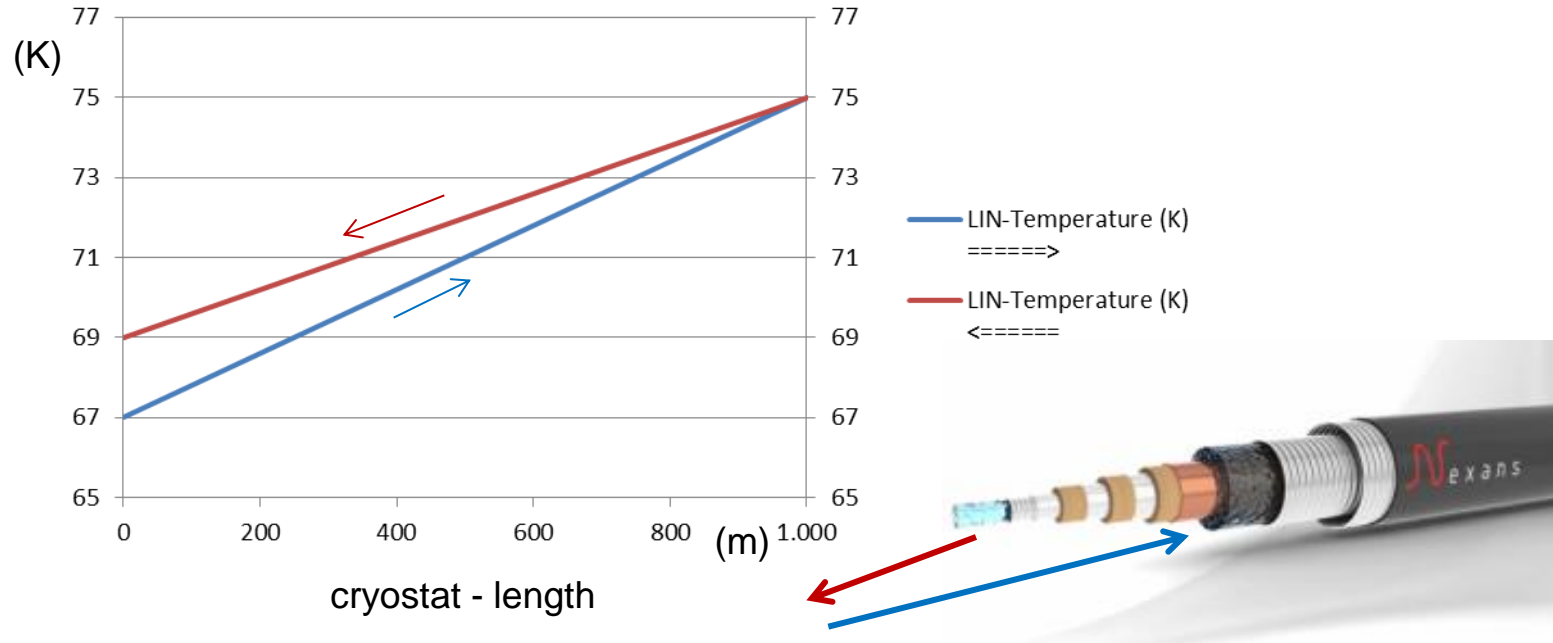
Foto: Kühlanlage (fertig)

Zeitplan

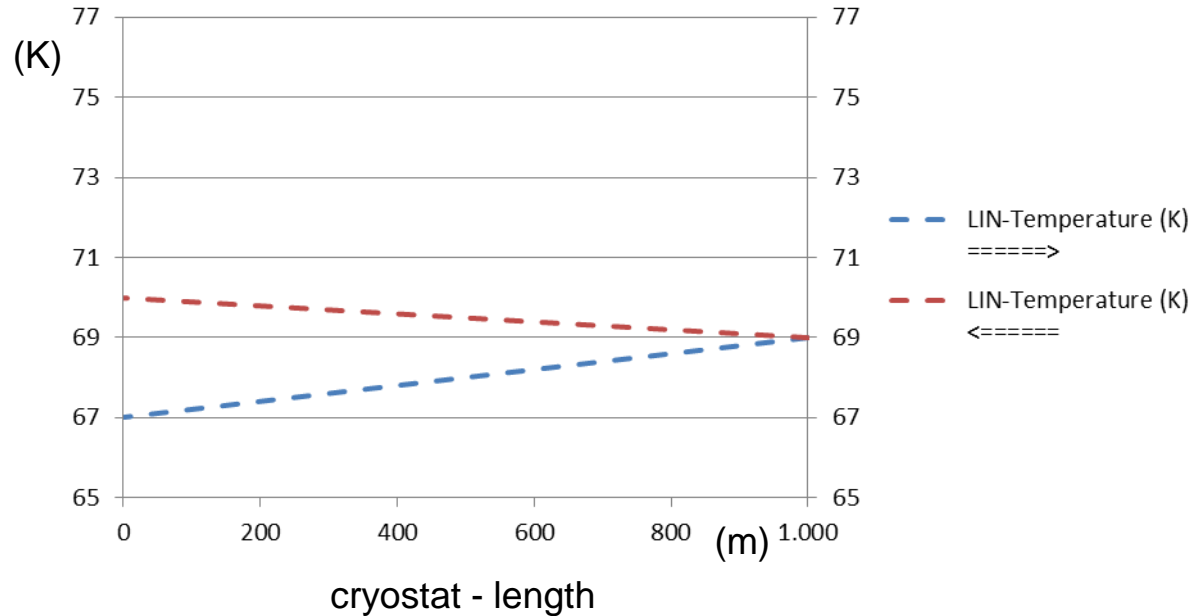
- Tank-Aufstellung: 09 / 2013
- Kabel-Installation: 10 / 2013
- Montage Kühlanlage: 11 / 2013
- Funktionstest: 12 / 2013
- Inbetriebnahme: 02 / 2014
- **regulärer Betrieb: seit 03 / 2014**



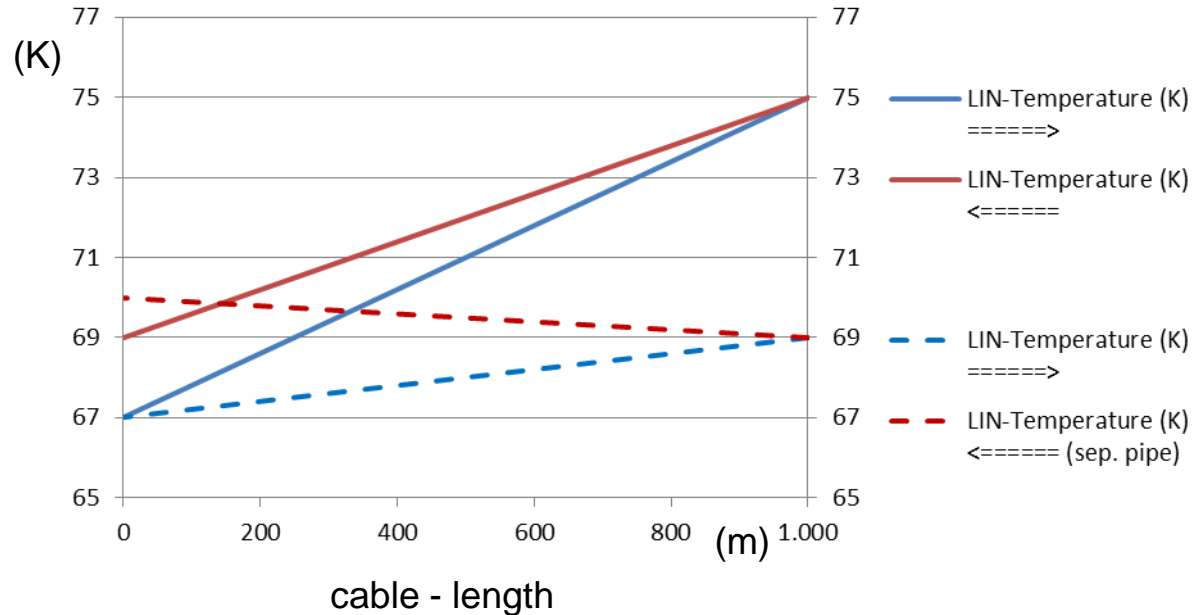
Liquid Nitrogen Temperature inside the Cable-Cryostat



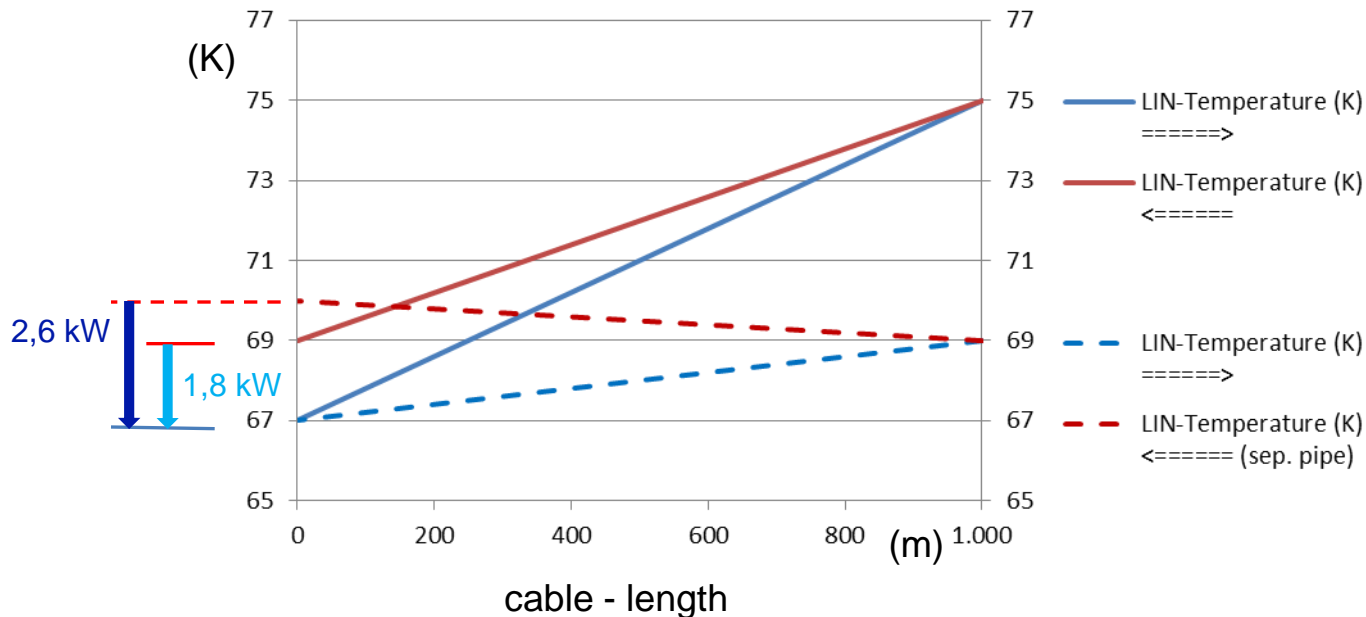
Liquid Nitrogen Temperature Profile with separate return Pipe



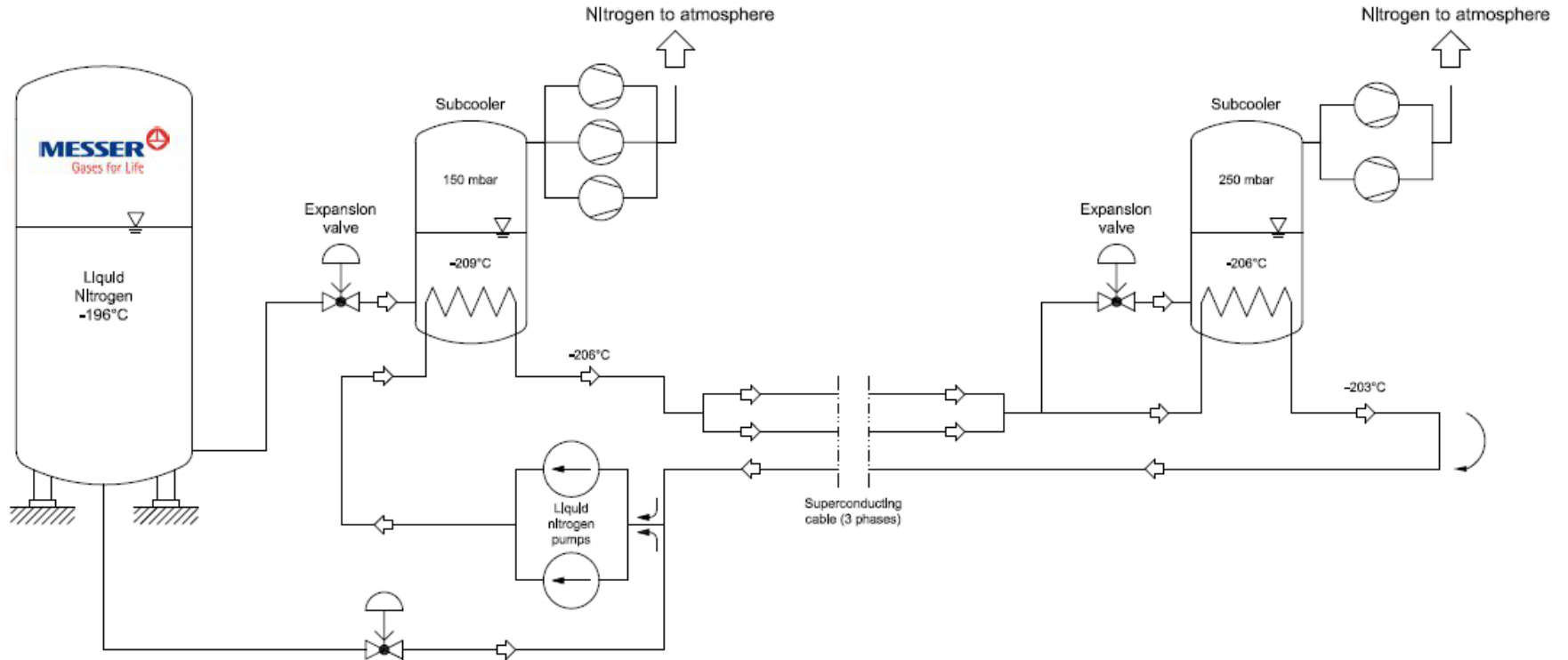
Temperature Profile Comparison: concentric cable / cable with sep. return pipe



Temperature Profile Comparison: concentric cable / cable with sep. return pipe

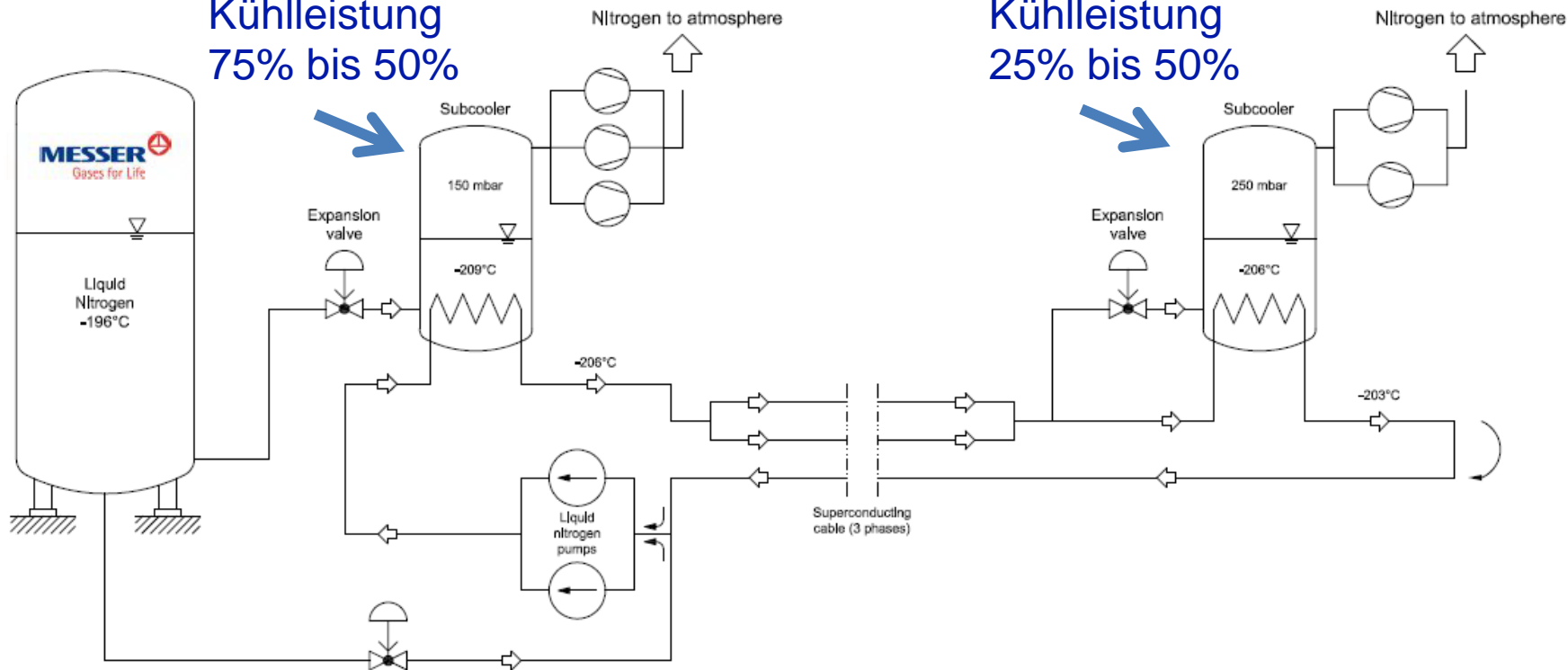


HTS - Kühlung: Projektkostenreduzierung durch Optimierung des Kühlkonzepts



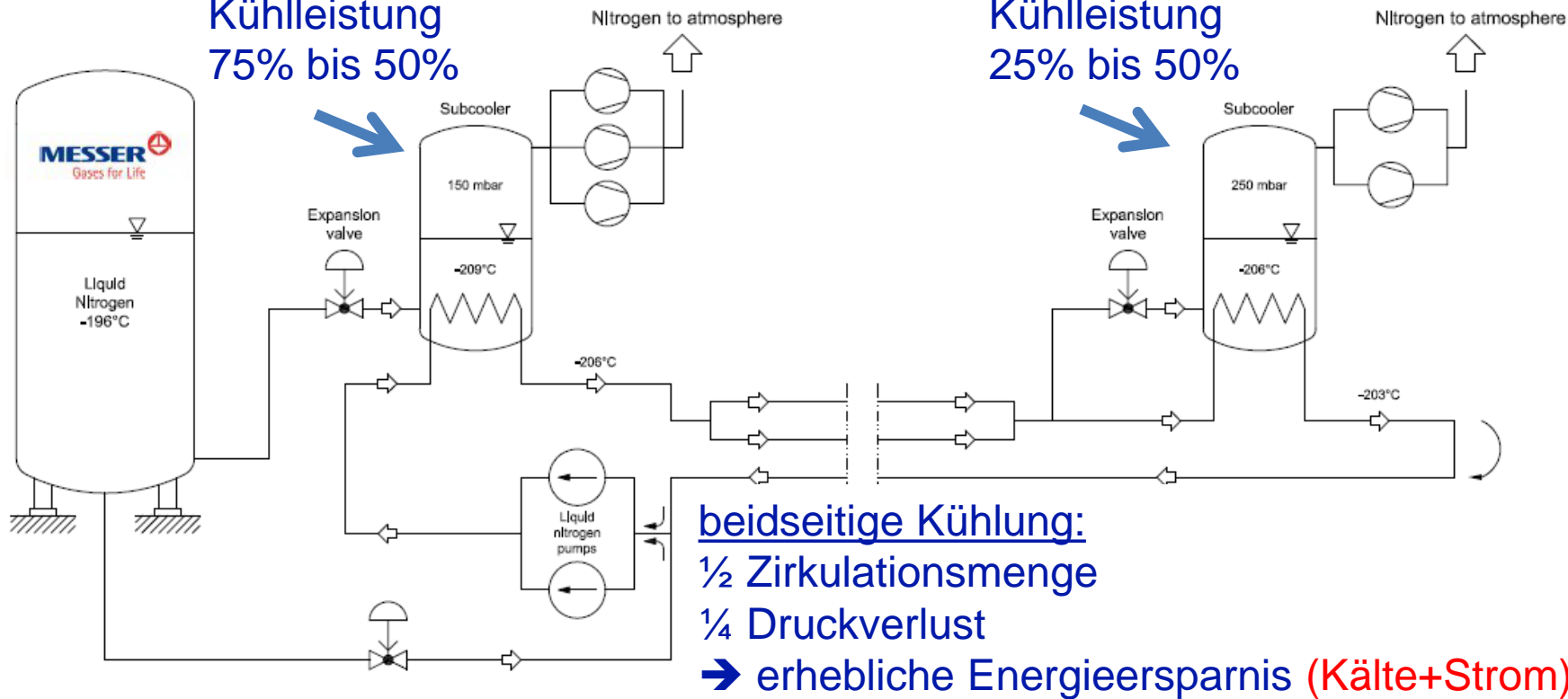
Hauptunterkühler:
Kühlleistung
75% bis 50%

„Satellit“:
Kühlleistung
25% bis 50%



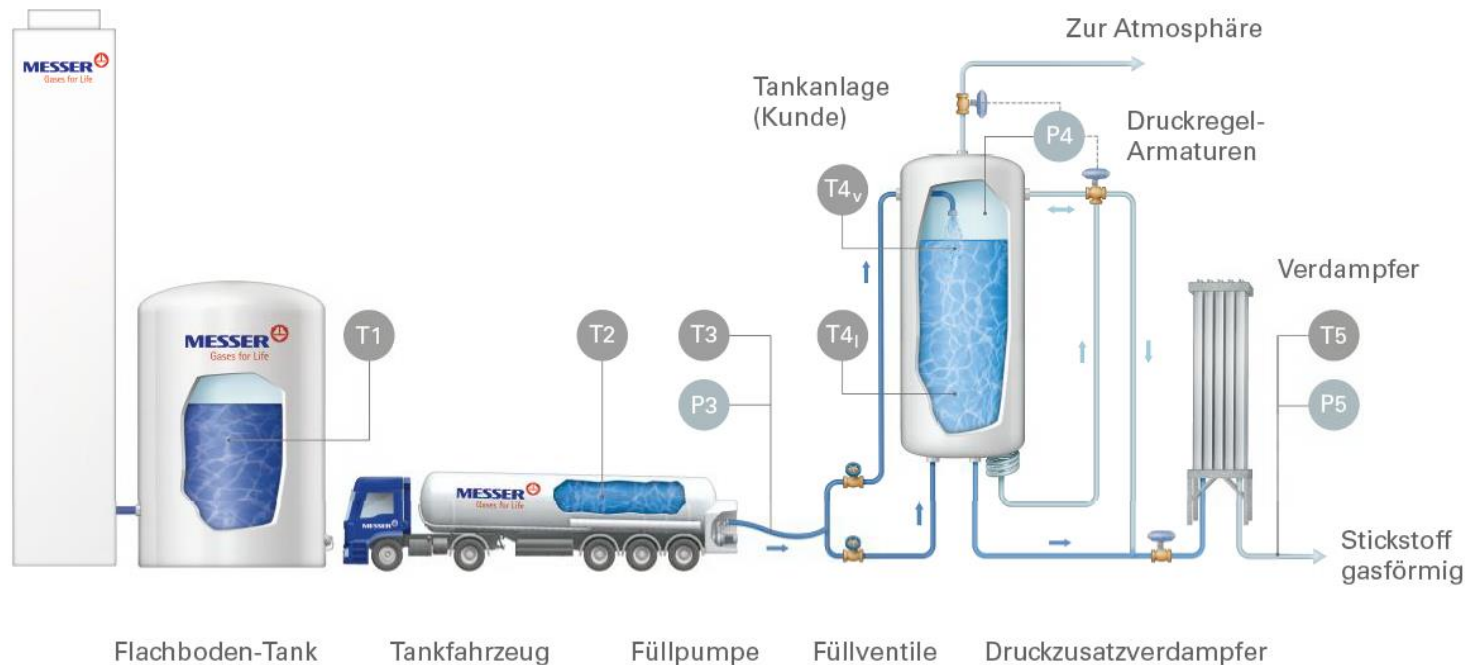
Hauptunterkühler:
Kühlleistung
75% bis 50%

„Satellit“:
Kühlleistung
25% bis 50%



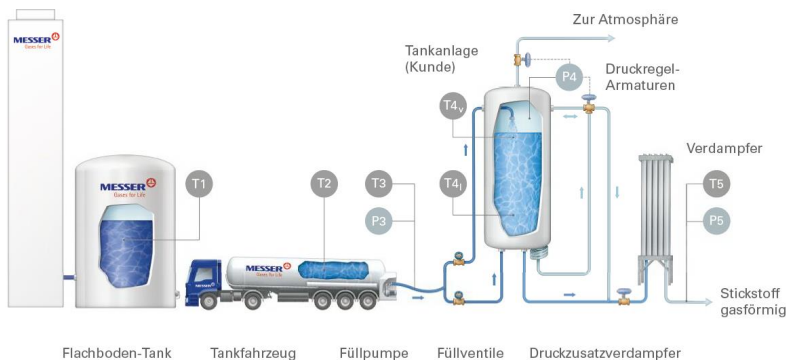
Optimierung von Anwendung und Versorgung

Luftzerlegungsanlage
(mit Verflüssiger)



Excel-Programm zur Optimierung der Stickstoffversorgung in Verbindung mit der Anwendung

Luftzerlegungsanlage (mit Verflüssiger)



Projekt:	AmpaCity-Versorgung VT5018			Datum:	Do, 08.03.2018
Anmerkung:	orange Felder: Eingabedaten Anwendung; gelbe Felder Eingabedaten Logistik				
Kundendaten:				Isolations- und Füllverluste (Tankwagen)	
Entnahmemenge	$N_{2(l)}$	68,0	kg/h	Masse Tankwagen	m_{TW} 20,000 kg
Tankdruck	p4	5,000	bar (abs)	Transportzeit	Δt 3,0 h
Anwendungsdruck	p5	0,200	bar (abs)	Verdampfungsrate	0,60 %/d
Gas-Austrittstemp.	T5	-207,0	°C	Temperaturanstieg	ΔT 0,4 °C
1 Flachbodentank			Verluste Füllpumpe		
Temperatur	T1	-196,0	°C	Pumpenwirkungsgrad	η_P 0,17
Druck	p1	1,013	bar (abs)	Drucküberhöhung	Δp 10,000 bar
Siedetemperatur	Ts	-195,8	°C	Pumpendruck	p3 15,000 bar (abs)
Enthalpie	h	-122,4	kJ/kg	Temperaturanstieg	ΔT 3,4 °C
Dichte	ρ	807,0	kg/m ³	Verluste Kundentank (Isolation und Druckzusatz)	
2 Tankfahrzeug			Volumen Kundentank		
Temperatur	T2	-195,6	°C	Volumen Kundentank	V_{KT} 50,0 m ³
Druck	p2	3,500	bar (abs)	Verdampfungsrate	0,10 %/d
3 Füllleitung (Eintritt Kundentank)			Gas (Vol. Ausgleich)		
Temperatur	T3	-192,2	°C	Gas (Vol. Ausgleich)	\dot{m}_{GA} 1,3 kg/h
4v Kundentank (Dampfphase)			Isolationsverluste		
Temperatur	T4v	-150,0	°C	Isolationsverluste	$\dot{Q}_{L,KT}$ 0,11 kW
4l Kundentank (Flüssigphase)			Wärmestr. DZV		
Temperatur	T4l	-190,1	°C	Wärmestr. DZV	\dot{Q}_{DZV} 0,00 kW
Druck	p4	5,000	bar (abs)	Temperaturanstieg	ΔT 2,1 °C
Siedetemperatur	Ts	-179,2	°C	Massenbilanz (Kundentank)	
Enthalpie	h	-110,0	kJ/kg	Massenstrom Eintritt	\dot{m}_{Ein} 68 kg/h
Dichte	ρ	780,3	kg/m ³	Massenstrom Austritt	\dot{m}_{Aus} 68 kg/h
			Gasentnahme		
			\dot{m}_{GE} 0 kg/h		
			Kälteleistung (Verdampfer)		
			Verdampfung 3,4 kW		
			Überhitzung 0,0 kW		
			Gesamt 3,4 kW		

Fazit:

- AmpaCity ist seit 4 Jahren mit großem Erfolg in Betrieb.
 - Auf Basis der vorhandenen Betriebsdaten ist ein Upscaling der Kühlanlage mit sehr genauen Prognosen bzgl. Betriebskosten und Zuverlässigkeit leicht möglich.
 - Die Technologie ist für die innerstädtische Stromverteilung (typische Kabellänge: 3 bis 6 km) gut geeignet.
 - Das kostengünstigste (und zuverlässigste) Projekt entsteht bei **gleichzeitiger Optimierung** von Kabel-Kryostat-Design, Kühlanlage und Stickstoffversorgung.
- ➔ Alles ist vorbereitet, die Projekte können nun kommen !!!

**Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit**



ZIEHL VI – Tagung 2018